



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada
Sistemas de información y Comunicaciones

Máster en Tecnologías de Telecomunicación



Trabajo Fin de Máster

Microcojinetes Magnéticos Aplicados a las Micromáquinas de Inducción Electroestática

Autor: Yiri Danis Valencia Cardona
Tutor(es): Dr. José Miguel Monzón Verona
Dr. Santiago García-Alonso Montoya
Fecha: Diciembre de 2014



t +34 928 451 086
f +34 928 451 083

iuma@iuma.ulpgc.es
www.iuma.ulpgc.es

Campus Universitario de Tafira
35017 Las Palmas de Gran Canaria



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada
Sistemas de información y Comunicaciones

Máster en Tecnologías de Telecomunicación



Trabajo Fin de Máster

Microcojinetes Magnéticos Aplicados a las Micromáquinas de Inducción Electroestática

HOJA DE FIRMAS

Alumno/a: Yiri Danis Valencia Cardona Fdo.:

Tutor/a: Dr. José Miguel Monzón Verona Fdo.:

Tutor/a: Dr. Santiago García-Alonso Montoya Fdo.:

Fecha: Diciembre de 2014



t +34 928 451 086
f +34 928 451 083

iuma@iuma.ulpgc.es
www.iuma.ulpgc.es

Campus Universitario de Tafira
35017 Las Palmas de Gran Canaria



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada
Sistemas de información y Comunicaciones

Máster en Tecnologías de Telecomunicación



Trabajo Fin de Máster

Microcojinetes Magnéticos Aplicados a las Micromáquinas de Inducción Electroestática

HOJA DE EVALUACIÓN

Calificación:

Presidente <<Nombre del Presidente>> Fdo.:

Secretario <<Nombre del Secretario>> Fdo.:

Vocal <<Nombre del Vocal>> Fdo.:

Fecha: <<Mes y Año>>



t +34 928 451 086 | iuma@iuma.ulpgc.es
f +34 928 451 083 | www.iuma.ulpgc.es

Campus Universitario de Tafira
35017 Las Palmas de Gran Canaria

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Descripción de los objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Resumen del estado del arte de la materia	2
1.2.1. Sistemas MEMS	2
1.2.2. Microcojinetes no magnéticos	3
1.2.3. Microcojinetes magnéticos	5
1.2.4. Aplicaciones	5
1.2.5. Clasificación de los microcojinetes magnéticos	7
1.2.6. Fabricación de microcojinetes Magnéticos Activos y Pasivos	8
1.3. Trabajo realizado y descripción de la metodología usada para llevarlo a cabo	11
2. Principios y limitaciones de las técnicas electromagnéticas de suspensión y levitación	13
2.1. Introducción	13
2.2. Condiciones de estabilidad	13
2.3. Levitación usando imanes permanentes	16
2.3.1. Propiedades de los imanes permanentes de los materiales magnéticos	16
2.3.2. Imanes permanentes para la levitación de repulsión	17
2.4. Levitación usando imanes superconductores	17
2.4.1. Propiedades de los superconductores	17
2.4.2. Principios de levitación superconductora	18
2.5. Levitación Inducida por corrientes de Foucault	19
2.5.1. Placas Rectangulares	19
2.5.2. Levitación de Esferas y Cilindros	21
2.6. Suspensión usando electroimanes de corriente continua	21
2.6.1. Principio de la suspensión usando electroimanes DC controlados	22
2.6.2. Naturaleza del problema de control en una suspensión de un solo imán	22
3. Diseño y análisis de un microcojinete magnético aplicado a un micromotor de inducción electrostático	25
3.1. Micromotores electrostáticos	25
3.1.1. Tipos de Micromotores	25
3.1.2. Análisis de los esfuerzos tangenciales y normales.	27

3.2. Topologías de los microcojinetes magnéticos	36
3.2.1. Microcojinetes Axiales	36
3.2.2. Microcojinetes Radiales	36
3.2.3. Microcojinetes Magnéticos Permanentes	36
3.3. Diseño propuesto	38
3.3.1. Rigidez en los Microcojinetes Magnéticos	41
4. Análisis de los microcojinetes magnéticos por el método de los elementos finitos	43
4.1. Introducción a los elementos finitos	43
4.1.1. Problemas de magnetostática	44
4.1.2. Problemas magnéticos armónicos en el tiempo	45
4.1.3. Problemas de electrostática	46
4.1.4. Condiciones de contorno	47
4.2. Diseño de microcojinetes magnéticos	48
4.2.1. Modelo N.1	48
4.2.2. Modelo N.2	52
4.2.3. Modelo N.3	55
4.2.4. Modelo N.4	58
4.3. Análisis de sensibilidad de magnitudes	61
4.3.1. Gráficas de la fuerza axial ejercida en función del desplazamiento	62
4.3.2. Gráficas de la fuerza axial ejercida en función del desplazamiento utilizando corriente	64
4.3.3. Análisis de sensibilidad de la fuerza axial ejercida en función del desplazamiento utilizando corriente y empleando el hierro	71
5. Resultados obtenidos	75
6. Resumen	77
6.1. Conclusiones	77
6.2. Líneas futuras de trabajo	78

Índice de figuras

1.2.1. Corazón artificial [23], Bomba pediátrica [22].	6
1.2.2. Partículas virales.	6
1.2.3. Micro robot	7
2.5.1. Evolución de las placas rectangulares.	20
2.5.2. Levitación de esferas y cilindros	21
3.1.1. Torque vs velocidad del rotor 200 MΩ.	28
3.1.2. Análisis de sensibilidad del par frente a la resistencia rotatoria del rotor.	30
3.1.3. Análisis de sensibilidad del par frente al gap.	31
3.1.4. Análisis de sensibilidad del par frente al grosor del aislante.	31
3.1.5. Análisis de sensibilidad del par frente al radio externo.	32
3.1.6. Análisis de sensibilidad de la fuerza normal frente a la amplitud de tensión del estator.	33
3.1.7. Análisis de sensibilidad de la fuerza normal frente al gap.	33
3.1.8. Análisis de sensibilidad de la fuerza normal frente al grosor del aislante.	34
3.1.9. Análisis de sensibilidad de la fuerza normal frente al radio externo.	34
3.2.1. Topologías de los microcojinetes magnéticos permanentes radiales	37
3.2.2. Topologías de los microcojinetes magnéticos permanentes	38
3.3.1. Diseño N.1 Microcojinete magnético asimétrico	38
3.3.2. Diseño N.1 Vista superior del microcojinete magnético	39
3.3.3. Diseño N.2 Microcojinete magnético simétrico	39
3.3.4. Diseño N.2 Vista superior del microcojinete magnético	40
3.3.5. Diseño N.2 Vista inferior del microcojinete magnético	40
3.3.6. Micromotor eléctrico de inducción	41
3.3.7. Medidas del micromotor eléctrico de inducción	41
3.3.8. Sistema de masa-resorte simple	41
4.2.1. Dimensiones del diseño propuesto para el modelo N.1	49
4.2.2. Diseño de los microcojinetes magnéticos.	50
4.2.3. Geometría con IABC generada por la frontera abierta y mallado.	51
4.2.4. Trazado de la densidad de flujo.	51
4.2.5. Dimensiones del diseño propuesto para el modelo N.2	52
4.2.6. Diseño de los microcojinetes magnéticos.	53
4.2.7. Geometría con IABC generada por la frontera abierta y mallado.	54
4.2.8. Trazado de la densidad de flujo.	54
4.2.9. Dimensiones del diseño propuesto para el modelo N.3	55

4.2.10. Diseño microcojinetes magnéticos.	56
4.2.11. Geometría con IABC generada por la frontera abierta y mallado.	57
4.2.12. Trazado de la densidad de flujo.	57
4.2.13. Dimensiones del diseño propuesto para el modelo N.4	58
4.2.14. Diseño microcojinetes magnéticos.	59
4.2.15. Geometría con IABC generada por la frontera abierta y mallado.	60
4.2.16. Trazado de la densidad de flujo.	60
4.3.1. Desplazamiento ascendiente del cilindro.	62
4.3.2. Desplazamiento descendiente positivo del cilindro	63
4.3.3. Desplazamiento negativo del cilindro	64
4.3.4. Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.1.	66
4.3.5. Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.1.	67
4.3.6. Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.2.	67
4.3.7. Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.2.	68
4.3.8. Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.3.	69
4.3.9. Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.3.	69
4.3.10. Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.4.	70
4.3.11. Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.4.	70
4.3.12. Diseño de los microcojinetes magnéticos	71
4.3.13. Geometría con IABC generada por la frontera abierta y mallada.	72
4.3.14. Trazado de la densidad de flujo.	72
4.3.15. Relación entre la fuerza y el desplazamiento utilizando hierro, Modelo N.4.	73
4.3.16. Relación entre la fuerza y el desplazamiento utilizando hierro, Modelo N.4.	74

Índice de tablas

1.1. Clasificación de las fuerzas magnéticas	7
1.2. Programación semanal	11
3.1. Valores tomados para calcular el par y la fuerza normal.	28
3.2. Análisis de sensibilidad de la fuerza tangencial.	30
3.3. Análisis de sensibilidad de la fuerza normal.	32
4.1. Valores del método frontera abierta.	49
4.2. Valores del método frontera abierta	53
4.3. Valores del método frontera abierta	56
4.4. Valores del método frontera abierta	59
4.5. Imanes según el modelo diseñado	61
4.6. Valores tomados para los imanes	62
4.7. Rigidez de los microcojinetes magnéticos para el desplazamiento ascendente.	63
4.8. Rigidez de los microcojinetes magnéticos para el desplazamiento descendente positivo.	63
4.9. Rigidez de los microcojinetes magnéticos para el desplazamiento negativo.	64
4.10. Datos de fabricación de algunas microbobinas 1.	65
4.11. Datos de fabricación de algunas microbobinas 2	65
4.12. Número de bobinas para cada superficie.	65
5.1. Número de bobinas para cada superficie.	75

Algoritmos

- 3.1. Código scilab de la fuerza normal 35
- 3.2. Código scilab de la fuerza tangencial 35
- 4.1. Código scilab análisis de sensibilidad 61

Capítulo 1

Introducción

En este trabajo se diseña y analiza un microcojinete magnético aplicado a un micromotor de inducción electrostático, con la finalidad de disminuir el nivel rozamiento, el desgaste de los microcojinetes y, por consiguiente, las altas temperaturas que toman al funcionar estos micromotores a tan altas velocidades.

Este diseño es planteado para mejorar las prestaciones del micromotor. Al realizar el estudio bibliográfico, no se encontraron referencias de estos modelos aplicados a este tipo de micromotores. El presente trabajo está dividido en 6 capítulos, los cuales desarrollan el análisis y el diseño de los microcojinetes magnéticos.

El capítulo 1 hace una breve descripción del estado del arte de la materia y presenta las principales aplicaciones y trabajos realizados acerca del tema a tratar; por otra parte se describe la metodología utilizada para llevar a cabo dicho estudio y el trabajo realizado en el mismo.

El capítulo 2 presenta los principios y limitaciones de las técnicas electromagnéticas de suspensión y levitación actualmente empleadas para llevar a cabo los diferentes trabajos que se encuentran en la actualidad. Este capítulo además se centra en la utilización de los diferentes tipos de imanes empleados en la levitación.

En el capítulo 3 se desarrolla un análisis del microcojinete magnético por el método de los elementos finitos; aquí se realiza una breve introducción a este método y se elabora el diseño del microcojinete magnético a estudiar.

Por otra parte, en el capítulo 4 se elabora el diseño y análisis de un microcojinete magnético aplicado a un micromotor de inducción electrostática. Se estudian las diferentes topologías que presentan los microcojinetes magnéticos, se expone una pequeña introducción a los micromotores de inducción electrostática y se presenta el diseño propuesto para el trabajo realizado.

En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos en el estudio realizado.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo y las líneas futuras.

1.1. Descripción de los objetivos

1.1.1. Objetivo General

El objetivo general es aportar conocimiento para el desarrollo de herramientas que puedan ser utilizadas para el análisis y el diseño de un microcojinete magnético que será aplicado a las micromáquinas de inducción electrostática, empleando un sistema mixto de micro imanes permanentes y micro bobinas.

1.1.2. Objetivos Específicos

1. Realizar el estudio del estado del arte de la materia.
2. Analizar los principios y limitaciones de técnicas electromagnéticas de suspensión y levitación.
3. Diseñar un microcojinete magnético y aplicarlo a las micromáquinas de inducción electrostática.
4. Emplear el método de los elementos finitos como técnica de análisis de los microcojinetes magnéticos.

1.2. Resumen del estado del arte de la materia

1.2.1. Sistemas MEMS

Los Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS) [27] surgieron gracias a la miniaturización de los sensores y actuadores, siendo fabricados en grandes volúmenes a bajo costo, mediante la elaboración de técnicas derivadas de la industria de la microelectrónica, en particular la tecnología de microfabricación, que ha permitido la creación de maquinaria a pequeña escala a diferencia de la maquinaria convencional, tal como motores, generadores y turbinas en micro dispositivos en lo que refieren a micro máquinas. Las dimensiones físicas críticas de los dispositivos MEMS pueden variar desde muy por debajo de una micra en el extremo inferior del espectro de dimensiones, hasta varios milímetros. Asimismo, los tipos de dispositivos de MEMS pueden variar desde estructuras relativamente simples que no tienen elementos móviles, a los sistemas electromecánicos extremadamente complejos con múltiples elementos móviles bajo el control de la microelectrónica integrada. No solo es el rendimiento de los dispositivos MEMS

lo que los hace excepcionales, sino también su método de producción, el cual aprovecha las técnicas de fabricación por lotes, las mismas utilizadas en la industria de circuitos integrados, lo que se traduce en un costo más bajo de producción por cada uno de los dispositivos.

Un dispositivo MEMS consta de los siguientes componentes:

- * Micro Sensores
- * Micro Electrónica
- * Micro Actuadores

La microelectrónica o circuitos integrados creados en el dispositivo pueden ser considerados como el "cerebro" de los sistemas. El micro-sensor y Micro-actuador pueden de manera significativa aumentar la capacidad de toma de decisiones para permitir que el dispositivo MEMS pueda detectar y controlar el medio ambiente. Los sensores pueden recopilar la información del entorno a través de medición mecánica, química, térmica, biológica, de fenómenos ópticos y magnéticos; la electrónica puede procesar la información derivada de los sensores y a través de una cierta capacidad de toma de decisiones dirigir los actuadores para responder al movimiento, posicionamiento, de regulación, bombeo y filtrado, de ese modo, controlar el medio ambiente durante algún propósito deseado.

1.2.2. Microcojinetes no magnéticos

En este apartado se resumen los principales tipos de microcojines no magnéticos como son los basados en las microbolas y microfluidos.

En este artículo [10] se presenta el diseño, fabricación y caracterización de un micromotor rotativo apoyado sobre rodamientos de microbolas. Esta es la primera demostración de una micromáquina rotativa con un soporte mecánico robusto que proporciona la tecnología de las microbolas. El micromotor presenta un fondo de tracción de capacitancia variable de seis fases; está diseñado y simulado utilizando el método de elementos finitos (MEF). El estator y el rotor se fabrican por separado en sustratos de silicio y se ensamblan con las microbolas. Presenta tres capas de polímero de bajo k benzociclobuteno, dos capas de oro, y una carcasa de microbolas de silicio se han fabricado en el estator. Las microbolas y las estructuras sobresalientes están grabados en el rotor y se recubren con una película de carburo de silicio que reduce la fricción. Una velocidad angular superior de 517 rpm, que corresponde a la velocidad de la punta lineal de 324 mm/s, se mide a ± 150 - V y 800 Hz de excitación. Esto es 44 veces mayor que la velocidad previamente demostrada para micromotores lineales apoyados en los cojinetes de microbolas. Se ha desarrollado un método sin contacto para extraer el par de torsión y el coeficiente de cojinete de fricción a través de mediciones de respuesta dinámica. El par se mide indirecta-

mente a ser $-5,62 \pm 0,5 \mu\text{N.m}$ a ± 150 - V de excitación que es comparable con los resultados de la simulación (MEF). La potencia mecánica de salida máximo en ± 150 V y 517 rpm se calculó en 307 mW. El micromotor rotatorio desarrollado es una tecnología de plataforma para microbombas centrífugas usadas para aplicaciones de entrega de combustible y refrigeración.

Este trabajo [12] presenta una revisión completa de la tecnología de soporte de microbolas en los últimos once años. Se presentan las consideraciones de diseño y los resultados de rendimiento de los dispositivos que utilizan este tipo de rodamientos microfabricados.

En este documento [28] se presenta el primer mecanismo de una bola giratoria que lleva encapsulado. Este utiliza una microfabricación de silicio y bolas de acero inoxidable. El método de captura de bolas de acero inoxidable en una capa de silicio que sirve para apoyar un rotor tanto axial como radial. Este se encuentra desarrollado para máquinas y micromáquinas. Inicialmente presentan una velocidad de hasta 6,8 krpm sin lubricación, mientras con lubricación es posible alcanzar una velocidad de hasta 15,6 krpm.

En [8] se presenta el desarrollo del micromotor de capacidad variable apoyado sobre rodamientos de microbolas. El rotor y el estator del micromotor fueron fabricados utilizando un proceso de 9 niveles de máscara. Con un recubrimiento de carburo de silicio que se empleó para reducir la fricción de las microbolas de silicio en el rotor. La velocidad angular superior correspondiente fue de 517 rpm, la velocidad de la punta lineal de 324 mm/s. Este se midió a 150 V y 800 Hz de excitación. Esto es 44 veces más alta que la velocidad medida previamente para los micromotores lineales apoyados sobre cojinetes de microbolas. El micromotor rotatorio desarrollado en este estudio es una tecnología de plataforma para microbombas centrífugas con el fin de ser aplicadas en el suministro de combustible.

En este artículo [9] se desarrolla la medición y el modelado de la fricción en dos micromotores lineales y giratorios apoyados sobre cojinetes de microbolas utilizando la caracterización de la respuesta transitoria. Para el micromotor lineal se midió la fuerza de fricción de 0,33 mN a la velocidad de 7-10 mm/s y la fuerza normal de 20 mN. Estos resultados permiten la comprensión de las fuerzas de fricción y su dependencia de las velocidades de operación y de las cargas normales de rodamiento con microbolas aplicadas a las micromáquinas.

Este artículo [5] analiza el rendimiento de los micro dispositivos giratorios que incorporan un rodamiento líquido para acoplar un elemento giratorio a un sustrato fijo. Esta tecnología de cojinetes líquido promete mejorar significativamente la durabilidad y la vida útil de los motores micro mecánicos. Se presenta un accionamiento magnético de 10 mm de diámetro de rotor de silicio que se utiliza para caracterizar el motor del cojinete líquido a velocidades de rotación de

hasta 1800 rpm.

1.2.3. Microcojinetes magnéticos

Un cojinete magnético [27] es cualquier dispositivo basado en efectos magnéticos para lograr accionamiento mecánico. Lo que lo diferencia de los microcojinetes magnéticos es su tamaño, ya que estos se limitan a los tamaños típicamente medidos en micrómetros y hasta un máximo de alrededor de uno o dos mm en tamaño total. Por otra parte la fricción ha sido un factor limitante para el desarrollo exitoso y el uso de micromaquinas en varias aplicaciones. Uno de los enfoques para aliviar este problema es utilizar técnicas de suspensión magnéticas como microcojinetes magnéticos. Los microcojinetes magnéticos son rodamientos donde las fuerzas de suspensión se generan magnéticamente sin ningún tipo de contacto.

Debido al contacto de baja fricción que presentan, los microcojinetes magnéticos pueden ser utilizados para lograr altas velocidades de rotación. Además otras ventajas de los microcojinetes magnéticos son los costos de mantenimiento tan bajos, la ausencia de la necesidad de lubricación y una mayor esperanza de vida.

1.2.4. Aplicaciones

En la actualidad los microcojinetes magnéticos [27] presentan aplicaciones en algunos campos, tanto de la medicina como la telefonía móvil. Algunas aplicaciones de los microcojinetes magnéticos, son micro giroscopios [20], micro espejos giratorios [27], micromaquinas [29], micro turbinas [27].

Otras aplicaciones potenciales de estos dispositivos incluyen sensores inerciales, bombas de micro fluidos, interruptores micro ópticos y herramientas de micro posicionamiento y microcirugía. Otras aplicaciones potenciales para tales dispositivos incluyen sistemas de posicionamiento global (GPS), y medidores de rotor de hilado en miniatura para sistemas de vacío portátiles para ser utilizado en aplicaciones espaciales.

Una aplicación interesante de los microcojinetes magnéticos es su uso en corazones artificiales [1]. El uso de la suspensión magnética en dispositivos de asistencia ventricular fue iniciado por el profesor Paul Allaire y el profesor Houston de la Universidad de Virginia, allí se desarrolló el primer ventrículo, el cual fue suspendido magnéticamente con ayuda de una bomba centrífuga, ver la figura 1.2.1. Esta aplicación fue desarrollada en 1999.

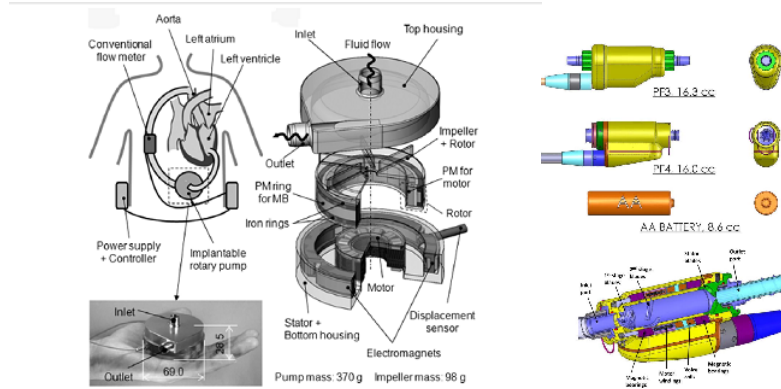


Figura 1.2.1: Corazón artificial [23], Bomba pediátrica [22]..

Recientemente se ha apuntado a un icono biológico, la placa de Petri [2] de dos dimensiones, que dio a conocer una nueva técnica para el cultivo de células en 3D. El nuevo proceso utiliza fuerzas magnéticas para hacer levitar las células mientras se dividen y crecen para formar los tejidos más parecidos a los que están dentro del cuerpo humano, ver la figura 1.2.2.

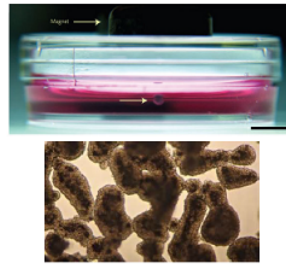


Figura 1.2.2: Partículas virales.

Otra aplicación es el micro-robot volador ver figura 1.2.3; el microrobot creado se mueve gracias a la levitación magnética. Este micro-robot puede volar y se trata del primero de estas características del mundo. Una de sus principales características es que se mueve gracias a la levitación magnética, de un modo similar a como hacen los trenes maglev. Además, gracias a su tamaño tiene la particularidad de poder introducirse, literalmente, en cualquier espacio. Esto lo hace perfecto para realizar funciones muy complicadas hasta el momento, como ensamblar pequeños dispositivos, manipular materiales potencialmente peligrosos e incluso llevar a cabo operaciones de microcirugía.

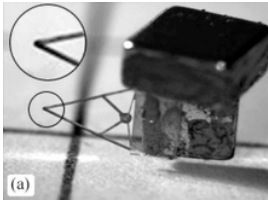


Figura 1.2.3: Micro robot .

1.2.5. Clasificación de los microcojinetes magnéticos

Por lo general todos los microcojinetes magnéticos [27] forman parte de una de las seis categorías ver, cuadro 1.1.

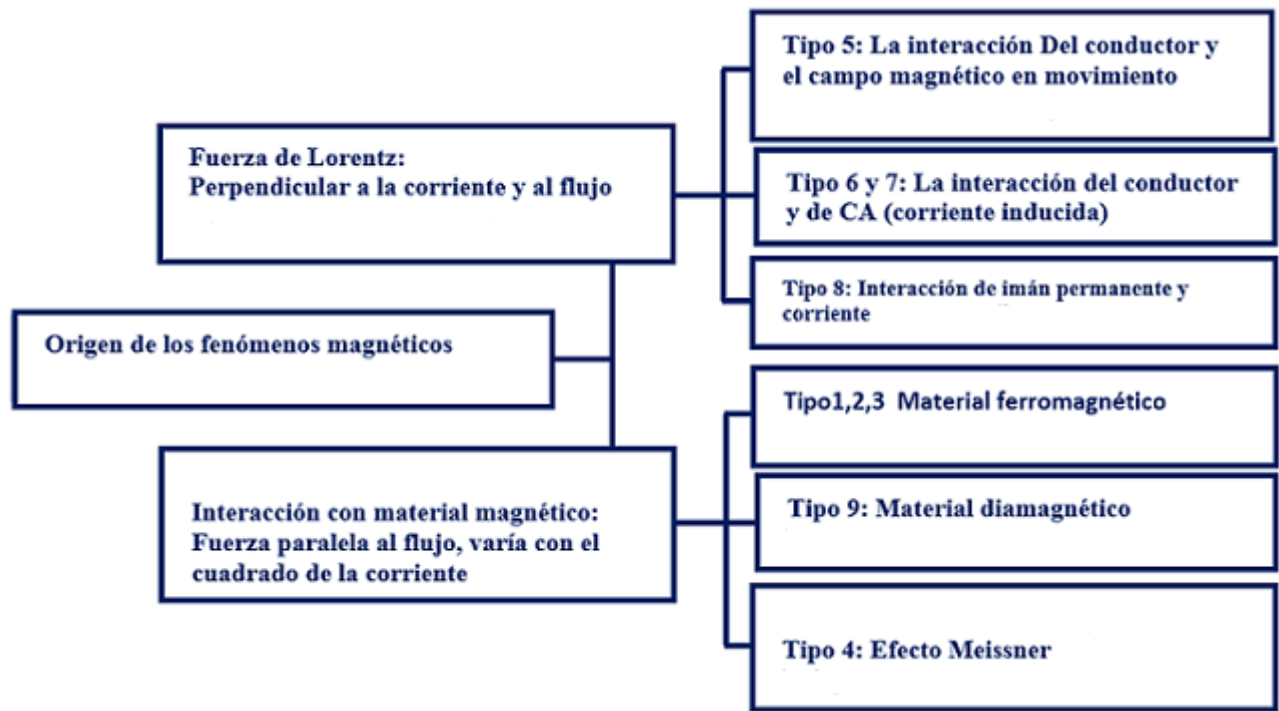


Tabla 1.1: Clasificación de las fuerzas magnéticas .

La fuerza magnética puede calcularse de dos formas básicamente diferentes: la primera como fuerza de Lorentz, que es un producto transversal perpendicular al flujo magnético y lineal con la corriente. En este no hay materiales ferromagnéticos. Si los materiales ferromagnéticos están presentes en el campo, la fuerza se calcula a través de la derivación de la energía del campo, en este caso, es paralela a la línea de flujo y perpendicular a la superficie del material ferromagnético o también por el tensor de esfuerzos de Maxwell. Estas dos situaciones forman una primera distinción en dos grupos de actuadores magnéticos en el cuadro 1.1 de la clasificación anterior.

Tipo5: Interacción de un conductor en movimiento en un campo magnético. Este estará sujeto

a la fuerza de Lorentz.

Tipo 6 y 7: Interacción de un conductor y una corriente alterna. Un ejemplo la levitación de una gota de metal fundido.

Tipo8: Interacción del campo de un imán permanente y un conductor. Este puede ser utilizado por un microcojinete magnético.

Tipo 1, 2, 3: Esta clase contiene todos los rodamientos con materiales ferromagnéticos. Tanto aquellos en los que el material es atraído por un electroimán o por un imán permanente. En esta categoría, tenemos más del 90 por ciento de todos los cojinetes magnéticos; estos se basan en la fuerza de atracción y por lo general están controlados de forma activa para la estabilización.

Tipo9: Cojinetes diamagnéticos. Se basan en el efecto diamagnético de los materiales tales como bismuto o grafito. El efecto es débil, por lo tanto, las aplicaciones se limitan a pequeñas masas o a la estabilización de cojinetes pasivos de tipo 3, donde el peso se compensa con los imanes permanentes.

Tipo 4: Los cojinetes están basados en materiales superconductores. Este tipo se basa esencialmente en la relativa permeabilidad de los superconductores, es una especie de fuerza amplificada con un efecto diamagnético.

1.2.6. Fabricación de microcojinetes Magnéticos Activos y Pasivos

A continuación se exponen una serie de artículos relacionados con la fabricación de los microcojinetes magnéticos activos y pasivos.

En el artículo [11] se ha diseñado un actuador de un microcojinete magnético utilizando electroimanes. En este diseño, la posición del rotor se controla activamente en las direcciones radiales y pasivamente en la dirección axial. Lo constituye la red de alimentación y un micro sensor de posición junto con uno o más sistemas de control proporcional, lo que garantiza que el rotor se suspenda activamente en las direcciones radiales. El estator circular tiene cuatro bobinas de control que se intercalan entre las dos placas del extremo del estator. El diámetro del estator y el rotor son 2,1 y 2,6 mm, respectivamente, mientras que el espesor se fija en 250 μ . El espacio de aire entre el estator y el rotor se ha fijado en 10 μ . Las placas del estator y del rotor fueron fabricados utilizando Galvanoplastia Permalloy, mientras que las bobinas de control usa técnicas convencionales de bobinado.

En [4] se explica como los objetos diamagnéticos son repelidos por campos magnéticos. Si los campos son lo suficientemente fuertes, esta repulsión puede equilibrar la gravedad, y los

objetos que levitan, de esta manera están en equilibrio estable.

El artículo [25] muestra las numerosas aplicaciones prácticas que hoy en día se están encontrando en los cojinetes magnéticos activos a pesar que los costes de estos sistemas siguen siendo altos. Los cojinetes magnéticos pasivos no necesitan sensores ni la utilización de control electrónico, es por lo cual que estos sistemas podrían abrir nuevos campos de aplicación. Por otra parte, los cojinetes magnéticos activos tienen pequeños espacios de aire entre el estator y el rotor, por lo cual no permiten grandes desviaciones del rotor desde la posición nominal. El cojinete magnético pasivo que se presenta en este artículo utiliza anillos de imán permanente como cojinetes radiales y un sistema electrodinámico como cojinete axial. Este último se compone de dos matrices Halbach planas y de dos conjuntos de bobinas en corto circuito. El peso total del rotor está magnéticamente compensado. Para generar la estabilización axial en el resto del motor se proporciona dos rodamientos mecánicos de contacto hacia abajo. Si una determinada velocidad de giro moderado se excede entonces se logrará la levitación del rotor completo.

El artículo [15] explica la tecnología maglev; habla además de las aplicaciones industriales de los cojinetes magnéticos y todo lo que esto conlleva para reducir el ruido y eliminar la fricción, también se describen algunas de las recientes aplicaciones de la suspensión electromagnética y las técnicas empleadas en la levitación de microcojinetes sin contacto.

El artículo [7] explica cómo las interacciones que implican imanes permanentes, las corrientes y los diversos materiales magnéticos siguen siendo muy eficaces e incluso mejoran a medida que las dimensiones se reducen, además explica como se están resolviendo los problemas de la tecnológica que ha frenado el desarrollo de microcojinetes magnéticos.

El artículo [29] describe el diseño y fabricación de un microcojinete magnético plano para su uso en micromáquinas de alta velocidad. El diseño propuesto se basa en la levitación de inducción para proporcionar un apoyo axial y radial lejos del rotor mientras se elimina la fricción de contacto. Este es totalmente compatible con las técnicas de micro fabricación convencionales y requiere solo dos etapas de fabricación. El rodamiento se beneficia de la estabilidad vertical inherente de levitación repulsiva, pero requiere una cuidadosa elección de los parámetros geométricos para optimizar la estabilidad lateral.

El [24] hace referencia a la reducción de la fricción en un nuevo diseño de motor multi estator. La parte de salida y la exactitud cinemática de este dispositivo son limitadas por la fricción de deslizamiento entre el rotor y la parte de superficie del microcojinete. El microcojinete integrado estabiliza el rotor y permite potencialmente la operación en ambientes líquidos mediante el

sellado de los electrodos del estator.

El artículo [16] presenta un índice de optimización de la tasa de utilización de los materiales magnéticos para conseguir una duración razonable del bloque magnético.

En [14] se presenta un nuevo diseño para un micromotor rotatorio donde el rotor en forma de anillo está suspendido electrostáticamente en cinco grados de libertad, esto con el objetivo de simplificar la estructura del estator, la detección capacitiva y la actuación electrostática. La estructura de emparedado de vidrio-silicio-vidrio se utiliza en este micromotor electrostático. La dinámica del rotor para el movimiento axial, la dirección z y la rotación alrededor de dos ejes en el plano, se derivó y se disoció en un esfuerzo para lograr la levitación estable del rotor.

En el artículo [26] se presenta el diseño, modelado y la caracterización experimental de una de las tres fases del micromotor paso a paso rotativo que emplea una suspensión de flexión del rotor para evitar cualquier contacto de fricción durante el funcionamiento, proporcionando así un movimiento paso a paso bidireccional preciso, repetible, y fiable y sin control de realimentación. Se fabricó un micromotor monolítico con polos de alta relación entre dimensiones y una red eléctrica integrada de tres fases en una oblea estándar de silicio de cristal único mediante la combinación de aislamiento de zanja vertical y con un micro mecanizado mayor. Este prototipo presenta una caracterización experimental de un diámetro de 1,4 mm.

En el artículo [30] se presenta el diseño de un micromotor de levitación electromagnética. El micromotor está formado por un contador de pistas circulares que proporcionan la fuerza de levitación estable y pistas radiales paralelas que producen un giro rotacional en el motor. Usando una sencilla representación filamentosas de las diferentes características del diseño del micromotor, se derivan las expresiones analíticas de la fuerza electromagnética producida por las características y se utilizan como base para el diseño del micromotor. Se emplea el modelado de elementos finitos para analizar la disposición del diseño del micromotor real. Para comprobar el diseño se construye un prototipo a escala macro.

En el trabajo [18], se presenta el diseño y la realización de un eje de alta velocidad para procesos micro mecánicos. Este eje está construido para investigar diversos procesos de micro mecanizado. La principal aplicación es una fresa con herramientas de diámetro muy pequeño. Las herramientas de micro fresado tienen un diámetro en el intervalo de 0,1 mm. Para mejorar la precisión de fresado se requieren velocidades de rotación extremadamente altas. El eje puede llegar a tomar velocidades de más de 200.000 rpm. El eje está equipado con dos cojinetes radiales, un cojinete axial y un motor síncrono de imán permanente. Los rodamientos radiales consisten en cojinetes magnéticos activos sesgados permanentes con imanes homopolares. El

cojinete axial se compone de los actuadores del tipo de reluctancia en un modo de conducción diferencial. El motor es un motor de imán permanente comercialmente disponible, capaz de alcanzar velocidades de más de 250.000 rpm.

1.3. Trabajo realizado y descripción de la metodología usada para llevarlo a cabo

La metodología utilizada para la elaboración de este Trabajo Fin de Máster ha consistido en estudiar los principios físicos que rigen el funcionamiento de los microcojinetes magnéticos en la micro escala, se analizan las leyes de escala, se analizar dos diseños de microcojinetes magnéticos, el primero de ellos es un microcojinete asimétrico el cual está formado por un rotor, el estator, el eje del rotor y una serie de imanes permanentes en la parte inferior del eje del rotor, al igual que una serie de bobinas que se ubicaran igualmente en la parte inferior del eje del rotor, esto con el fin de brindar una mejor estabilidad al eje y disminuir así las desventajas que presentan los microcojinetes como son el rozamiento y las altas temperaturas. El diseño propuesto N.2 es un microcojinete magnético simétrico, el cual consta de las mismas partes que el diseño N.1, la única diferencia es que en este diseño se realiza un duplicado de la parte inferior para la parte superior.

	ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Descripción de los objetivos																
Resumen del estado del arte de la materia																
Principios y limitaciones de las técnicas electromagnéticas de suspensión y levitación.																
Análisis de los microcojinetes magnéticos por el método de los elementos finitos.																
Diseño y análisis de un microcojinete magnético aplicado a un micromotor de inducción electrostático.																
Resultados obtenidos																

Tabla 1.2: Programación semanal .

Capítulo 2

Principios y limitaciones de las técnicas electromagnéticas de suspensión y levitación

2.1. Introducción

En el año de 1890 se presentan los primeros trabajos sobre imanes permanentes; se trata de tomar parte o la totalidad de la carga de un eje del rotor magnético. Aun así el mayor interés por este tema comenzó en el año de 1930 a causa de la aparición de materiales de imanes permanentes de mejor calidad. Las principales aplicaciones de estos imanes ha sido la generada por la suspensión de los ejes para aliviar la carga sobre el microcojinete mecánicos. Los métodos potenciales que pueden ser utilizados son:

1. Repulsión entre los imanes de fuerza fija y de materiales ferromagnéticos.
2. La levitación utilizando fuerzas de repulsión y materiales diamagnéticos.
3. El uso de la levitación de imanes superconductores.
4. La levitación por fuerzas de repulsión debido a las corrientes parásitas inducidas en una superficie.
6. La suspensión por la fuerza electrostática de atracción (entre dos placas).
7. La suspensión por la fuerza magnética de atracción (entre un electroimán y un cuerpo ferromagnético).
8. La suspensión usando electroimanes DC controlados.

Los anteriores métodos de levitación han sido los más utilizados en la última década con la aplicación en el transporte terrestre como objetivo principal. En primer lugar se encuentran los métodos que utilizan las fuerzas de atracción que son llamadas técnicas de suspensión y en segundo lugar las que utilizan las fuerzas de repulsión que son llamadas técnicas de levitación.

2.2. Condiciones de estabilidad

En la mecánica aplicada se conoce que un cuerpo está en equilibrio cuando la resultante de

las fuerzas que actúan sobre él es cero. También es importante tener en cuenta que el estado de equilibrio es estable, inestable o indiferente dependiendo de si el cuerpo esta ligeramente desplazado, esté tendería a volver a la posición de equilibrio, tiende a moverse más lejos de ello o no tendería a moverse en absoluto.

A continuación se expresa lo anterior en términos de la teoría de campo, para ello se considera una partícula, es decir, un cuerpo de dimensiones insignificantes, colocado en un punto (x_0, y_0, z_0) en un campo estático de fuerza $F(x, y, z)$. La fuerza sobre la partícula es $F(x_0, y_0, z_0)$. (x_0, y_0, z_0) es una posición de equilibrio estable si se cumplen las dos condiciones siguientes:

$$F(x_0, y_0, z_0) = 0 \quad \nabla F(x_0, y_0, z_0) < 0 \quad (2.2.1)$$

La primera es una condición de equilibrio y la segunda, una condición de estabilidad. Por otra parte, si F es un campo irrotacional entonces:

$$F(x, y, z) = -\nabla\psi(x, y, z) \quad (2.2.2)$$

Donde ψ es un potencial. En términos de ψ las condiciones necesarias para el equilibrio estable son:

$$\nabla\psi(x, y, z) = 0 \quad \nabla^2\psi(x, y, z) > 0 \quad (2.2.3)$$

El teorema de Earnshaw es una extensión a los campos electromagnéticos de las condiciones que pueden ser probadas utilizando la teoría del potencial. Es decir, en una región R libre de carga el campo electrostático $E(x, y, z)$ es solenoidal y irrotacional, es decir:

$$\nabla \cdot E(x, y, z) = 0 \quad \nabla \times E(x, y, z) = 0 \quad (2.2.4)$$

De la segunda de estas ecuaciones se deduce que:

$$E(x, y, z) = -\nabla\varphi(x, y, z) \quad (2.2.5)$$

Donde φ es el potencial electrostático. La fuerza sobre una partícula de carga q colocada en el campo es:

$$F(x, y, z) = qE(x, y, z) \quad (2.2.6)$$

Tomando la divergencia de esta ecuación y teniendo en cuenta la primera de las ecuaciones de todos los puntos en R .

$$\nabla \cdot F(x, y, z) = 0 \quad (2.2.7)$$

Aunque la ecuación (2.5) puede satisfacer la primera de las dos condiciones (2.1) necesarias para el equilibrio estable (2.7) viola el segundo. Por lo tanto si un cuerpo se coloca en un campo electrostático no puede descansar en equilibrio estable bajo la influencia de fuerzas eléctricas.

Cuando un cuerpo dieléctrico se coloca en un campo electrostático la polarización P esta relacionada para el campo eléctrico E por:

$$P = X_e * E \quad (2.2.8)$$

Donde X_e es la susceptibilidad eléctrica del cuerpo dieléctrico. El momento dipolar inducido está dada por:

$$p = \int P dV \quad (2.2.9)$$

En donde V es el volumen del cuerpo. Suponiendo que el cuerpo es lo suficientemente pequeño para que E permanezca constante

$$P = \int_{X_e} E dV =_{X_e} EV \quad (2.2.10)$$

La fuerza sobre el cuerpo está dada por

$$F_e = (p \cdot \nabla) \cdot E \quad (2.2.11)$$

Logrando así con la ayuda de la ecuación (2.2.10), los rendimientos

$$F_e = X_e V (E \cdot \nabla) E \quad (2.2.12)$$

Puesto que $X_e = (\varepsilon_r - \varepsilon_0)$ donde ε_r es la constante dieléctrica del cuerpo y ε_0 es la constante dieléctrica de espacio libre y como $(E \cdot \nabla) E = \frac{1}{2} \nabla E^2$ ecuación (2.12) puede reescribirse como

$$F_e = \frac{1}{2} (\varepsilon_r - \varepsilon_0) V \nabla E^2 \quad (2.2.13)$$

La ecuación anterior da la fuerza que un cuerpo dieléctrico de volumen V y la constante dieléctrica ε_r experimenta en un campo electrostático E . Del mismo modo un cuerpo magnético en un campo magnético H experimenta una fuerza.

$$F_m = \frac{1}{2} (\mu_r - \mu_0) V \nabla H^2 \quad (2.2.14)$$

Siendo μ_r la permeabilidad del cuerpo y μ_0 es la permeabilidad del espacio libre.

Dado que la divergencia de ∇E^2 no puede ser negativa en ninguna parte ya que es físicamente imposible que $(\varepsilon_r - \varepsilon_0)$ sea negativo, significa que la condición dada por la ecuación (2.2.4) no se puede satisfacer y por lo tanto, un cuerpo dieléctrico no puede estar en equilibrio estable en cualquier lugar en el campo electrostático.

La suspensión estable o levitación es imposible con un sistema de imanes permanentes a no ser que parte del sistema contenga material diamagnético o un superconductor $\mu_r = 0$ y además

es imposible de lograr la levitación en campos electrostáticos ya que no se conocen materiales con $\varepsilon_r < 1$.

2.3. Levitación usando imanes permanentes

En la última década se ha descubierto una nueva clase de materiales para la fabricación de imanes permanentes [15]; se ha desarrollado sobre la base de cobalto y algunos elementos de las tierras raras. En términos de su resistencia a la desmagnetización, los nuevos materiales son 20-50 veces superiores a la del alnico y su energía magnética es 2-6 veces mayor. Mientras que, por lo tanto, no tienen innumerables intentos de utilizar la fuerza de repulsión entre los imanes permanentes para las aplicaciones de tales como el alivio de la carga en los cojinetes, los materiales de más edad han sufrido inconvenientes con la desmagnetización.

El diseño de los imanes para los dispositivos de repulsión o de las aplicaciones que implican combinación con bobinas de corriente implica nuevas ideas y nuevos métodos, así como una cierta comprensión de las propiedades magnéticas de los nuevos materiales.

2.3.1. Propiedades de los imanes permanentes de los materiales magnéticos

Los elementos ferromagnéticos tienen átomos en el que una capa de electrones contiene menos que el número máximo de electrones. Normalmente en una gran colección de estos átomos los imanes atómicos apuntan en varias direcciones y se anulan entre sí. Si una muestra del material ferromagnético se coloca en un campo magnético, los imanes atómicos individuales tienden a alinearse de manera que cuando se retira la muestra del campo, se conserva un magnetismo residual. Los materiales magnéticos se dividen en dos categorías, duro o blando, dependiendo de la facilidad con la que pueden ser magnetizados y desmagnetizar. Un material duro tiene un amplio ciclo de histéresis y un material suave tiene un camino angosto.

Los materiales suaves son adecuados para ciertos dispositivos eléctricos tales como transformadores, donde el material se somete a una inversión de magnetización muchas veces por segundo. Los materiales duros, por otro lado, son los que se utilizan en las aplicaciones de los imanes permanentes, en particular los que utilizan las fuerzas de repulsión, tales como en suspensión o levitación puesto que la anchura del bucle de histéresis determina la fuerza coercitiva intrínseca. Los materiales magnéticos se describen generalmente por sus ciclos de histéresis en la que el eje vertical es el total de densidad de flujo B en lugar de la magnetización M . La densidad de flujo total incluye las contribuciones de ambas magnetizaciones y de la fuerza H . En la ingeniería eléctrica el rendimiento de los dispositivos está más relacionada con la densidad de flujo total. En el campo de la física de los materiales magnéticos, sin embargo, la magnetización M es una indicación de lo que el material hace en respuesta a un campo magnético y por lo

tanto ambos B y M son útiles.

2.3.2. Imanes permanentes para la levitación de repulsión

Cuando todas las fuerzas de recuperación son generadas por la repulsión entre los imanes permanentes [15] sigue habiendo al menos una dirección para la cual el cuerpo está en equilibrio inestable; el desplazamiento más pequeño en esta dirección da origen a una fuerza que tiende a aumentar el desplazamiento. La levitación completa sin ningún contacto mecánico se ha logrado por medio de una combinación de imanes permanentes y electroimanes.

En 1961 se describe un cojinete magnético en el que un árbol está soportado con rodamientos radiales de anillos permanentes de imanes y el apoyo o fijación axial se proporciona mediante electroimanes controlados. La fuerza de repulsión depende del material del imán, el área, la forma y el espesor de los imanes, la distancia entre la superficie a repeler y las dimensiones de las piezas de acero utilizadas. Aunque estos factores hacen que la predicción de la fuerza sea difícil, si se utilizan los mismos materiales y configuraciones, un uso correcto del método de similitud puede permitir que las fuerzas puedan ser estimadas para otros sistemas en los que todas las dimensiones y distancias llevan la misma relación para el cual los resultados experimentales están disponibles, ya que la distribución de magnetización y la polaridad en los imanes debe ser el mismo.

2.4. Levitación usando imanes superconductores

Hay dos formas en las que la superconductividad podría ser utilizada para obtener la levitación [15]. La primera es el llamado **Efecto Meissner**. Consiste en el rechazo del flujo magnético haciendo que el cuerpo superconductor se comporte como un cuerpo perfectamente diamagnético. El segundo es la **Fuerza de repulsión entre un imán superconductor en movimiento en una placa conductora o carril**; es el más práctico para ser aplicado en los vehículos; es el método propuesto originalmente por Powell y Danby en 1966. De una manera casi análoga al desarrollo de imanes permanentes que conducen al interés y a las posibilidades de las aplicaciones de transporte, los avances en los materiales superconductores han llevado a su consideración para vehículos de alta velocidad.

2.4.1. Propiedades de los superconductores

Los superconductores forman parte de una categoría de materiales a temperaturas cercanas a 0 K llamados superfluidos (Londres 1961). Se conocen dos tipos de superfluidos. Uno está representado por helio líquido (punto de ebullición 4,2 K) cuando se enfría a 2,19 K. El otro tipo está representado por el estado superconductor de electrones.

Del mismo modo que la carga eléctrica se transfiere en un superconductor, sin una diferencia

de tensión entre sus extremos, por lo que el helio puede pasar con facilidad a través de los capilares muy estrechos o grietas finas que sería intransitable para cualquier líquido ordinario. Además, el superfluido de helio permite una transferencia extremadamente fácil de calor que en ocasiones se ha descrito como “la superconductividad de calor”. Los materiales expuestos hasta ahora, que incluyen muchos de los elementos, son ideales para los superconductores.

Existen dos tipos de superconductores, los llamados blandos y duros. Difieren en la manera en que se transportan las corrientes eléctricas. En una corriente superconductora suave se realiza solo en una capa superficial delgada. En los superconductores duros los cuales son compuestos tales como los el vanadio y galio (VSGa) o niobio y estaño (NbSn) son la corriente que aparece para ser transportado por filamentos en el interior del material y el número de filamentos puede ser incrementada físicamente por el material de trabajo.

2.4.2. Principios de levitación superconductora

El primero es el efecto de Meissner [15] el cual es empleado para levitar los rotores de los giroscopios; el segundo utiliza las fuerzas de repulsión que surjan de la interacción entre un imán superconductor, y las corrientes parásitas inducidas en una lámina conductora como resultado del movimiento relativo entre los dos; este es el efecto que parece más práctico para su aplicación a vehículos de transporte de pasajeros.

a) Levitación con el efecto Meissner

Cuando un imán de barra se pone cerca de una superficie horizontal superconductor podemos considerar que el flujo puede ser comprimido en el espacio entre el imán y la superficie magnéticamente impermeable del superconductor. Siempre que la compresión de flujo no conduzca a la densidad del flujo crítico que se exceda, el imán flotará en la superficie superconductora en equilibrio estable en la dirección vertical. Si la superficie es grande como para ser considerado infinita en relación con el tamaño del imán será en equilibrio neutro en el plano horizontal.

b) Levitación por corrientes de Foucault inducidas por el movimiento de los imanes superconductores

La levitación magnética se basa en la repulsión inducida por un imán que viaja por encima de una superficie conductora. Los electroimanes convencionales o los imanes permanentes son también capaces de generar una levitación inducida en pequeñas distancias, pero son incapaces de producir campos magnéticos del tamaño y la intensidad necesaria para hacer levitar un vehículo de transporte de pasajeros. Los imanes superconductores, debido a sus campos magnéticos mayores, han hecho esto posible. Las principales características de la levitación electrodinámica pueden explicarse incluso con solo estos principios básicos. Si una bobina conductora de corriente se acelera a una altura constante por encima de un carril-guía experimenta una fuerza de sustentación en un principio proporcional al cuadrado de la velocidad pero con

el tiempo puede llegar a un valor límite. La fuerza de arrastre es proporcional a la velocidad, pero a continuación, pasa a través de un pico y disminuye inversamente como la velocidad. Las corrientes de Foucault inducidas se limitan esencialmente a una capa delgada cerca de la superficie de la lámina conductora. El arrastre electromagnético, a diferencia de la resistencia aerodinámica, disminuye con el aumento de la velocidad, esto es una característica notable de la levitación electrodinámica.

2.5. Levitación Inducida por corrientes de Foucault

En los años 70 la levitación magnética ganó mucha popularidad. Además también tomó popularidad; la idea que los motores de inducción lineal podrían utilizarse más allá de la propulsión de vehículos, llegando a conocerse como “el río magnético”. Un motor de inducción lineal de una sola cara puede ser diseñado para producir grandes fuerzas de levitación, además de su fuerza de traslación o de tracción normal como la velocidad lineal del motor con respecto a una placa de reacción de material compuesto, que consta de material conductor respaldado por material permeable, tal como el acero, ya que este aumenta la fuerza de repulsión.

2.5.1. Placas Rectangulares

Este es el ejemplo de placas rectangulares las cuales se emplean en algunas técnicas de levitación [15]. El comportamiento de la disposición de la figura 2.5.1 en la sección (A) es muy diferente de la de una placa verdaderamente circular. En la figura (B) el número de bloques se reduce a cuatro y hay una placa cuadrada de tamaño apropiado. Solo hay dos bobinas de excitación en esta disposición de manera que las mismas corrientes fluyen a través de las ranuras de los cuatro bloques, si las corrientes en cada ranura fueron devueltos por debajo de los bloques individuales en la forma de un anillo Gramme devanado figura (C), las corrientes en las ocho ranuras podrían ser controlados de forma independiente. El último paso de esta evolución es la de la figura (D) los bloques que llevan corrientes a lo largo de la dirección x se han alargado, si el sistema encuentra que es estable con las direcciones que muestran las corrientes en la disposición de la figura (E), esta es idéntica pero con la ventaja de que los dos bloques son ahora autónomos y se puede mover más cerca o más lejos para dar cabida a las placas de diferentes anchuras. Así como no hay resistencia al movimiento de un disco giratorio, tampoco hay ninguna resistencia al movimiento de la placa a lo largo de determinada dirección.

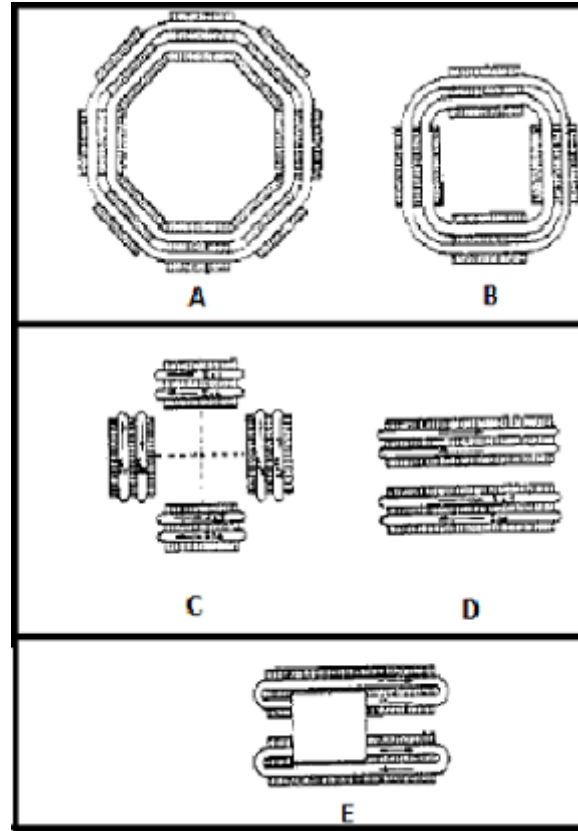


Figura 2.5.1: Evolución de las placas rectangulares.

La levitación estable de organismos con simetría esférica generalmente se obtiene más fácilmente que con placas planas [15]. La construcción de un levitador con esfera a frecuencias de energía es básicamente el mismo que en el caso de los discos. Se compone de dos bobinas concéntricas en una estructura de hierro; la bobina interna puede ser cortocircuitada, actuando así como un anillo de cortocircuito en lugar de ser alimentado desde una fuente de alimentación externa como se puede observar en la figura 2.5.2.

2.5.2. Levitación de Esferas y Cilindros

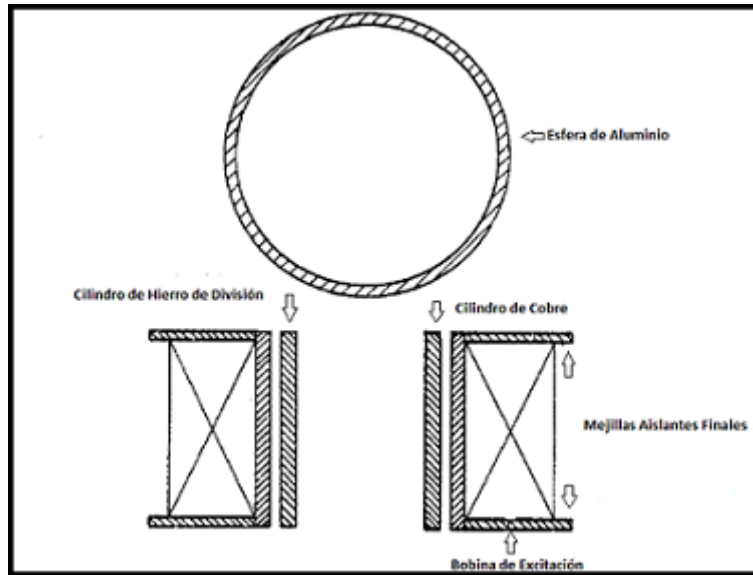


Figura 2.5.2: Levitación de esferas y cilindros .

La impedancia dinámica del conductor que se mueve, es por lo que cambia el patrón de flujo de fase y por lo cual la esfera se desplaza desde el centro y es finalmente expulsada. Esto ocurre en una dirección tal que la esfera parece rodar fuera del campo a lo largo de un plano horizontal invisible. El soporte de cilindros por sistemas de bobinas alargadas también es posible. Las esferas y los cilindros se comportan de una manera análoga a como lo hacen los discos y placas rectangulares tan lejos como sin resistencia al movimiento se refiere.

Las técnicas utilizadas en levitadores de frecuencia de potencia son a menudo útiles en sistemas de alta frecuencia. El uso de hierro en levitadores de frecuencia de potencia es el mismo que en cualquier máquina convencional, es decir, para mejorar los circuitos magnéticos y lo que conduce a una reducción sustancial de pérdidas. Para una esfera colocada en un campo que varía en el tiempo de forma sinusoidal uniforme, de una alta frecuencia, el campo debido a las corrientes inducidas de Foucault son equivalentes a la de un dipolo magnético alterno en el tiempo con el campo, que tiene una fase y la amplitud en función de la intensidad del campo de generación, en el radio de la esfera, su permeabilidad y conductividad.

2.6. Suspensión usando electroimanes de corriente continua

Una característica importante de la tecnología de suspensión con electroimanes de corriente continua es el potencial de las aplicaciones de los microcojinetes sin fricción, la eliminación de ruido y su fiabilidad parecen ser características importantes que contribuyen al éxito de este método en la aplicación para el transporte. Las combinaciones de los imanes permanentes con excitación controlada también aparecen técnicamente factible y podría dar lugar a una nueva

reducción de los requerimientos de energía.

2.6.1. Principio de la suspensión usando electroimanes DC controlados

Para lograr la suspensión estable es necesario idear un medio para regular la corriente en un electroimán utilizando realimentación de la posición del objeto a ser suspendido. El efecto de esto es modificar las características de fuerza-distancia tal que la corriente y la fuerza de atracción disminuye a medida que el espacio de aire disminuye y viceversa. Si la bola de acero que se suspende en este caso es atraída hacia el imán, la cantidad de luz que incide en la fotocélula disminuye, con lo que a su vez disminuye la corriente y por lo tanto la fuerza que actúa contra la gravedad.

2.6.2. Naturaleza del problema de control en una suspensión de un solo imán

La fuerza de atracción entre los cuerpos magnetizados está dada por:

$$Fm = \frac{B^2}{2\mu_0} x \text{ área} \quad (2.6.1)$$

En el caso de los electroimanes, como aquellos para los sistemas de suspensión que operan con un espacio de aire, la densidad de flujo es directamente proporcional a los giros de Amperios NI e inversamente proporcional a la longitud. Por lo tanto la ecuación (2.0.16) puede ser reescrita como.

$$Fm = \frac{\mu_0}{2} \left(\frac{NI}{g} \right)^2 x \text{ área} \quad (2.6.2)$$

A partir de esta ecuación, se observa que la relación fuerza-distancia del sistema es un regulador de posición altamente no lineal. Se supone en primer lugar que el cambio en la fuerza de atracción está dada por una función lineal y por los cambios actuales. Por lo cual la ecuación lineal es.

$$f = k_1 z + k_2 i \quad (2.6.3)$$

Para los pequeños cambios sobre la posición de equilibrio donde k_1 es la fuerza por la corriente constante y k_2 es la fuerza por amperio a una distancia constante. Las constantes k_1 y k_2 pueden ser determinadas experimentalmente para un imán dado.

$$mz = -f = -(-k_1 z + k_2 i) \quad (2.6.4)$$

Donde m es la masa del cuerpo suspendido.

La relación entre la corriente del imán y el voltaje es:

$$R_i + L \frac{di}{dt} = V \quad (2.6.5)$$

En la transformada de Laplace presentan las ecuaciones de notación (2.0.19) y (2.0.20) se convierten en:

$$(s^2 - k_1/m) Z(s) = \frac{k_2}{m} I(s) \quad (2.6.6)$$

y

$$I(s) = \frac{k}{1 + sTm} V(s) \quad (2.6.7)$$

De la combinación de las dos ecuaciones se obtiene:

$$\frac{Z}{V}(s) = \frac{k_1 k_2}{m(1 + sTm)(s^2 - k_1/m)} \quad (2.6.8)$$

Capítulo 3

Diseño y análisis de un microcojinete magnético aplicado a un micromotor de inducción electrostático

3.1. Micromotores electrostáticos

Los micromotores MEMS son dispositivos que se asemejan a sus equivalentes en la escala macro, utilizan una energía eléctrica, mecánica o química, y la convierten en movimiento (energía cinética). El motor muchas veces incluye un sistema de engranajes que permite controlar el par o la dirección de la fuerza mecánica resultante. Este es conocido en los motores convencionales como caja de engranajes. Los micromotores MEMS deben ser construidos sobre un sistema de soporte que les permita tener alta estabilidad, baja fricción, y menor desgaste al uso.

Para lograr estas características, este tipo de actuadores se pueden construir sobre soportes de esferas (“ball bearing”) que les ofrece buena estabilidad, menor fricción y una mayor durabilidad al desgaste por el uso, ya que otros sistemas que existen en el mercado como los de los motores convencionales basados en eje central y los de soporte lubricado por gas que no ofrecen estas ventajas cuando se realiza escalamiento a nivel MEMS [10].

3.1.1. Tipos de Micromotores

Los tipos de micromotores MEMS existentes pueden clasificarse como eléctricos, químicos y mecánicos. Entre las aplicaciones que se contemplan para este tipo de dispositivos se tienen micro turbinas de bombeo, dispositivos médicos y quirúrgicos, micro robótica, entre otros. Sin embargo los micromotores MEMS aún están en su mayoría en procesos experimentales lo que hace este campo uno de los que más está siendo investigado actualmente.

Los micromotores son clasificados como MEMS de potencia ya que convierten la energía eléctrica en mecánica; cada micromotor tiene sus ventajas e inconvenientes, por lo tanto la elección del tipo depende de la aplicación a la que se le vaya a destinar. En función del movimiento que vayan a ejecutar se pueden clasificar como lineales o rotativos, en función del principio físico que se aplique se pueden clasificar como micromotores electrostáticos, electromagnéticos, ultrasónicos, piezoeléctricos y biológicos. Según sea el flujo inductor se pueden considerar de

flujo axial o de flujo radial, según la velocidad de giro relativa entre el flujo estatórico, el rotor se dividen en micromotores síncronos o asíncronos, siendo los asíncronos los más usados ya que no necesitan ningún tipo de control sobre su velocidad.

Los micromotores electrostáticos pueden ser clasificados como de capacidad variable, de inducción electrostática. También existen otros tipos de dispositivos de gran interés como son los microgeneradores, entre ellos, los generadores piezoeléctricos que están basados en la producción de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de las fuentes de vibración, ruido ambiental y ultrasónicos.

En el artículo [19] se consideran las diversas características de micromotores eléctricos, las relaciones entre sus características y un intento de organizar el proceso por el que los micromotores pueden ser diseñados de forma exitosa. Se presta especial atención a las características electromecánicas. Se resalta el carácter interdisciplinario de la física detrás del análisis y diseño del micromotor, se refleja la interdependencia de diseño, fabricación y el rendimiento del mismo.

En este artículo [31] se presenta una breve reseña de los mecanismos y métodos de solución en micromotores electrostáticos que son comúnmente empleados. Se centra en la introducción de los modos de fallo con los métodos numéricos y experimentales, así como los métodos empleados recientemente para reducir los fracasos y el desarrollo en el futuro. Además, se ilustra la investigación sobre la dinámica de contacto entre el rotor y el eje del microcojinete y los efectos de los microcojinetes lubricados por gas que disminuyen la posibilidad de la fricción, del contacto, y el desgaste en los micromotores electrostáticos.

Los motores eléctricos se caracterizan por convertir energía eléctrica en energía cinética mediante la acción de campos magnéticos inducidos en bobinas, mediante la Ley de Lorentz que es la fuerza ejercida por un campo electromagnético que recibe una partícula cargada o una corriente eléctrica.

$$F = q(E + v \times B) \quad (3.1.1)$$

Donde F es la fuerza generada, q representa la carga puntual de la partícula, E representa el campo eléctrico y B es la densidad de flujo magnético. Dado que en el caso de un motor magnético se tiene un campo magnético únicamente y al haber muchas partículas fluyendo, la fuerza resultante se puede representar de la siguiente manera:

$$F = p(v \times B) \quad (3.1.2)$$

$$J = p v \quad (3.1.3)$$

$$F = J \times B \quad (3.1.4)$$

Aquí se tiene que J representa la densidad de carga eléctrica, por lo que la fuerza resultante es el producto cruz de J por la densidad de flujo magnético B . La eficiencia de un motor eléctrico viene representada por la siguiente relación:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} \quad (3.1.5)$$

Donde P_m es la potencia mecánica producida por el motor eléctrico, esta se obtiene como el producto del torque por la velocidad angular y P_e es la potencia eléctrica equivalente a la diferencia de potencial por la corriente eléctrica.

Los motores eléctricos se caracterizan por tener un rotor y un estator, el rotor es la parte que realiza el movimiento y el trabajo mecánico, mientras que el estator es la parte que permanece inmóvil y es a donde llega la alimentación eléctrica. Para efectos de la generación de un campo magnético se recurre a la utilización de bobinas o imanes, que se pueden utilizar en combinaciones de solo bobinas, o de imanes y bobinas en el estator y en el rotor. Los motores eléctricos pueden funcionar con dos tipos de corriente, alterna o directa, dependiendo de la aplicación en la que se desee implementarlos, ya que el costo y las ventajas pueden variar según el contexto en el que se utilicen.

Los micromotores MEMS de manera análoga, pueden funcionar con los mismos principios expuestos en los diferentes tipos de motores convencionales, aunque es necesario recalcar que se debe tener en cuenta de manera importante los efectos de escalamiento, pues la eficiencia se ve afectada de varias maneras. Los principios de funcionamiento de un micromotor MEMS son diferentes a los de motores convencionales de escala macro, dado que los campos eléctricos se vuelven predominantes sobre los campos magnéticos, efecto contrario a lo que ocurre en la macro escala. La Ley de Paschen establece que un campo eléctrico con intensidad E define el funcionamiento de un motor de inducción. La Ley de Paschen [21] puede expresarse de la siguiente manera:

$$E_B = 100 \frac{365p}{1,18 + \ln(pd)} \quad (V/cm \text{ Torr}) \quad (3.1.6)$$

Donde E_B es el campo eléctrico de ruptura, p representa la presión en Torr y d es la distancia en cm.

3.1.2. Análisis de los esfuerzos tangenciales y normales.

Para realizar las simulaciones de la fuerza tangencial y normal se tomó como referencia el artículo [21], el cual presenta el análisis, el diseño, la fabricación, además de las pruebas de un micromotor electrostático de flujo axial. El micromotor es un motor de 6 fases con 131 pares

de polos distribuidos en un estator que tiene un diámetro exterior de 4 mm. El espacio de aire axial es de $3 \mu\text{m}$. Con un estator de excitación 90 V, aplicada a una frecuencia de deslizamiento 300 kHz, el motor produce un par de torsión de $2 \mu\text{Nm}$.

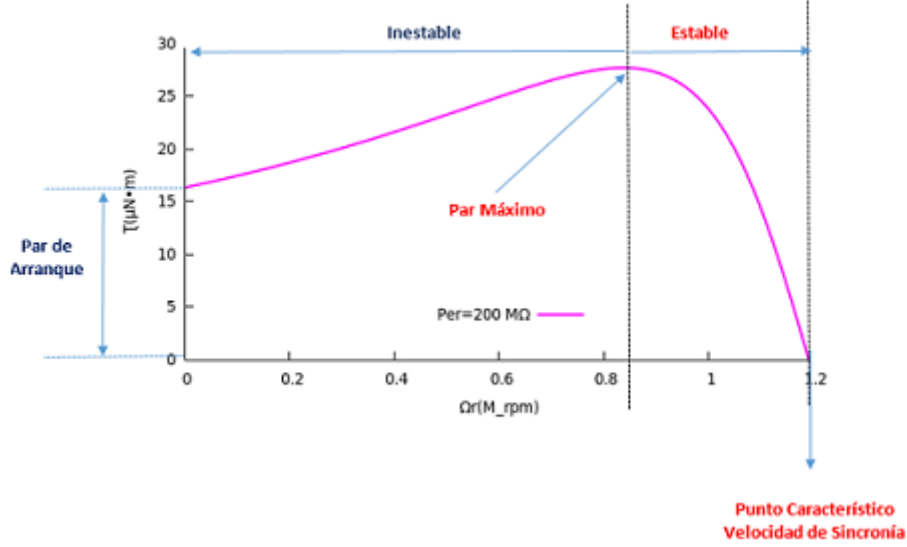


Figura 3.1.1: Torque vs velocidad del rotor 200 MΩ.

La gráfica anterior hace referencia algunas partes a tener en cuenta en las gráficas de la fuerza tangencial. El eje horizontal representa el crecimiento de la velocidad de rotación, mientras que el vertical, el crecimiento de la potencia, par motor. La zona inestable que se presenta al lado izquierdo de la gráfica es aquella que presenta una disminución del par conforme el motor disminuye su velocidad, lo contrario ocurre con la zona estable la cual presenta un aumento del par conforme el motor disminuye su velocidad. El par de arranque se ubica en el eje y, este es la fuerza que toma el motor para poder ponerse en marcha. Inicialmente se toman los valores de referencia del mismo artículo para realizar las gráficas de las dos fuerzas, esto con el fin de verificar los resultados obtenidos en [21].

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Amplitud de tensión del estator	V	285	V
Frecuencia de excitación del estator	f	2,6	MHz
Periodicidad en el estator	m	131	–
Espacio de aire entre estator y rotor	G	3	μm
Resistencia de la capa del conductor	Pres	200	MΩ
Velocidad síncrona del rotor	Ω	1.2×10^6	rpm
Grosor del aislante del rotor	Ari	10	μm
Radio interno del conductor del rotor	Ri	1	mm
Radio externo del conductor del rotor	Ro	2	mm
Resistividad del aislante del rotor	Pri	1.0×10^{14}	$\Omega\text{-cm}$

Tabla 3.1: Valores tomados para calcular el par y la fuerza normal.

Para realizar el cálculo de la fuerza tangencial y la fuerza normal se utilizaron las siguientes

formulas, tomando como base el artículo [21] para la fuerza tangencial:

$$\tau = \int_{Ri}^{Ro} r f_y, 2\pi r dr = \varepsilon g \pi V^2 \int_{Ri}^{Ro} \alpha(r) \beta(r) \chi(r) dr \quad (3.1.7)$$

donde:

$$\alpha(r) = \frac{\Gamma(r)}{1 + \Gamma(r)^2} \quad (3.1.8)$$

$$\beta(r) = \frac{\varepsilon g}{\varepsilon_{eff}(r) \sinh\left(\frac{mG}{r}\right)} \quad (3.1.9)$$

y

$$\chi(r) = \frac{m^2}{\sinh\left(\frac{m}{r}G\right)} \quad (3.1.10)$$

La fuerza normal esta dada por la siguiente fórmula:

$$\tau = \int_{Ri}^{Ro} f_z, 2\pi .r dr = \varepsilon g 2\pi \int_{Ri}^{Ro} \alpha(r)^2 \beta(r) dr \quad (3.1.11)$$

donde

$$\alpha(r)^2 = \left[\frac{\frac{m}{r} V}{2 \sinh\left(\frac{m}{r}G\right)} \right]^2 \quad (3.1.12)$$

y

$$\beta(r) = 1 + \Gamma^2 \cdot \frac{\left[\left(\frac{\varepsilon g}{\varepsilon_{eff}(r) \cdot \sinh\left(\frac{m}{r}G\right)} \right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{\varepsilon g}{\varepsilon_{eff}(r) \cdot \sinh\left(\frac{m}{r}G\right)} \right) \cdot \cosh\left(\frac{m}{r}G\right) + 1 \right]}{1 + \Gamma^2} \quad (3.1.13)$$

Con los datos obtenidos al emplear las dos fórmulas anteriores se realizó la siguiente gráfica para calcular el Par.

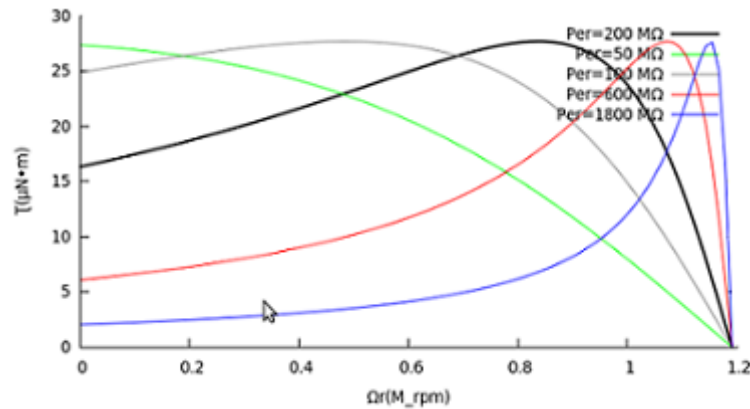


Figura 3.1.2: Análisis de sensibilidad del par frente a la resistencia rotatoria del rotor.

Para la gráfica anterior se tomaron 5 valores diferentes, en el valor de la resistencia rotatoria (200 MΩ, 50 MΩ, 100 MΩ, 600 MΩ, 1800 MΩ), estos valores también fueron tomados como referencia del artículo antes mencionado. Se observa que los valores del par máximo para los 5 valores tomados son iguales a 27,4077 μNm, por otra parte también se observa que los que presentan menor par de arranque son los valores de resistencia mayor 600 MΩ y 1800 MΩ, el primero con 6,10 μNm y el segundo con 2,02 μNm. El valor que se ha tomado como referencia es el de 200 MΩ (color negro), éste presenta un valor de 16,32 μNm, éste se encuentra con un par de arranque ubicado en la mitad de las otras cuatro resistencia. Ahora bien las resistencias con valores más pequeños 50 MΩ y 100 MΩ presentan un par de arranque mayor el primero con 27,30 μNm y el segundo con 25,04 μNm. Se observa además que todos los valores de las resistencias presentan una caída al hacia el punto característico de la velocidad de sincronía 1,20 Mrpm. Por otro lado para verificar el comportamiento de la amplitud de tensión del estator, el espacio del aire entre el estator y el rotor, los radios y el grosor del aislante del rotor, se tomaron los siguientes valores:

Parámetro	Símbolo	1	2	3	4	Unidad
Amplitud de tensión del estator	V	25	50	100	150	V
Espacio de aire entre estator y rotor	G	2,0	2,5	3,0	3,5	μm
Grosor del aislante del rotor	Ari	5,0	10	30	40	μm
Radio interno del conductor del rotor	Ri	Fijo	Fijo	Fijo	Fijo	mm
Radio externo del conductor del rotor	Ro	2,0	1,5	2,5	3,0	mm

Tabla 3.2: Análisis de sensibilidad de la fuerza tangencial.

Al variar la Amplitud de tensión del estator (V) se observa como el valor del par de arranque aumenta a medida que se incrementa este valor, llegando a tomar un valor de 1,45 μNm hasta 39,35 μNm, al igual se observa que el valor máximo también va aumentando a medida que la tensión aumenta, tomando un valor máximo con V=150 voltios de 60,18 μNm.

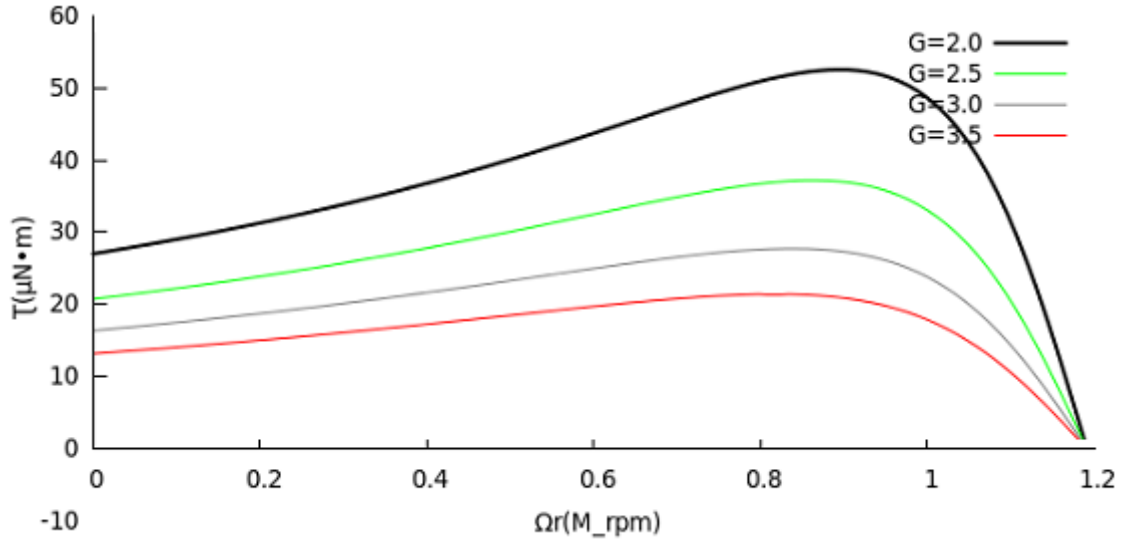


Figura 3.1.3: Análisis de sensibilidad del par frente al gap.

En la gráfica 3.1.3 se observa que al incrementar el valor del espacio de aire entre estator y rotor (G) el valor del par de arranque disminuye, cuando el G toma un valor de 2,0 el par de arranque toma un valor de 14,14 $\mu N m$ y al tomar el G un valor mayor en este caso de 3,5 presenta un par de arranque menor de 6,70 $\mu N m$.

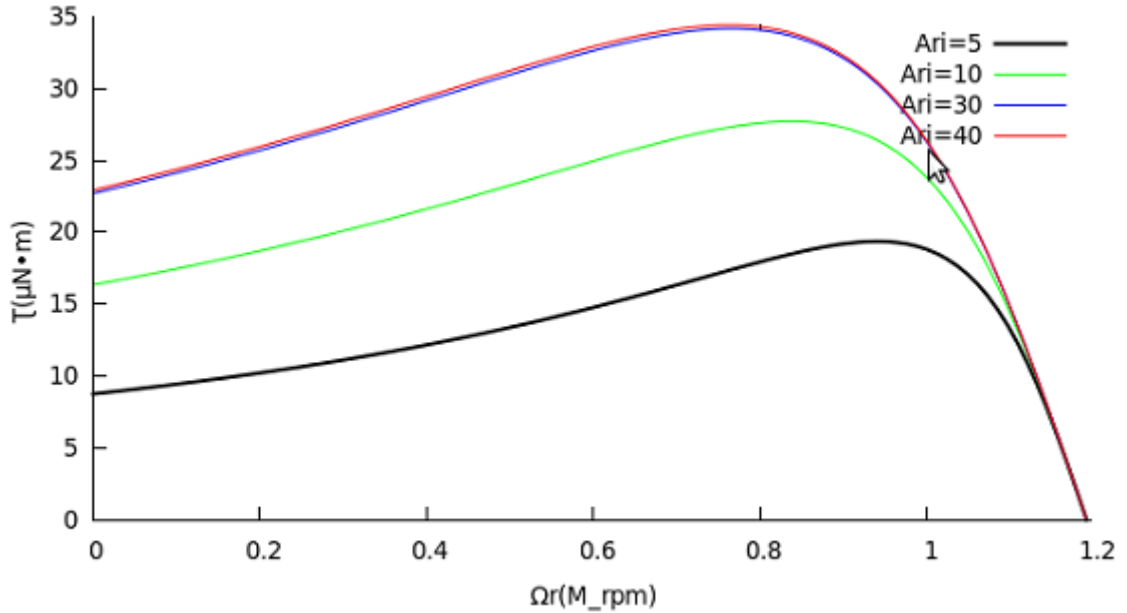


Figura 3.1.4: Análisis de sensibilidad del par frente al grosor del aislante.

En la gráfica 3.1.4 que representa el grosor del aislante del rotor (Ari) se observa que el valor máximo se desplaza hacia la izquierda de la gráfica a medida que aumenta el grosor del aislante. En cuanto al par de arranque se observa que va en aumento de acuerdo con el valor

aplicado, tomando un par máximo de arranque de 23,06 μNm con el grosor de 40 μm y con 5,0 μm toma un par de arranque mínimo de 8,75 μNm .

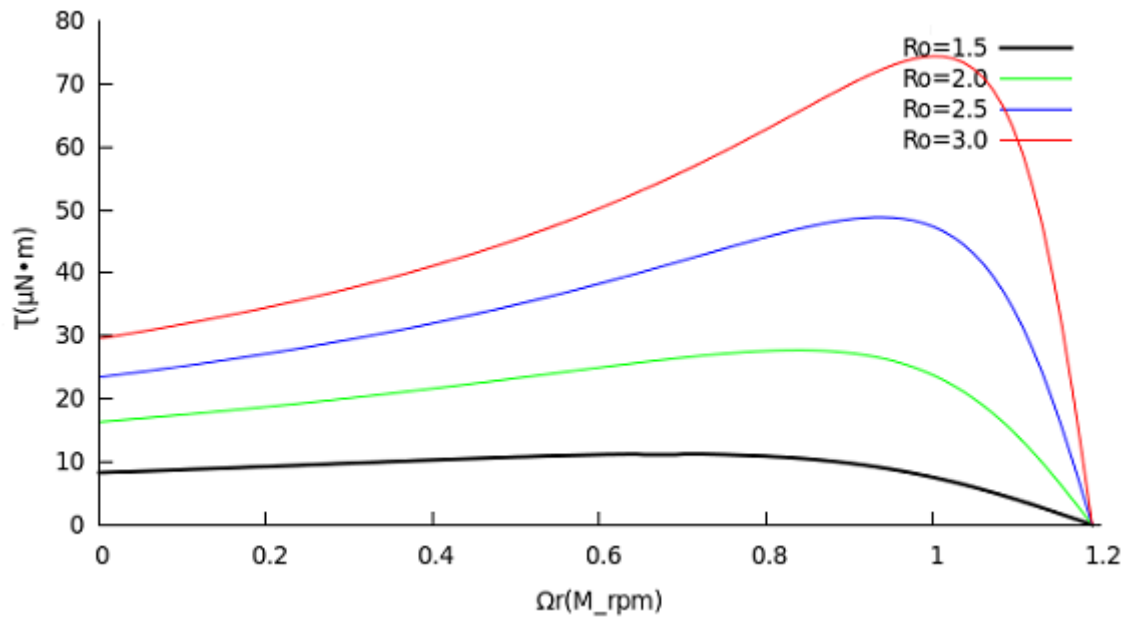


Figura 3.1.5: Análisis de sensibilidad del par frente al radio externo.

En la gráfica 3.1.5 se observa que a medida que se incrementa el valor del radio externo del conductor del rotor (R_o) se incrementa igualmente tanto el par de arranque como el valor máximo llegando a tomar este último un valor de 74,52 μNm , con un par de arranque de 29,77 μNm , al igual toma un valor mínimo de arranque de 8,26 μNm y un valor máximo de 10,84 μNm .

Parámetro	Símbolo	1	2	3	4	Unidad
Amplitud de tensión del estator	V	25	50	100	150	V
Espacio de aire entre estator y rotor	G	2,0	2,5	3,0	3,5	μm
Grosor del aislante del rotor	Ari	5,0	10	30	40	μm
Radio interno del conductor del rotor	Ri	Fijo	Fijo	Fijo	Fijo	mm
Radio externo del conductor del rotor	Ro	2,0	1,5	2,5	3,0	mm

Tabla 3.3: Análisis de sensibilidad de la fuerza normal.

En la siguiente gráfica al modificar la amplitud de tensión del estator se observa que a partir de 0,19 μN presenta una fuerza de atracción que se incrementa a medida que la amplitud de tensión del estator aumenta, inicialmente con un valor de 25 V presenta una fuerza de atracción que toma un valor de -0,91 μN , por otro lado al tomar un valor de 150 V su fuerza de atracción es mayor con un -5,47 μN .

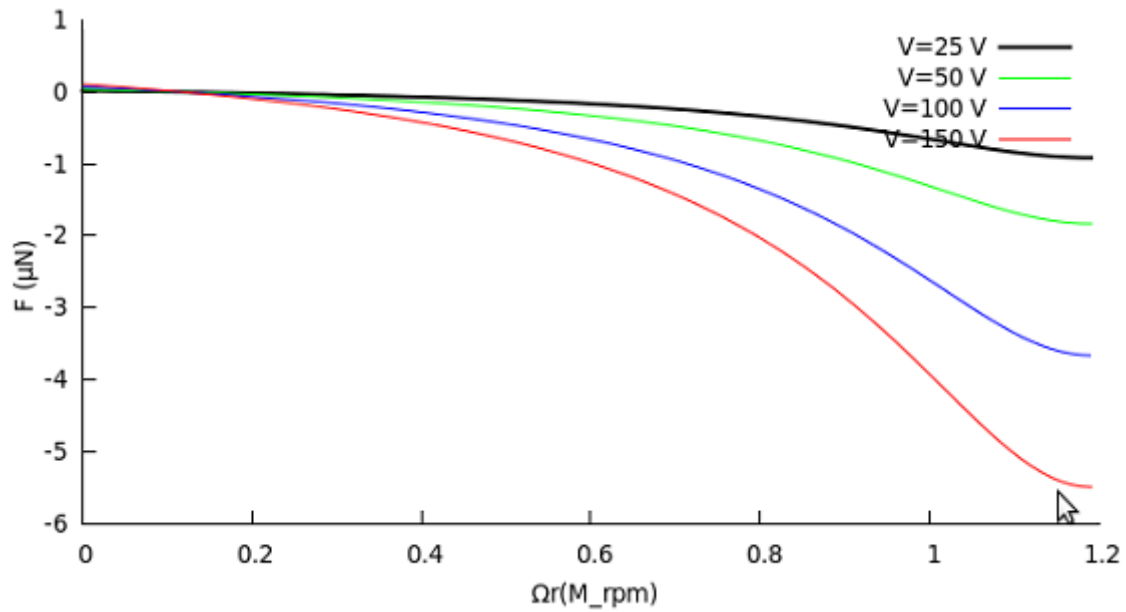


Figura 3.1.6: Análisis de sensibilidad de la fuerza normal frente a la amplitud de tensión del estator.

En cuanto a lo que se refiere al espacio de aire entre estator y rotor se observa que inicialmente presentan una fuerza de repulsión solamente las que tienen mínimos valores $2,0\text{ }\mu\text{m}$ y $2,5\text{ }\mu\text{m}$, la primera toma fuerza de atracción a partir de $0,218\text{ }\mu\text{N}$, la segunda presenta fuerza de atracción a partir de $0,34\text{ }\mu\text{N}$ a medida que aumenta el gap disminuye la fuerza de atracción.

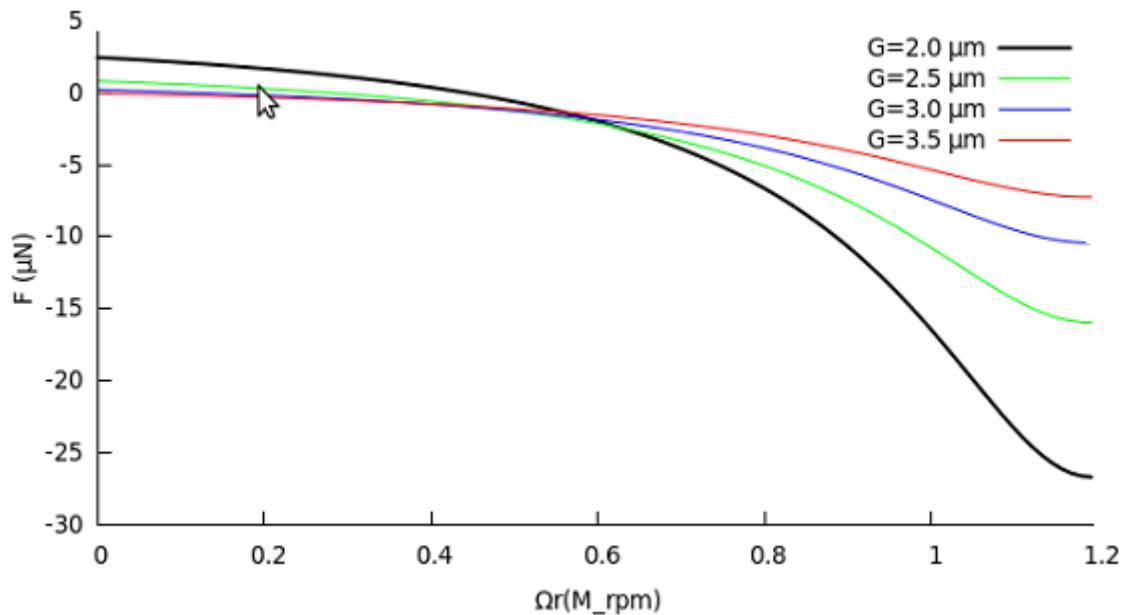


Figura 3.1.7: Análisis de sensibilidad de la fuerza normal frente al gap.

Ahora bien, cuando los valores más altos son aplicados al grosor del aislante del rotor estos presentan una fuerza de atracción igual de $-12,40\text{ }\mu\text{N}$, en cuanto a los valores de $10\text{ }\mu\text{m}$ y $5,0$

μm , estos toman valores de $-10,45 \mu\text{N}$ y $-7,58 \mu\text{N}$, respectivamente.

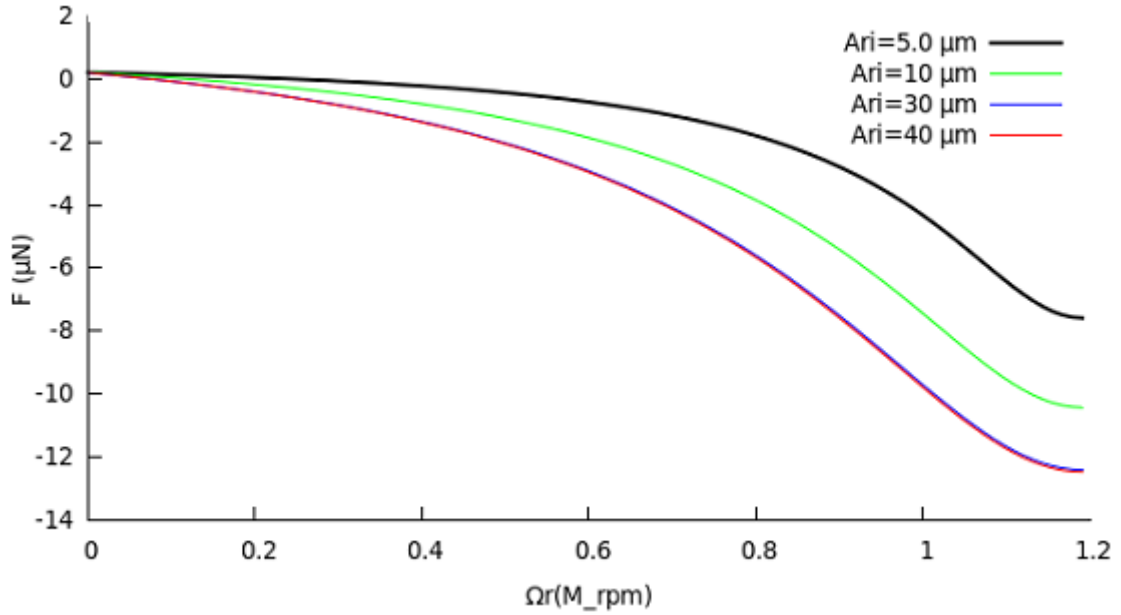


Figura 3.1.8: Análisis de sensibilidad de la fuerza normal frente al grosor del aislante.

Inicialmente todas las gráficas presentan una fuerza de repulsión a excepción del valor de $5,0 \text{ mm}$ del radio externo del conductor del rotor que presenta una fuerza de atracción constante inicialmente con $-0,06 \mu\text{N}$ y finalizando con $-10,68 \mu\text{N}$, por otro lado la que presenta mayor fuerza de atracción es la de radio $3,0 \text{ mm}$ con $-61,73 \mu\text{N}$.

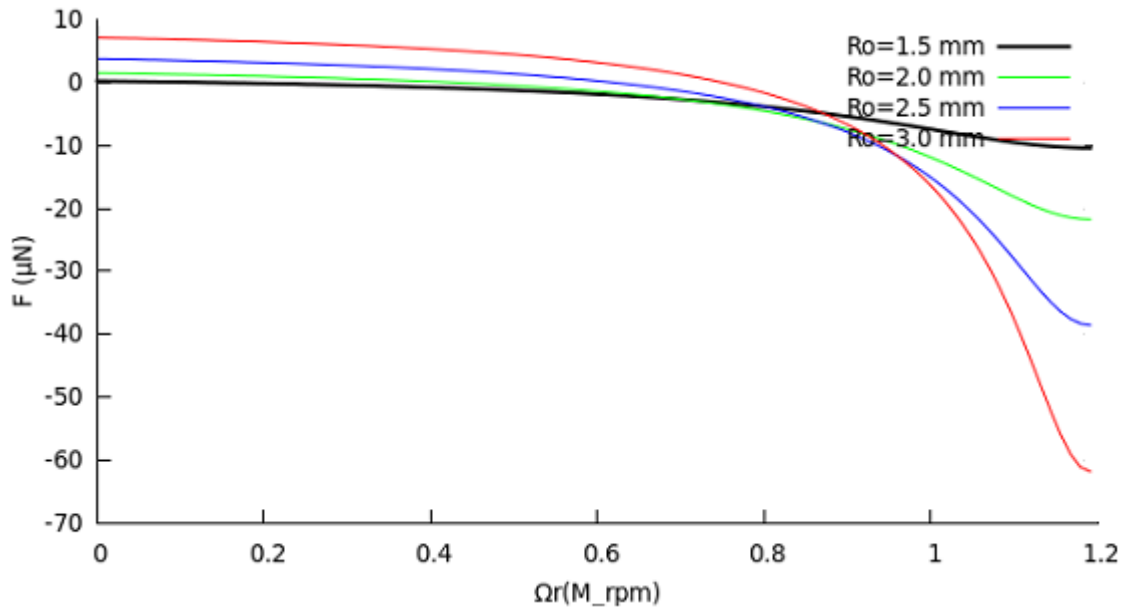


Figura 3.1.9: Análisis de sensibilidad de la fuerza normal frente al radio externo.

Los algoritmos utilizados para el cálculo de los esfuerzos viene reflejados en la figura 3.1 y

en la figura 3.2.

Algoritmo 3.1 Código scilab de la fuerza normal .

```

14
15 Eg=rdv; //Permitividad del espacio del aire
16 V=300; //Voltaje //Voltios
17 m=.131; //m.Periodicidad del estator
18 G=3*m; //grosor del espacio del aire //micrometros.um
19 Ro=2*10^-3*m; //radio externo del conductor del rotor //milimetros
20 Ri=1*10^-3*m; //Rdicos interno del conductor del rotor //milimetros
21 Ari=10*m; //Grosor del aislante del rotor dado en micrometros
22 Eri=3.9*rdv; //permitividad del aislante del rotor
23 Pri=1.0*10^14*10^-2; //Resistividad del aislante del rotor
24 Pres=200*10^6; //resistencia de la capa del conuctor
25 gm=0; //Velocidad sincrona del rotor
26 fe=2.6*10^6; //frecuencia de excitación del estator
27
28 function y=fn(r)
29
30 .....
31 ..... Eeff=Eg*cosh((m*G)/r)+Eri*cosh((m/r)*Ari);
32 ..... Ceff=(m/r)/Pres+(cosh((m/r)*Ari))/Pri;
33 .....
34 ..... We=(2*pi)*fe;
35 ..... S=(We-((m/r)*(r*gm)))/We;
36 .....
37 ..... tR= Eeff/Ceff;
38 ..... T=tR*S*We;
39 .....
40 ..... a=(m/r*V)/(2*sinh(m/r*G))^2;
41 ..... b=(1+T^2)*((Eg/Eeff*sinh(m/r*G))^2-2*(Eg/Eeff*sinh(m/r*G))*cosh(m/r*G)+1)/(1+T^2);
42 .....
43 ..... y=a*b;
44 .....
45 endfunction

```

Algoritmo 3.2 Código scilab de la fuerza tangencial .

```

9 m=10^-6; //micras
10 rdv=8.8541878176*10^-12;
11 Eg=rdv; //Permitividad del espacio del aire
12 V=285; //Voltaje //Voltios
13 //V=300; //Voltaje //Voltios
14 ml=.131; //m.Periodicidad del estator
15 G=3*m; //grosor del espacio del aire //micrometros.um
16 Ro=2*10^-3*m; //radio externo del conductor del rotor //milimetro
17 Ri=1*10^-3*m; //Rdicos interno del conductor del rotor //milimetro
18 Ari=10*m; //Grosor del aislante del rotor dado en micrometros
19 Eri=3.9*rdv; //permitividad del aislante del rotor
20 Pri=1.0*10^14*10^-2; //Resistividad del aislante del rotor
21 Pres=200*10^6; //resistencia de la capa del conuctor
22 gm=0; //Velocidad angular del rotor en rad/seg
23 fe=2.6*10^6; //frecuencia de excitación del estator
24 We=(2*pi)*fe;
25 We_Sin=(2*pi*fe)/ml;
26 We_sinl=60*fe/ml;
27
28 function y =ft(r)
29
30 ...
31 ... We=(2*pi)*fe;
32 ... S=(We-((m/r)*(r*gm)))/We;
33 ... S=(We-m*gm)/We;
34 ... Eeff=(Eg*(cosh((ml/r)*G)))+(Eri*(cosh((ml/r)*Ari)));
35 ... Ceff=((ml/r)/Pres)+(cosh((ml/r)*Ari))/Pri;
36 ...
37 ... tR= Eeff/Ceff;
38 ... T=tR*S*We;
39 ...
40

```

3.2. Topologías de los microcojinetes magnéticos

Se debe de tener en cuenta que los microcojinetes magnéticos presentan la misma clasificación que los cojinetes comunes, lo único que la diferencia de ellos son las medidas de los mismos las cuales se efectúan a escala micro. Por la dirección del esfuerzo que soportan se clasifican los microcojinetes en:

- * Los microcojinetes radiales impiden el desplazamiento en la dirección del radio
- * Los microcojinetes axiales impiden el deslizamiento en la dirección del eje
- * Los microcojinetes mixtos hacen al mismo tiempo el efecto de los microcojinetes radiales y axiales

3.2.1. Microcojinetes Axiales

Los microcojinetes axiales están diseñados para soportar cargas de empuje (axiales) y ofrecen resistencia a cargas de choque empleadas en una gran variedad de aplicaciones.

3.2.2. Microcojinetes Radiales

Estos soportan cargas que se encuentran, principalmente, en dirección perpendicular al eje.

3.2.3. Microcojinetes Magnéticos Permanentes

Un microcojinete magnético es un microcojinete que sostiene una carga utilizando levitación magnética. Los microcojinetes magnéticos permiten sostener partes móviles sin tener contacto físico con ellas. Por ejemplo, son capaces de levitar a un eje que rota y permitir movimientos relativos con muy baja fricción y sin desgaste mecánico. Los microcojinetes magnéticos son el tipo de microcojinete que puede soportar velocidades muy altas y no se conoce que posean una velocidad máxima límite. Existen dos tipos de microcojinetes magnéticos como son los pasivo y los activos.

Los microcojinetes Pasivos utilizan imanes permanentes y, por lo tanto, no requieren de potencia eléctrica, pero son difíciles de diseñar a causa de las limitaciones que resultan del teorema de Earnshaw. Las técnicas que utilizan materiales diamagnéticos se encuentran poco desarrolladas y dependen en gran medida de las características del material. En cuanto a los microcojinetes Activos, usan electroimanes que requieren del suministro continuo de potencia eléctrica y un sistema de control activo para mantener estable a la carga. Los microcojinetes magnéticos por lo general requieren de un rodamiento de back-up en caso de fallo del sistema de potencia o del sistema de control, es importante mencionar que estos microcojinetes son los más utilizados en el momento.

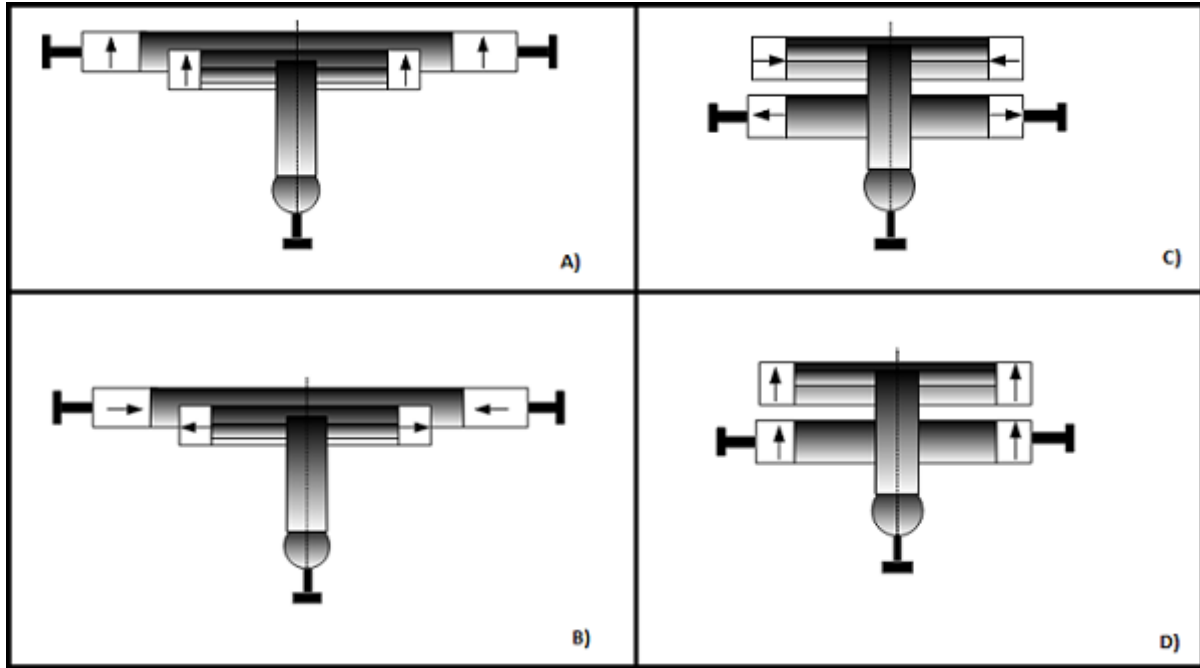


Figura 3.2.1: Topologías de los microcojinetes magnéticos permanentes radiales .

La figura 3.2.1 muestran un rotor vertical con un rodamiento de bola en la parte inferior y un microcojinete magnético permanente en la parte alta, en la figura A; se observa además que presenta dos imanes permanentes, uno interno y otro externo que se encuentra anclado.

En cuanto a la figura B se observa la misma arquitectura anterior, con la diferencia de que se observa cómo se genera un campo de atracción entre los dos imanes. Tanto la figura A como la B presentan fuerza de repulsión. La figura C por su parte presenta un diseño diferente ya que un imán se encuentra en la parte superior del otro; el primero se encuentra anclado, además presenta una fuerza de atracción. En lo que refiere a la figura D, esta representa la misma estructura que la anterior con diferencia que los imanes se encuentran ubicados en el mismo sentido.

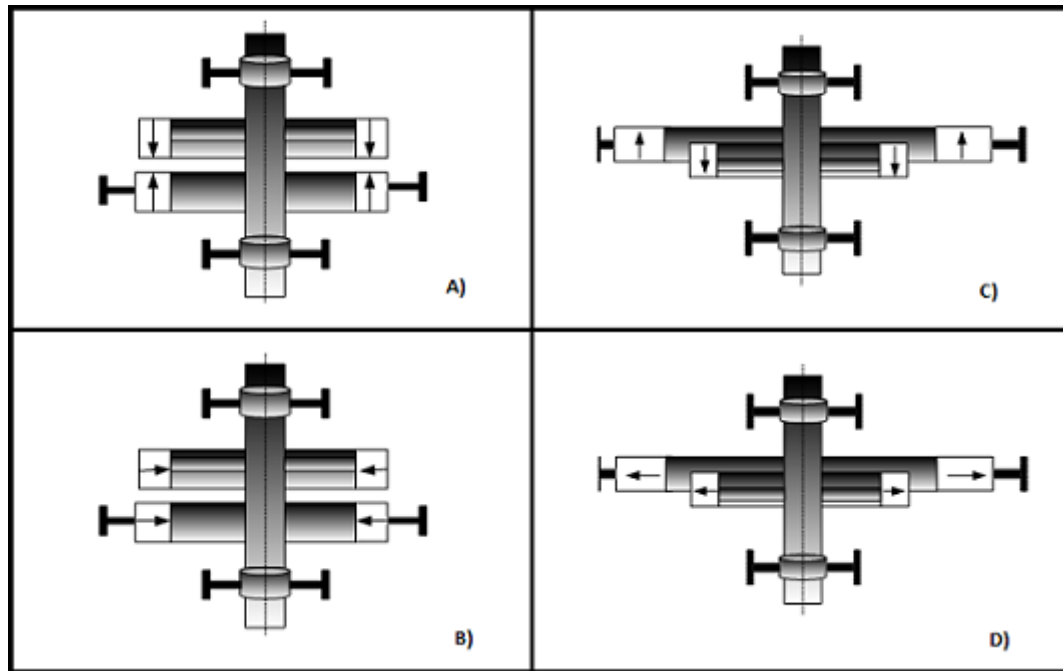


Figura 3.2.2: Topologías de los microcojinetes magnéticos permanentes .

En la figura 3.2.2 se representan los microcojinetes magnéticos permanentes axiales con carga de atracción; las figuras A y B presentan microcojinetes magnéticos con fuerza de atracción y con orientación de los imanes en el mismo sentido; las figuras C y D presentan los microcojinetes magnéticos con dos imanes, uno de ellos anclado y con diferentes orientaciones.

3.3. Diseño propuesto

El diseño propuesto N.1 empleado para realizar el trabajo es un microcojinete magnético asimétrico; este se ha obtenido después de un riguroso estudio de los tipos de microcojinetes magnéticos que se encuentran actualmente en el mercado. Por sus características que se ajustan a las necesidades del estudio se ha seleccionado el tipo de microcojinete que se muestra en la figura 3.3.1.

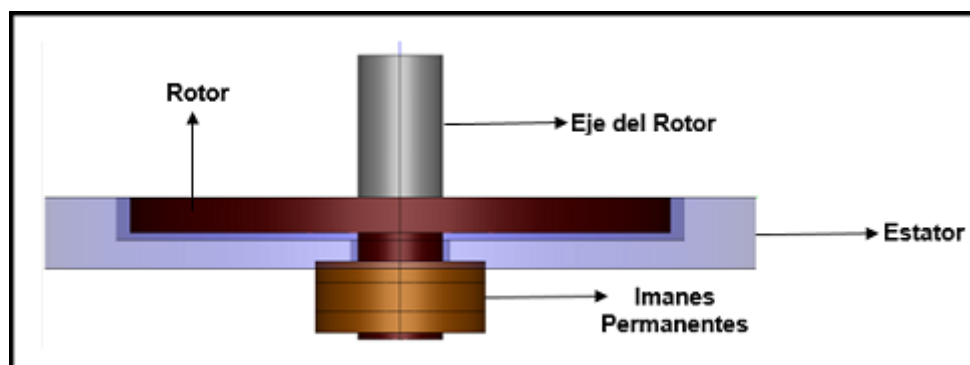


Figura 3.3.1: Diseño N.1 Microcojinete magnético asimétrico .

Este microcojinete magnético presenta un rotor y su respectivo eje, el estator y una serie de imanes permanentes en la parte inferior.

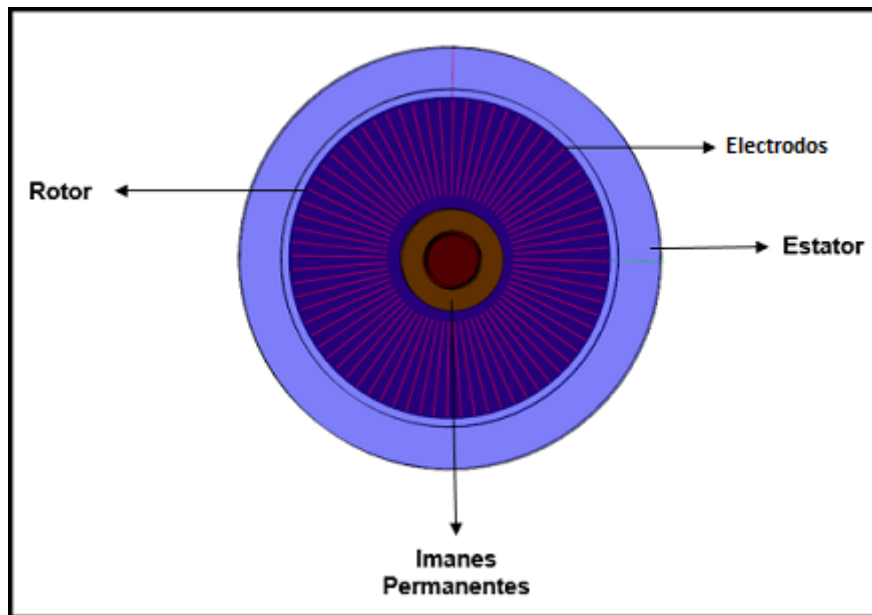


Figura 3.3.2: Diseño N.1 Vista superior del microcojinete magnético .

La figura 3.3.2 presenta una visión superior del microcojinete magnético, se puede observar los electrodos que se encuentran ubicados en el estator, además de los imanes permanentes.

El diseño propuesto N.2 presenta las mismas características que el microcojinete anterior, lo único que lo diferencia es que es un microcojinete magnético simétrico. Ver figura 3.3.3.

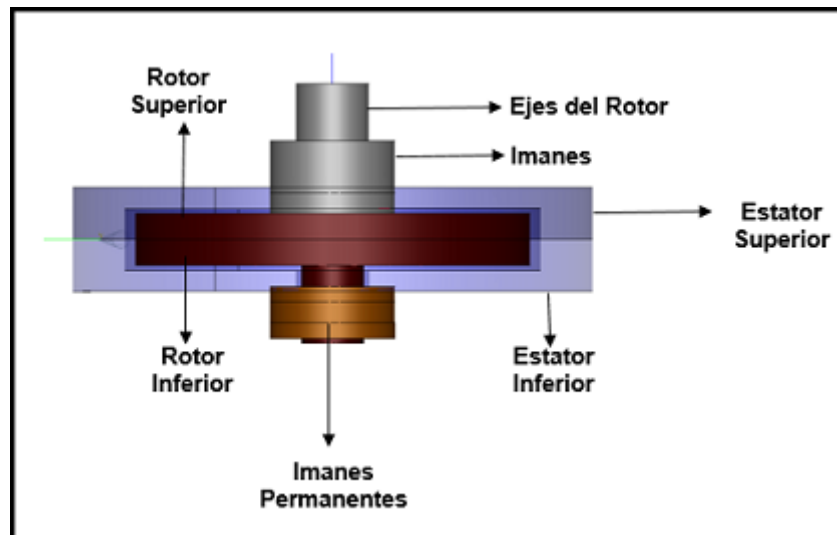


Figura 3.3.3: Diseño N.2 Microcojinete magnético simétrico .

A continuación se presenta la figura 3.3.4 la cual presenta la vista superior del diseño propuesto N.2 del microcojinete magnético simétrico.

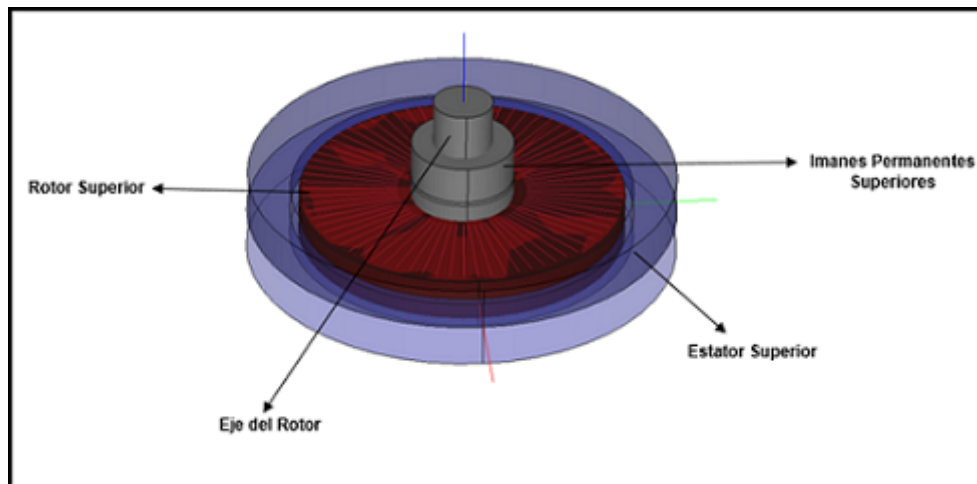


Figura 3.3.4: Diseño N.2 Vista superior del microcojinete magnético .

La figura 3.3.5 presenta la vista inferior del microcojinete simétrico propuesto N.2.

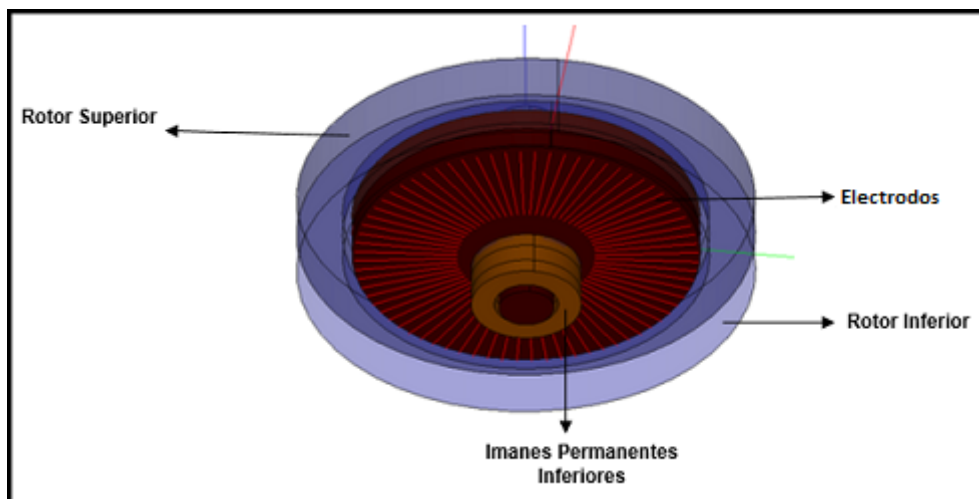


Figura 3.3.5: Diseño N.2 Vista inferior del microcojinete magnético .

Como se observa en la figura 3.3.6, esta presenta una vista en 2-D del micromotor eléctrico de inducción, además algunos valores que influyen en la elaboración del diseño propuesto de los microcojinetes magnéticos.

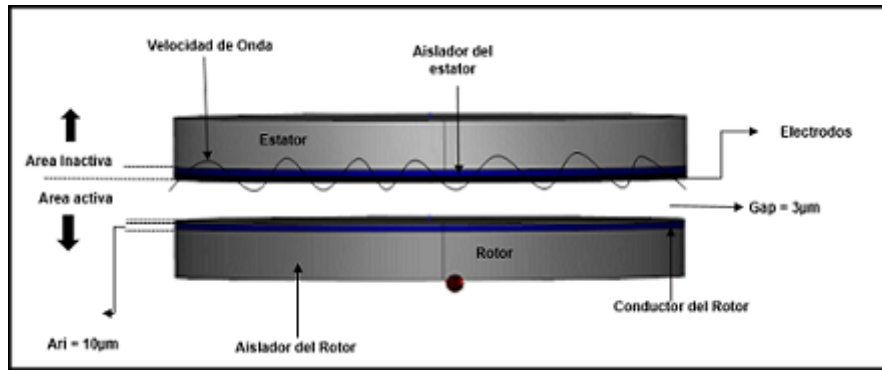


Figura 3.3.6: Micromotor eléctrico de inducción .

A continuación la figura 3.3.7 se presenta una vista del micromotor en 2-D con algunas medidas importantes en el diseño.

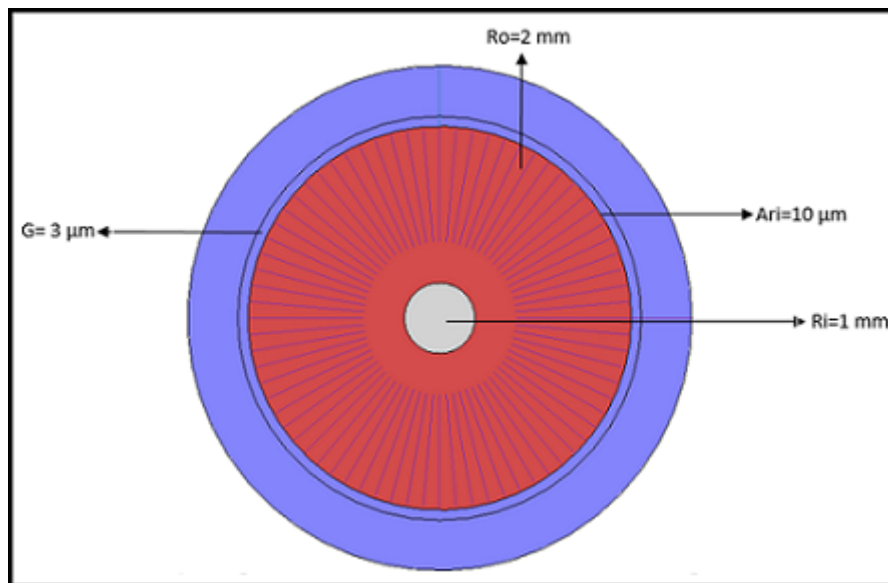


Figura 3.3.7: Medidas del micromotor eléctrico de inducción .

3.3.1. Rigidez en los Microcojinetes Magnéticos

Es importante tener en cuenta la rigidez radial y axial. La fuerza de centrado radial es más alta cuando los imanes de rotor y estator están alineados en dirección axial. La rigidez se define como la derivada negativa de la fuerza y sus componentes con respecto al desplazamiento.

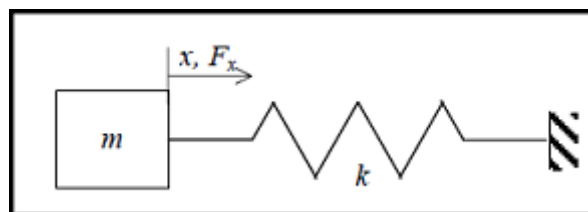


Figura 3.3.8: Sistema de masa-resorte simple .

Un desplazamiento x resulta en una F_x fuerza del resorte, y la constante del resorte o muelle de rigidez k se define entonces como:

$$k = -\frac{F_x}{X} \quad (3.3.1)$$

Si se suelta la masa, que oscilará con la frecuencia natural ω_n ,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.3.2)$$

Para los microcojinetes magnéticos permanentes que lleva la correlación entre la rigidez axial y la rigidez radial viene dada por la siguiente desigualdad:

$$k_{Axial} \leq -2 * k_{Radial} \quad (3.3.3)$$

Capítulo 4

Análisis de los microcojinetes magnéticos por el método de los elementos finitos

4.1. Introducción a los elementos finitos

El análisis por elementos finitos [17] consiste en el empleo de los métodos numéricos en la resolución de un problema físico determinado. Este método numérico se basa en dividir la geometría en la que se quiere resolver un problema físico, en pequeños elementos en los cuales se resuelven las ecuaciones diferenciales correspondientes a un campo (la temperatura en transmisión del calor, el campo magnético en electromagnetismo, el campo de velocidades en mecánica de fluidos, etc), en forma discreta, teniendo en cuenta las propiedades físicas de los materiales empleados, los elementos del entorno, las condiciones de contorno y las fuentes generadoras de campo. Este análisis presenta aplicaciones en diferentes ramas entre las cuales encontramos: Ingeniería estructural, Resistencia de materiales, Mecánica de fluidos, Electromagnetismo, Campos eléctricos, Conducción del calor, etc.

La resolución de estas ecuaciones de forma discreta se realiza de forma iterativa hasta que se alcanza una convergencia en la solución. Las herramientas software que permiten realizar este proceso de forma eficiente y cómoda se denominan herramientas de análisis por elementos finitos, o simplemente herramientas de elementos finitos. Hay herramientas que permiten incluso acoplar dos problemas como es el caso del problema térmico y del problema electromagnético. Es decir la salida de un problema se emplea como entrada en el otro problema y viceversa, de forma iterativa. El proceso de generación de la solución mediante este análisis se realiza en estas herramientas realizando algunos pasos:

1. Definición de la geometría objeto de estudio
2. Especificación del régimen a analizar

3. Asignación de las propiedades físicas de los materiales
4. Asignación de las propiedades físicas de los materiales
5. Aplicación de las cargas
6. Mallado de la geometría
7. Resolución del problema
8. Análisis de la solución

4.1.1. Problemas de magnetostática

Los problemas magnetostáticos son problemas en los que los campos permanecen invariables en el tiempo. En este caso, la intensidad de campo H y la densidad de flujo B debe obedecer:

$$\nabla \times H = J \quad (4.1.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4.1.2)$$

Sujetos a una relación constitutiva entre B y H para cada material:

$$B = \mu H \quad (4.1.3)$$

Si un material es no lineal (por ejemplo, la saturación de hierro o de aleación de acero imanes), la permeabilidad, μ es en realidad una función de B :

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (4.1.4)$$

El FEM va sobre la búsqueda de un campo que satisface (4.1.1) - (4.1.3) a través de un enfoque potencial del vector magnético. La densidad de flujo está escrita en términos del potencial vector, A , como:

$$B = \nabla \times A \quad (4.1.5)$$

Ahora bien, esta definición de B siempre satisface (4.1.2). Entonces, (4.1.1) se puede reescribir como:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (4.1.6)$$

Para un material isótropo lineal (y suponiendo que el calibre de Coulomb, $\nabla \cdot A = 0$), eq. (4.1.6) se reduce a:

$$-\frac{1}{\mu}\nabla^2 A = J \quad (4.1.7)$$

El FEM conserva la forma de (4.1.6), de modo que los problemas magnetostáticos con una relación BH no lineal se pueden resolver. En el caso general 3-D, A es un vector con tres componentes. Sin embargo, en los casos planos y axisimétricos en 2-D, dos de estos tres componentes son cero.

La ventaja de utilizar el potencial del vector formulación es que todas las condiciones que deben cumplir se han combinado en una sola ecuación. Si A se encuentra, B y H , entonces se pueden deducir mediante la diferenciación de A . La forma de (4.1.6), una ecuación diferencial parcial elíptica, surge en el estudio de muchos tipos diferentes de fenómenos de ingeniería. Hay un gran número de herramientas que se han desarrollado en los últimos años para resolver este problema en particular.

4.1.2. Problemas magnéticos armónicos en el tiempo

Si el campo magnético es variable en el tiempo [17], las corrientes de Foucault pueden ser inducidas en materiales con una conductividad diferente de cero. Otras ecuaciones de Maxwell describen la distribución del campo eléctrico y su relación. Denotando la intensidad del campo eléctrico como E y la densidad de corriente como J , E y J obedecen a la relación constitutiva:

$$J = \sigma E \quad (4.1.8)$$

El campo eléctrico inducido a continuación, obedece:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4.1.9)$$

Sustituyendo la forma potencial vector de B en (4.1.9) se obtiene:

$$\nabla \times E = \nabla \times A \quad (4.1.10)$$

En el caso de problemas en 2-D, (4.1.10) se puede integrar para producir:

$$E = -A - \nabla V \quad (4.1.11)$$

y la relación constitutiva, (4.1.8) empleada para producir:

$$J = -\sigma A - \sigma \nabla V \quad (4.1.12)$$

Sustituyendo en (4.1.6) se obtiene la ecuación diferencial parcial:

$$\nabla X \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla X A \right) = -\sigma A + J_{src} - \sigma \nabla V \quad (4.1.13)$$

Donde J_{src} representa las fuentes de corrientes aplicadas. El término ∇V es un gradiente de tensión adicional que, en los problemas 2-D, es constante en un cuerpo conductor. El FEM utiliza este gradiente de tensión en algunos problemas de armónicos para hacer cumplir las restricciones sobre la corriente transportada por regiones conductoras.

El FEM considera (4.1.13) para el caso en el que el campo está oscilando a una frecuencia fija. Para este caso, de la transformación se obtiene una ecuación de estado estacionario que se resuelve para la amplitud y la fase de A . Esta transformación es:

$$A = Re [a (\cos \omega t + j \sin \omega t)] = Re [a e^{j \omega t}] \quad (4.1.14)$$

En la que a es un número complejo. Sustituyendo en (4.1.13) y dividiendo el complejo término exponencial se obtiene la ecuación que FEM realmente resuelve los problemas magnéticos armónicos:

$$\nabla X \left(\frac{1}{\mu_{eff}(B)} \nabla X a \right) = -j \omega \sigma a + j_{src} - \sigma \nabla V \quad (4.1.15)$$

En el que J_{src} representa el factor transformado de las fuentes de corriente aplicadas. En sentido estricto, la μ de permeabilidad debe ser constante para problemas de armónicos. Sin embargo, FEM conserva una relación no lineal en la formulación de armónicos, permitiendo que el programa a la aproximación de los efectos de la saturación en la fase y la amplitud de la fundamental de la distribución del campo. La forma de la curva de BH no es exactamente el mismo que en el caso de DC. En lugar de ello, se selecciona "permeabilidad efectiva" μ_{eff} para dar la amplitud correcta de la componente fundamental de la forma de onda en virtud de excitación sinusoidal.

4.1.3. Problemas de electrostática

Los problemas electrostáticos [17] consideran el comportamiento de la intensidad de campo eléctrico, E , y la densidad de flujo eléctrico (desplazamiento alternativamente eléctrica), D . Hay dos condiciones que deben obedecer. La primera condición es la forma diferencial de la Ley de Gauss, que dice que el flujo de un volumen cerrado es igual a la carga contenida en el volumen:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4.1.16)$$

donde ρ representa la densidad de carga. La segunda es la forma diferencial de la ley de

bucle de Ampere:

$$\nabla \times E = 0 \quad (4.1.17)$$

El desplazamiento y la intensidad del campo también se relacionan entre sí a través de la relación constitutiva:

$$D = \varepsilon E \quad (4.1.18)$$

Donde ε es la permitividad eléctrica. Aunque algunos problemas pueden tener una relación constitutiva no lineal entre D y E , el programa solo considera los problemas lineales. Para simplificar el cálculo de campos que satisfagan estas condiciones, el programa emplea el potencial eléctrico escalar, V , definida por su relación con E como:

$$E = -\nabla V \quad (4.1.19)$$

Debido a la identidad vector $\nabla \times \nabla \psi$ para cualquier escalar ψ , la ley de Ampere se cumple automáticamente. Sustituyendo en la Ley de Gauss y la aplicación de la relación constitutiva se obtiene la ecuación diferencial parcial de segundo orden:

$$-\varepsilon \nabla^2 V = \rho \quad (4.1.20)$$

que se aplica sobre regiones de correo homogénea. Los resuelve programa (4.1.20) para el voltaje V sobre un dominio definido por el usuario con fuentes definidas por el usuario y las condiciones de contorno.

4.1.4. Condiciones de contorno

Algunos análisis de las condiciones de contorno son necesarias para que el usuario este seguro para definir un número adecuado de las condiciones de frontera y poder garantizar una solución única.

Las condiciones de contorno para los problemas magnéticos y electrostáticos vienen en cinco variedades:

1. **Dirichlet:** En este tipo de condición límite, el valor del potencial de A o V es explícitamente definido en el límite, por ejemplo, $A = 0$. El uso más común de las condiciones de limite de Dirichlet en problemas magnéticos es definir $A = 0$ a lo largo de un límite para mantener el flujo magnético desde el cruce de la frontera. En problemas electrostáticos, se utilizan condiciones de Dirichlet para fijar la tensión de una superficie en el dominio del problema.

2. **Neumann:** Esta condición de borde especifica la derivada normal de potencial a lo largo de la frontera. En los problemas magnéticos, la condición de contorno Neumann homogénea, $\partial A / \partial n = 0$ se define a lo largo de una frontera para forzar que el flujo pase por la frontera exactamente a un ángulo de 90° hasta el límite. Este tipo de condición de frontera es consistente con una interfaz con un metal muy altamente permeable.
3. **Robin:** La condición de contorno Robin es una especie de mezcla entre Dirichlet y Neumann, la prescripción de una relación entre el valor de A y su derivada normal en el límite. Un ejemplo de esta condición de contorno es:

$$\frac{\partial A}{\partial n} + cA = 0 \quad (4.1.21)$$

4. **Periódico:** A las condiciones de contorno periódicas une dos límites juntos. En este tipo de condición de contorno, los valores de límite en los puntos correspondientes de los dos límites se establecen iguales entre sí.
5. **Antiperiódicas:** La condición de frontera anti periódicas también se unen a dos límites. Sin embargo, se realizan los valores límites para ser de igual magnitud pero de signo opuesto.

Para los problemas magnéticos con simetría axial, $A = 0$ se aplica en la línea $r = 0$. En este caso, una solución válida se puede conseguir sin definir explícitamente cualquier condiciones de contorno, siempre y cuando la parte del límite del problema se encuentra a lo largo de $r = 0$. Este no es el caso para los problemas electrostáticos, sin embargo. Para los problemas electrostáticos, es válido tener una solución con un potencial distinto de cero a lo largo de $r = 0$.

4.2. Diseño de microcojinetes magnéticos

El programa de Fem Magnetic se utilizó para realizar el diseño de los modelos empleados para las simulaciones; a continuación se presentan los modelos generados con sus respectivas medidas.

4.2.1. Modelo N.1

El diseño del primer modelo del microcojinete magnético se observa en la figura 4.2.1. Este microcojinete que se encuentra unido al eje del rotor (imán ubicado en la parte izquierda) presenta unas dimensiones de $80 \times 40 \mu\text{m}$, tiene además dos imanes permanentes de 10×30

μm uno en la parte superior y otro en la parte inferior; además en el centro presenta una división de $10 \times 20 \mu\text{m}$ en la que se ubica el aluminio.

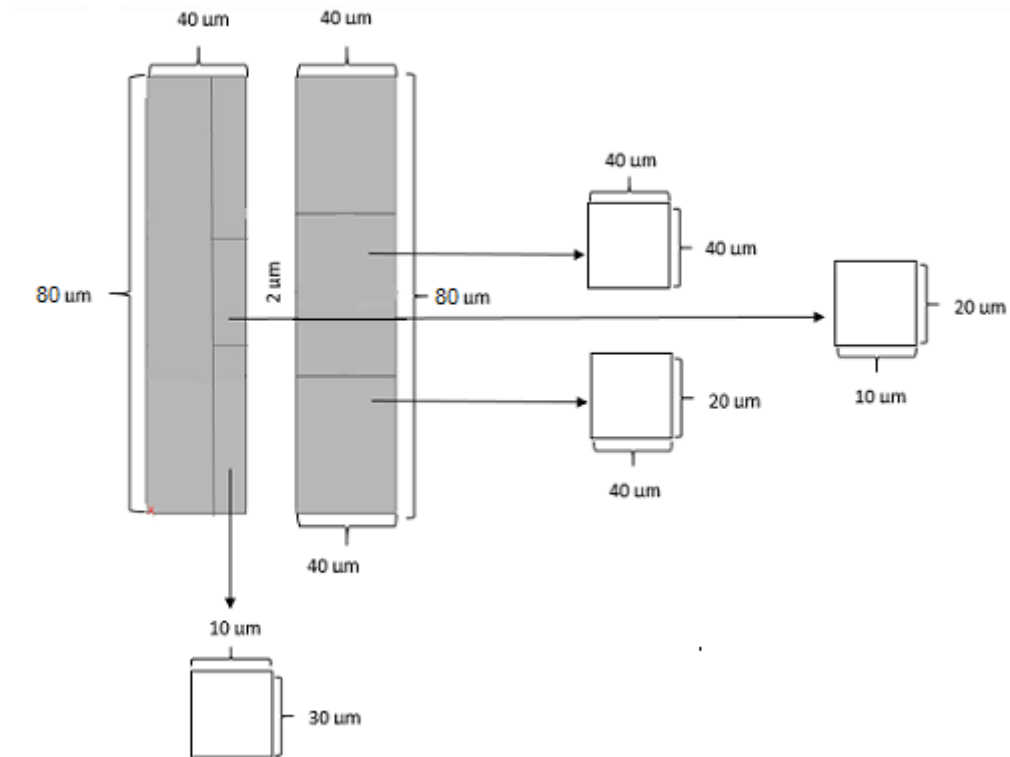


Figura 4.2.1: Dimensiones del diseño propuesto para el modelo N.1 .

Como se observa en la figura 4.2.1 la distancia entre el imán de la izquierda y el de la derecha es de $2 \mu\text{m}$, por otra parte el imán que se encuentra ubicado a la derecha presenta unas dimensiones de $80 \times 40 \mu\text{m}$, contiene dos imanes permanentes de dimensiones $20 \times 40 \mu\text{m}$ y al igual que el imán anterior presenta una división central en la cual se ubican las bobinas, presenta unas dimensiones de $40 \times 40 \mu\text{m}$ y en las cuales se pueden ubicar 3 bobinas. Al siguiente diseño se le aplicó el uso de condiciones asintóticas, esto con el fin de obtener una solución de campo empleando el método de frontera abierta, se tomaron las siguientes condiciones de contorno para realizar este estudio, los valores que se presentan en la tabla 4.1 fueron generados automáticamente por el programa.

Descripción	Valor
Capas	7
Radio	157.49285698
Centro Horizontal	0
Centro Vertical	68
Tipo de borde	Dirichlet

Tabla 4.1: Valores del método frontera abierta.

A continuación se presenta el modelo N.1 generado en el FEM, para ello se seleccionaron

4 imanes NdFeB 32 MGOe, además del aluminio y el aire. En la figura 4.2.2 se observa la geometría de la salida para este diseño.

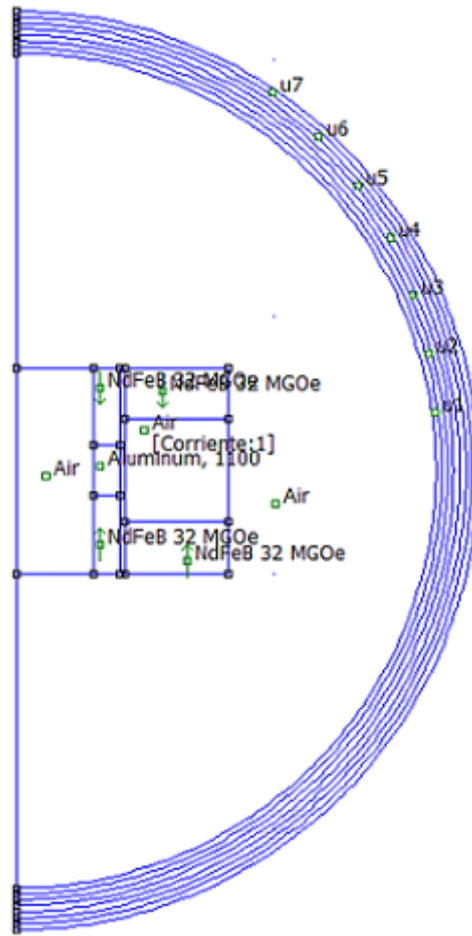


Figura 4.2.2: Diseño de los microcojinetes magnéticos.

Al generar estas condiciones de fronteras se procede a mallar y a visualizar los resultados de la simulación como se puede observar en la figura 4.2.3, se observa un número de mallado de 6,754 de nodos y 13,052 elementos.

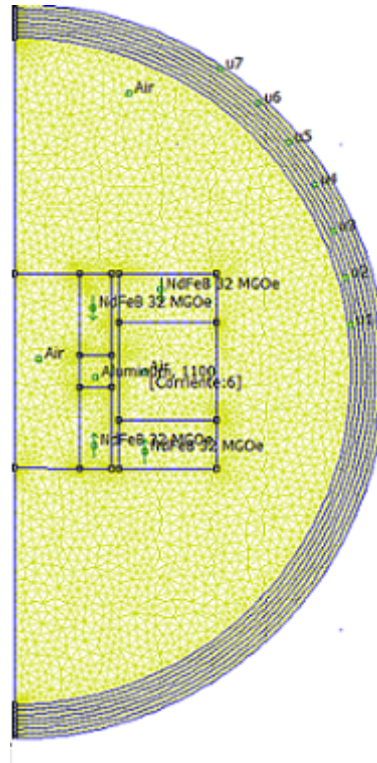


Figura 4.2.3: Geometría con IABC generada por la frontera abierta y mallado.

A continuación se presenta la figura que representa el trazado de la densidad de flujo para el modelo N.1.

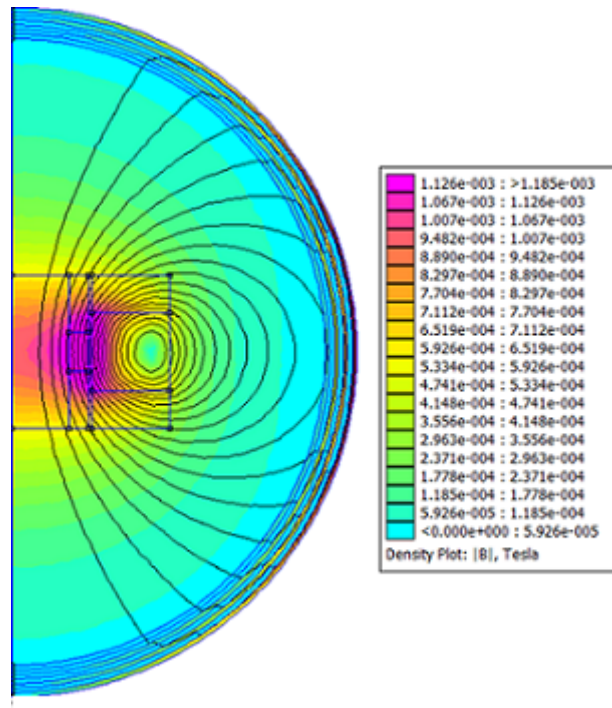


Figura 4.2.4: Trazado de la densidad de flujo.

En la figura 4.2.4 se observa como la fuerza se centra principalmente en la región cubierta por el aluminio y en la parte central izquierda de las bobinas, este disminuye a medida que nos alejamos tanto del aluminio como de las bobinas.

4.2.2. Modelo N.2

El diseño del segundo modelo se observa en la figura 4.2.5, este microcojinete presenta unas dimensiones de $120 \times 60 \mu\text{m}$, al igual que el anterior modelo, este tiene dos imanes permanentes de $20 \times 50 \mu\text{m}$ uno en la parte superior y otro en la parte inferior, además en el centro presenta una división de $20 \times 20 \mu\text{m}$ en la que se encuentra ubicado el aluminio.

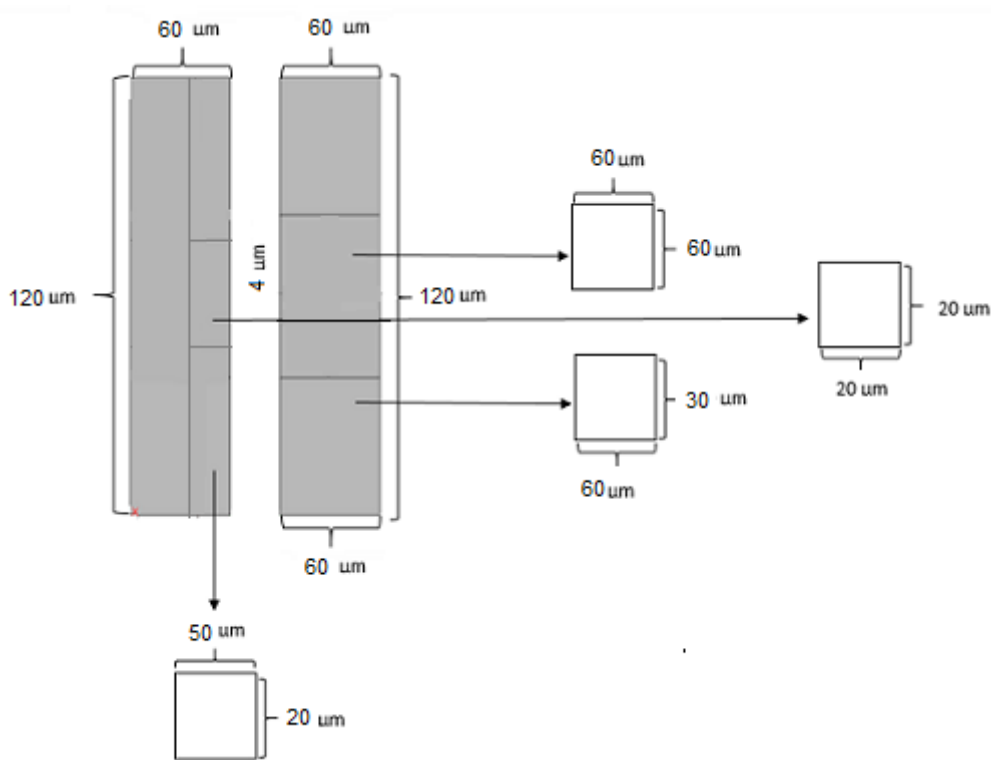


Figura 4.2.5: Dimensiones del diseño propuesto para el modelo N.2 .

Como se observa en la figura 4.2.5 la distancia entre el imán de la izquierda y el de la derecha es de $4 \mu\text{m}$, por otra parte el imán que se encuentra ubicado a la derecha presenta unas dimensiones de $120 \times 60 \mu\text{m}$, contiene dos imanes permanentes de dimensiones $60 \times 30 \mu\text{m}$ y al igual que el imán anterior presenta una división central en la cual se ubican las bobinas, presenta unas dimensiones de $60 \times 60 \mu\text{m}$ y en las cuales se pueden ubicar 7 bobinas.

Al diseño 4.2.5 se le aplicó el uso de condiciones asintóticas, esto con el fin de obtener una solución de campo empleando el método de frontera abierta, se tomaron las siguientes condiciones de contorno, los valores que se presentan en la tabla 4.2 fueron generados automáticamente por el programa.

Descripción	Valor
Capas	7
Radio	482.161264848703
Centro Horizontal	0
Centro Vertical	60
Tipo de borde	Dirichlet

Tabla 4.2: Valores del método frontera abierta .

A continuación se presenta el modelo N.2 generado en el FEM, para ello se seleccionaron 4 imanes NdFeB 32 MGOe, además del aluminio y el aire. En la figura 4.2.6 se observa la geometría de la salida para este diseño.

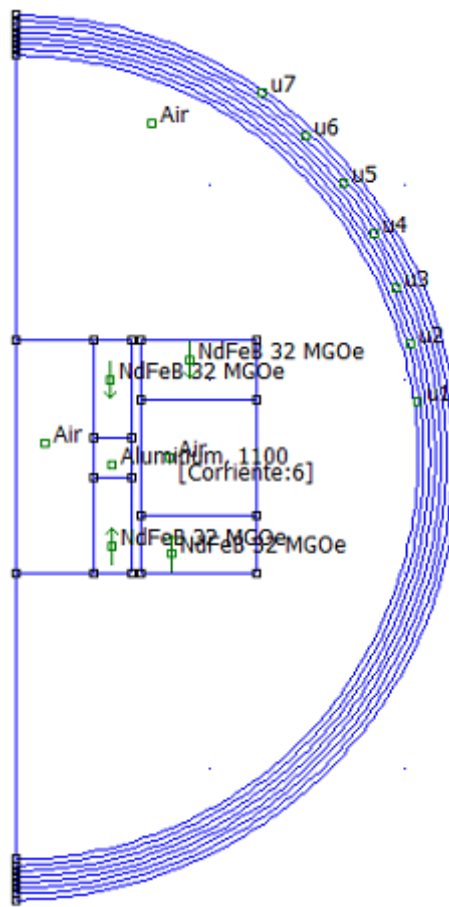


Figura 4.2.6: Diseño de los microcojinetes magnéticos.

Al generar estas condiciones de fronteras se procede a mallar y a visualizar los resultados de la simulación como se puede observar en la figura 4.2.7, se observa un número de mallado de 7,071 nodos y 13,684 elementos.

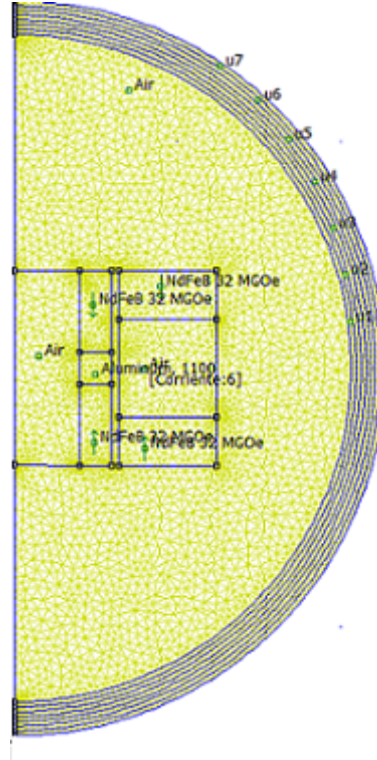


Figura 4.2.7: Geometría con IABC generada por la frontera abierta y mallado.

A continuación se presenta la figura 4.2.8 que representa el trazado de la densidad de flujo para el modelo N.2.

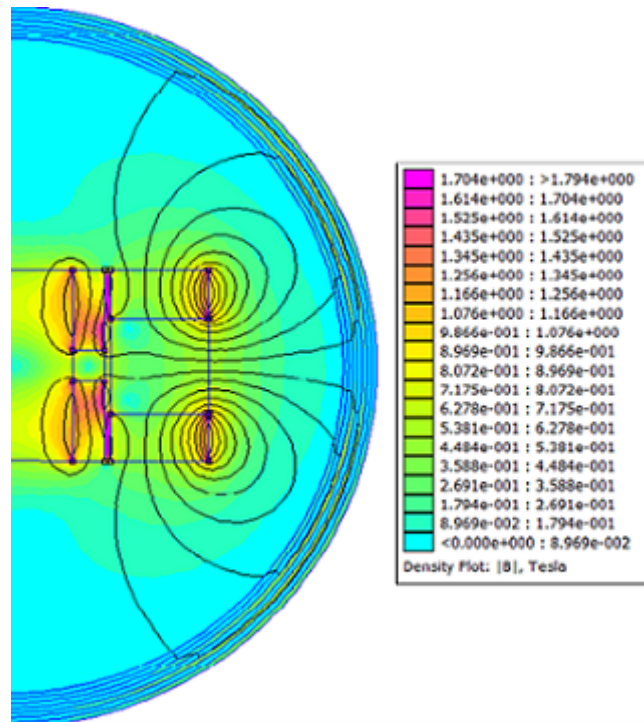


Figura 4.2.8: Trazado de la densidad de flujo.

En la figura 4.2.8 se observa como la fuerza se centra principalmente en los cuatros imanes permanentes y presenta una menor densidad de flujo en sus esquinas, tanto inferiores como superiores.

4.2.3. Modelo N.3

El diseño del tercer modelo se observa en la figura 4.2.9, este microcojinete presenta unas dimensiones de $140 \times 90 \mu\text{m}$. Al igual que el anterior modelo, este tiene dos imanes permanentes de $50 \times 30 \mu\text{m}$ uno en la parte superior y otro en la parte inferior; además en el centro presenta una división de $40 \times 30 \mu\text{m}$ en la que se encuentra ubicado el aluminio.

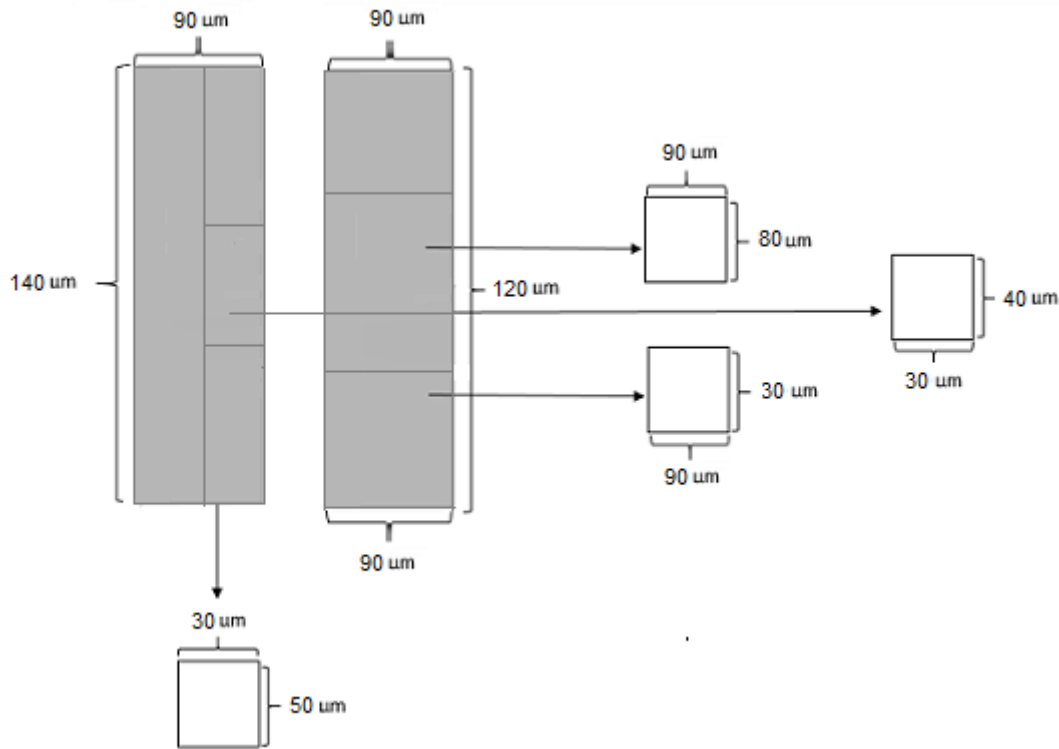


Figura 4.2.9: Dimensiones del diseño propuesto para el modelo N.3 .

Como se observa en la figura 4.2.9 la distancia entre el imán de la izquierda y el de la derecha es de $6 \mu\text{m}$, por otra parte el imán que se encuentra ubicado a la derecha presenta unas dimensiones de $120 \times 90 \mu\text{m}$, contiene dos imanes permanentes de dimensiones $30 \times 90 \mu\text{m}$ y al igual que el imán anterior presenta una división central en la cual se ubican las bobinas, presenta unas dimensiones de $80 \times 90 \mu\text{m}$ y en las cuales se pueden ubicar 14 bobinas.

Al diseño 4.2.9 se le aplicó el uso de condiciones asintóticas, esto con el fin de obtener una solución de campo empleando el método de frontera abierta, se tomaron las siguientes condiciones de contorno, los valores que se presentan en la tabla 4.3 fueron generados automáticamente por el programa.

Descripción	Valor
Capas	7
Radio	695.858833618215
Centro Horizontal	0
Centro Vertical	69.8
Tipo de borde	Dirichlet

Tabla 4.3: Valores del método frontera abierta .

A continuación se presenta el modelo N.3 generado en el FEM, para ello se seleccionaron 4 imanes NdFeB 32 MGOe, además del aluminio y el aire. En la figura 4.2.10 se observa la geometría de la salida para este diseño.

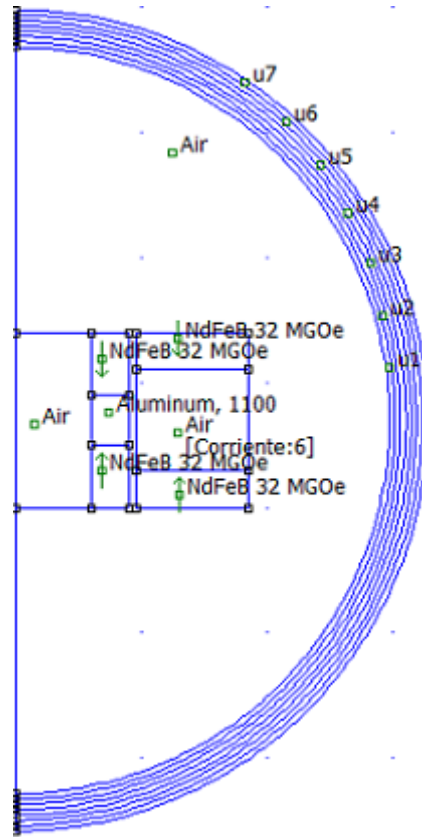


Figura 4.2.10: Diseño microcojinetes magnéticos.

Al generar estas condiciones de fronteras se procede a mallar y a visualizar los resultados de la simulación como se puede observar en la figura 4.2.11, se observa un número de mallado de 7,000 nodos y 13,540 elementos.

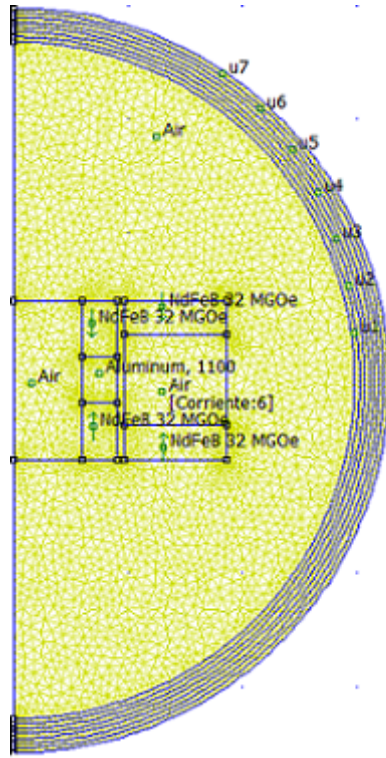


Figura 4.2.11: Geometría con IABC generada por la frontera abierta y mallado.

A continuación se presenta la figura 4.2.12 que representa el trazado de la densidad de flujo para el modelo N.3.

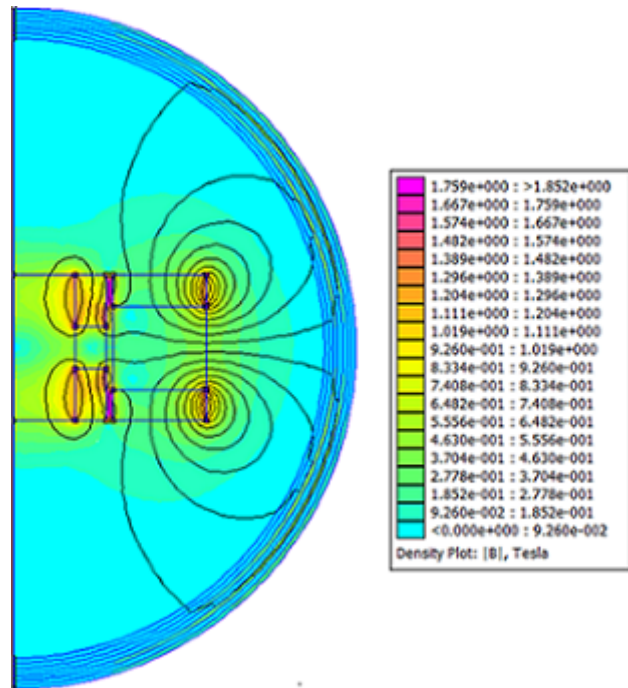


Figura 4.2.12: Trazado de la densidad de flujo.

En la figura 4.2.12 se observa como la fuerza se centra principalmente en los cuatros imanes permanentes y presenta una menor densidad de flujo en sus esquinas, tanto inferiores como superiores.

4.2.4. Modelo N.4

El diseño del tercer modelo se observa en la figura 4.2.13. Este microcojinete presenta unas dimensiones de $140 \times 90 \mu\text{m}$. Al igual que el anterior modelo, este tiene dos imanes permanentes de $50 \times 30 \mu\text{m}$ uno en la parte superior y otro en la parte inferior, además en el centro presenta una división de $40 \times 30 \mu\text{m}$ en la que se encuentra ubicado el aluminio.

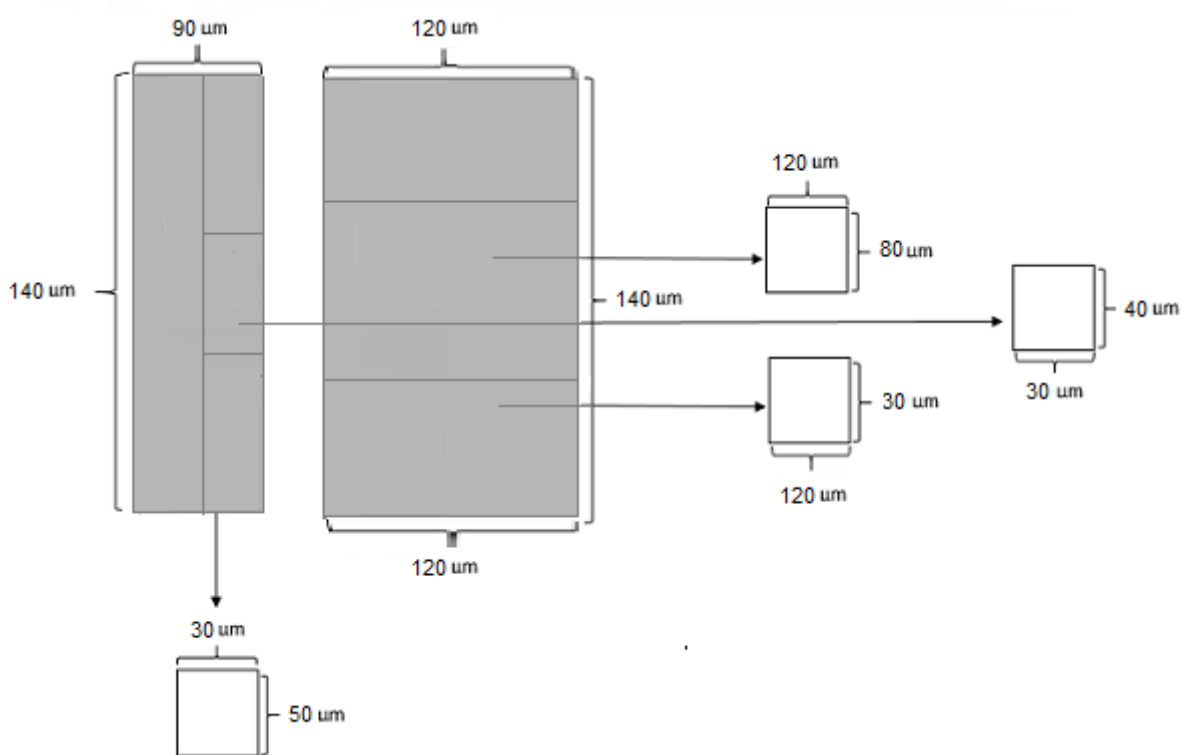


Figura 4.2.13: Dimensiones del diseño propuesto para el modelo N.4 .

Como se observa en la figura 4.2.13 la distancia entre el imán de la izquierda y el de la derecha es de $6 \mu\text{m}$. Por otra parte, el imán que se encuentra ubicado a la derecha presenta unas dimensiones de $140 \times 120 \mu\text{m}$, contiene dos imanes permanentes de dimensiones $30 \times 120 \mu\text{m}$ y al igual que el imán anterior presenta una división central en la cual se ubican las bobinas que en este caso son 19. Esta presenta unas dimensiones de $80 \times 120 \mu\text{m}$.

Al diseño N.4 se le aplicó el uso de condiciones asintóticas, con el fin de obtener una solución de campo empleando el método de frontera abierta. Se tomaron las siguientes condiciones de contorno para realizar este estudio, los valores que se presentan en la tabla 4.4 fueron generados automáticamente por el programa.

Descripción	Valor
Capas	7
Radio	695.858833618215
Centro Horizontal	0
Centro Vertical	69.8
Tipo de borde	Dirichlet

Tabla 4.4: Valores del método frontera abierta .

A continuación se presenta el modelo N.4 generado en el FEM, para ello se seleccionaron 4 imanes NdFeB 32 MGOe, además del aluminio y el aire. En la figura 4.2.14 se observa la geometría de la salida para este diseño.

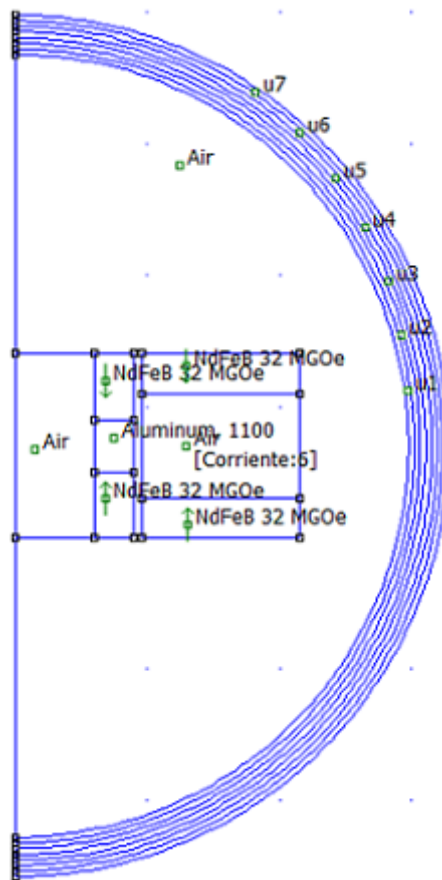


Figura 4.2.14: Diseño microcojinetes magnéticos.

Al generar estas condiciones de fronteras se procede a mallar y a visualizar los resultados de la simulación como se puede observar en la figura 4.2.15, se observa un número de mallado de 6,861 nodos y 13,264 elementos.

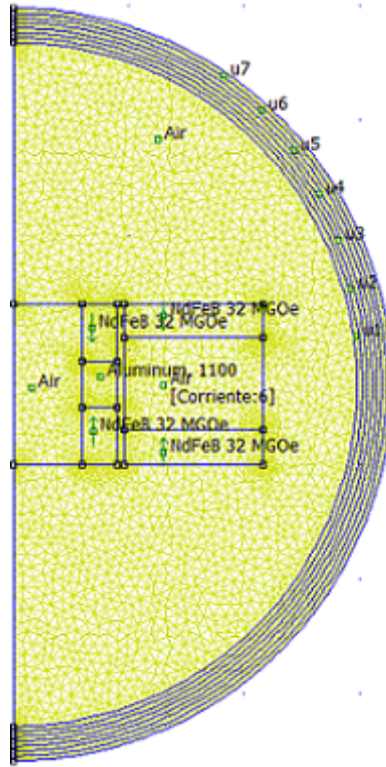


Figura 4.2.15: Geometría con IABC generada por la frontera abierta y mallado.

A continuación se presenta la figura 4.2.16 que representa el trazado de la densidad de flujo para el modelo N.4.

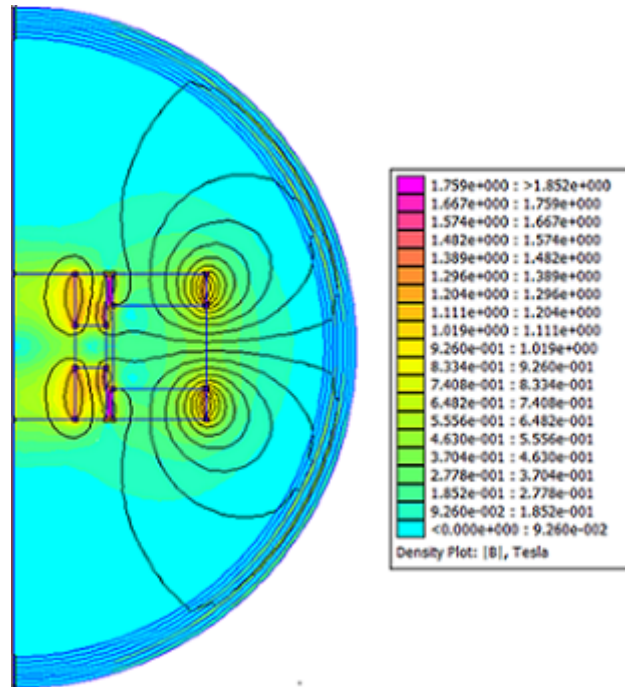


Figura 4.2.16: Trazado de la densidad de flujo.

En la figura 4.2.16 se observa como la fuerza se centra principalmente en los cuatros imanes permanentes y presenta una menor densidad de flujo en sus esquinas, tanto inferiores como superiores. Esta imagen es muy similar a los dos modelos anteriores.

4.3. Análisis de sensibilidad de magnitudes

Para realizar el análisis de sensibilidad de magnitudes inicialmente se emplean 4 imanes con diferentes medidas; estas se presentan en la tabla 4.5.

Modelo	N. Imanes	Medidas Imanes del rotor	Medidas Imanes del estator
1	4	30 x 10 μm	20 x 40 μm
2	4	50 x 20 μm	30 x 60 μm
3	4	50 x 30 μm	30 x 90 μm
4	4	50 x 30 μm	80 x 120 μm

Tabla 4.5: Imanes según el modelo diseñado .

Para realizar estas simulaciones se empleó un código en el programa de Scilab, el cual se presenta a continuación en la tabla 4.5, la función principal de este código es calcular el valor de la fuerza axial que es ejercida al momento que se produce un movimiento. En este caso la fuerza es llamada Fz y se hace en un bucle de 30 movimientos; también se calculó la fuerza radial que al no tener un movimiento en el eje x presentó un valor igual a cero; luego de tener los datos calculados se procede a graficar.

Algoritmo 4.1 Código scilab análisis de sensibilidad .

```

1 showconsole()
2 clearconsole()
3 mydir="."
4 open(mydir..."cojinetes.fem")
5 setcompatibilitymode(1)
6 mi_saveas(mydir..."temp.fem")
7 mi_seteditmode("group")
8 handle=openfile("cojinetes1.txt","w+");
9
10 > for n=0,29-do
11 ----
12 > > mi_analyze() > --cálculo
13 > > mi_loadsolution()
14 > > mo_groupselectblock(1)
15 > > fz=mo_blockintegral(19)
16 write(handle,n,"> -----",fz,"\n");
17 -----print(n,fz)
18 > >
19 > > if (n<10) then-----desplazamiento del cilindro
20 -----
21 > > > mi_selectgroup(1)
22 > > > mi_movetranslate(0,1.5)
23 > > elseif (n<19) then
24 -----
25 > > > mi_selectgroup(1)
26 > > > mi_movetranslate(0,-1.5)
27 > > end
28 > end
29 mo_close()
30 mi_close()

```

4.3.1. Gráficas de la fuerza axial ejercida en función del desplazamiento

Para generar las simulaciones se tomaron los valores que se presentan en la tabla 4.6. El valor de la coercitividad fue tomada como referencia del artículo [13], los demás valores fueron sugeridos por el programa FEM al momento de seleccionar el tipo de imán a utilizar.

Parámetros	Valores
Nombre Imanes	NdFeB 32 MGOe
Permeabilidad Relativa μ_r	1.045
Permeabilidad Relativa μ_z	1.045
Coercitividad	2000000
Conductividad Eléctrica	0.694

Tabla 4.6: Valores tomados para los imanes .

A continuación se presenta la gráfica 4.3.1 que refleja las simulaciones generadas para los cuatro modelos.

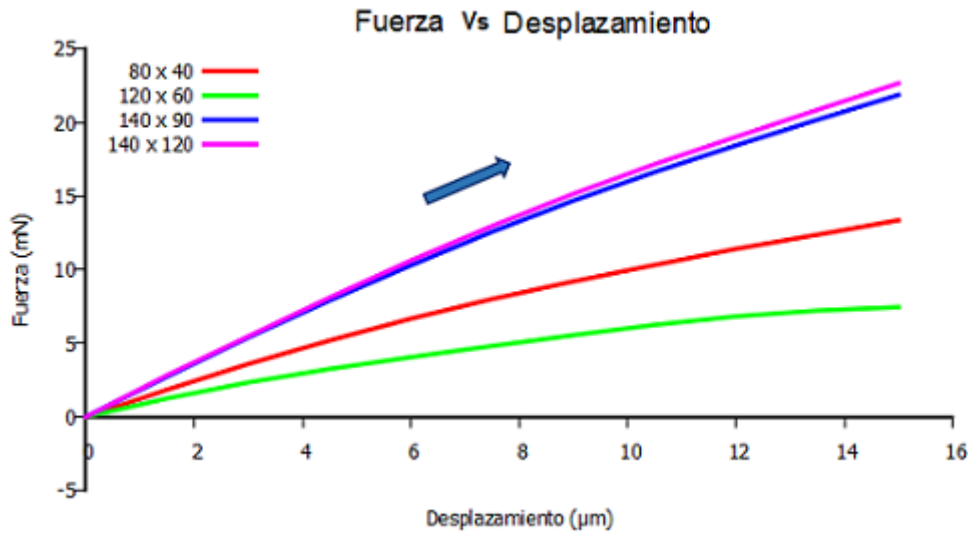


Figura 4.3.1: Desplazamiento ascendiente del cilindro.

En la gráfica 4.3.1 se observa como a medida que aumenta el radio de los modelos aumenta la fuerza radial ejercida por el cilindro cuando se encuentra en movimiento, llegando a tomar un valor máximo con el cuarto modelo de 22,69 mN, el modelo N.3 presenta una fuerza de 21,96 mN, por otra parte de los cuatro modelos el que presenta una fuerza radial menor es el modelo N.2 con un valor de 7,39 mN. En lo que refiere a la fuerza ejercida al momento que el cilindro esta descendiendo, esta toma los mismos valores que la gráfica anterior.

Por otra parte se ha calculado la rigidez de los microcojinetes magnéticos k_s para cada uno de los modelos, esta rigidez es calculada empleando la siguiente fórmula.

$$k_s = \frac{\Delta F z}{\Delta z} \quad (4.3.1)$$

Donde F es la fuerza generada y z corresponde al desplazamiento del cilindro.

Modelo	Fuerza (Fz)	Desplazamiento (z)	Rigidez Magnética
1	1,45 mN	2 μm	0,75 mN/ μm
2	2,39 mN	2 μm	1,19 mN/ μm
3	3,22 mN	2 μm	1,61 mN/ μm
4	3,64 mN	2 μm	1,82 mN/ μm

Tabla 4.7: Rigidez de los microcojinetes magnéticos para el desplazamiento ascendente.

La figura 4.3.2 muestra las gráficas de los cuatro modelos utilizados cuando el cilindro presenta un movimiento descendente positivo.

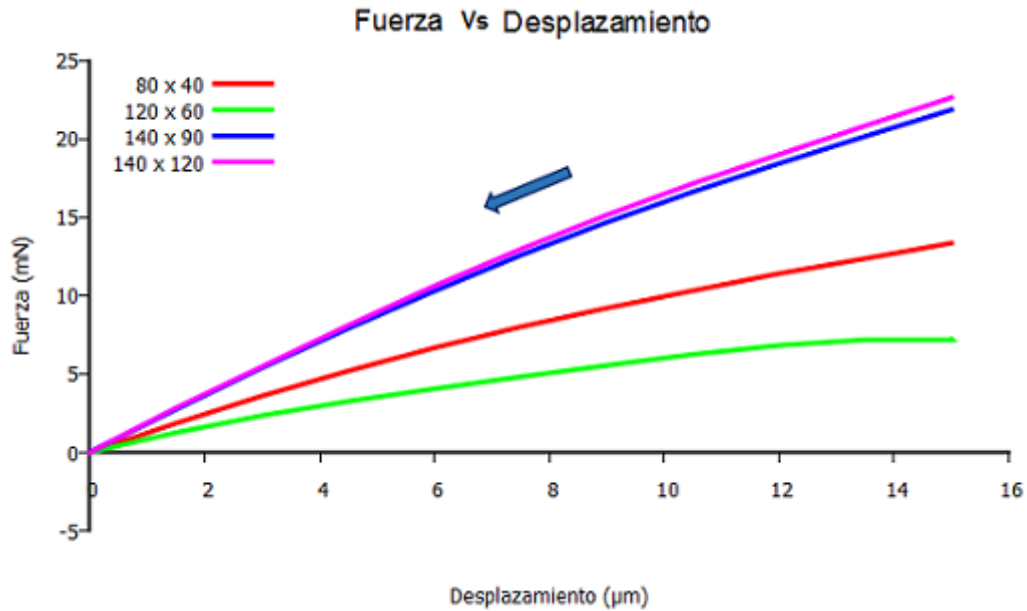


Figura 4.3.2: Desplazamiento descendente positivo del cilindro .

Se ha calculado la rigidez para cada modelo con movimiento descendente positivo, los resultados se observan en la figura 4.8.

Modelo	Fuerza (Fz)	Desplazamiento (z)	Rigidez Magnética
1	1,56 mN	2 μm	0,78 mN/ μm
2	2,49 mN	2 μm	1,245 mN/ μm
3	3,43 mN	2 μm	1,715 mN/ μm
4	3,64 mN	2 μm	1,82 mN/ μm

Tabla 4.8: Rigidez de los microcojinetes magnéticos para el desplazamiento descendente positivo.

Al momento de graficar los valores generados por los modelos, se observa que al ejercer un desplazamiento negativo el cilindro, este genera una fuerza radial negativa, como se puede ver

en la gráfica 4.3.3.

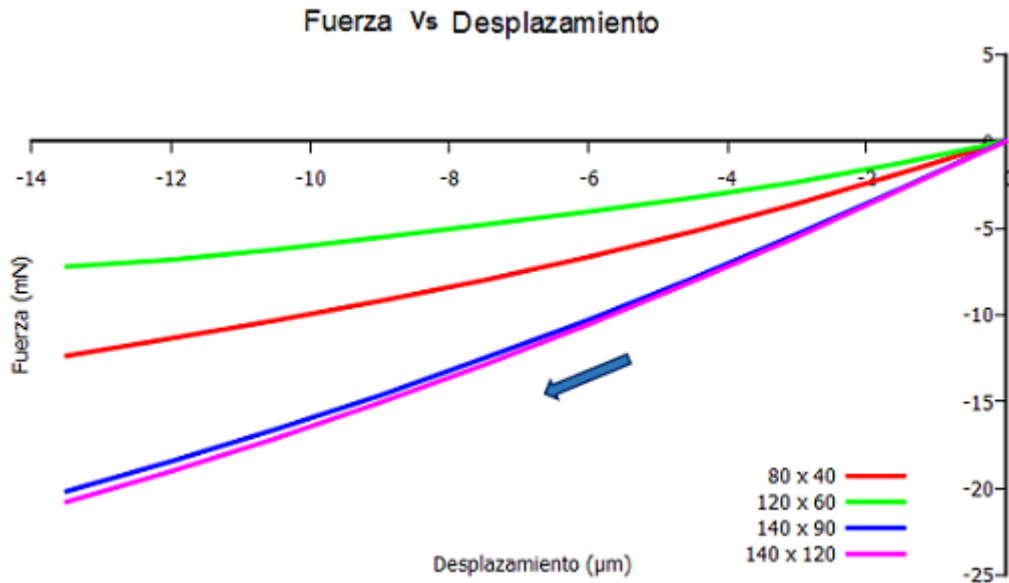


Figura 4.3.3: Desplazamiento negativo del cilindro .

En la gráfica 4.3.3 se observa como los cuatro modelos siguen el mismo patrón de las dos gráficas anteriores en sentido inverso, siendo el modelo que presenta unas mayores dimensiones en este caso el cuarto modelo el que genera un valor máximo negativo en la gráfica de -20,88 mN, seguida de igual forma del tercer modelo con un -20,22 mN.

La siguiente tabla 4.9 presenta el cálculo de la rigidez para el desplazamiento negativo de los cuatro modelos, se observa como a medida que se incrementa el tamaño de los modelos la rigidez aumenta, presentando un mayor valor en la rigidez el modelo N.4 con 1,86 mN/μm.

Modelo	Fuerza (Fz)	Desplazamiento (z)	Rigidez Magnética
1	1,66 mN	2 μm	0,83 mN/μm
2	2,32 mN	2 μm	1,16 mN/μm
3	3,54 mN	2 μm	1,77 mN/μm
4	3,72 mN	2 μm	1,86 mN/μm

Tabla 4.9: Rigidez de los microcojinetes magnéticos para el desplazamiento negativo.

4.3.2. Gráficas de la fuerza axial ejercida en función del desplazamiento utilizando corriente

La corriente se utilizará únicamente cuando se presenten perturbaciones al momento de ejercer una determinada velocidad en el micromotor, para realizar las simulaciones de las fuerzas axiales ejercidas al momento del desplazamiento se tomaron algunos datos encontradas en publicaciones referentes al diseño y fabricación de microbobinas, las tablas 4.10 y 4.11 presenta estos datos.

Referencia	Diámetro Total	Diámetro Alambre	Vueltas	Corriente	Densidad de Corriente
[3]	150 μm	25 μm	15	100 mA	2.037e+08 A/m ²
[3]	1000 μm - 200 μm	25 μm		100 mA	—
[3]	200 μm	25 μm	2	100 mA	—
[3]	120 μm	25 μm	120	100 mA	—
[3]	1000 μm	25 μm	7	100 mA	—
[6]		—	20	300 mA	—

Table 4.10: Datos de fabricación de algunas microbobinas 1.

Referencia	Frecuencia	Altura	Cable Aislado	Espacio entre Bobinas	Deflexiones
[3]	—	650 μm -high SU8	SI	—	—
[3]	—	SU8	—	—	—
[3]	—	—	—	200 μm	—
[3]	300 KHz	—	—	—	—
[3]	300 KHz	—	—	—	—

Table 4.11: Datos de fabricación de algunas microbobinas 2 .

Con base a los datos encontrados en los diferentes artículos relacionados con la fabricación de las microbobinas y tomando como base el artículo [3], el cual presenta una referencia del diámetro del alambre del bobinado que en su caso es de 25 μm se calculó la superficie total del alambre $S = 4,909 \times 10^{-10} m^2$. Con este dato y con las medidas de cada uno de los modelos se calcularon la superficie total de cada uno de ellos y el número de vueltas que puede contener cada superficie. Estos valores se presentan en la tabla 4.12.

Modelo	Medidas	Superficie total del modelo	Superficie del alambre	Número de bobinas
1	80 x 40 μm	4.909 x 10 ⁻⁹	1.600 x 10 ⁻⁹	3
2	120 x 60 μm	4.909 x 10 ⁻⁹	3.600 x 10 ⁻⁹	7
3	140 x 90 μm	4.909 x 10 ⁻⁹	7.200 x 10 ⁻⁹	14
4	140 x 90 μm	4.909 x 10 ⁻⁹	9.600 x 10 ⁻⁹	19

Table 4.12: Número de bobinas para cada superficie.

Para realizar las gráficas de cada uno de los modelos se tomó como base la corriente del artículo [6], la cual se empleó para la fabricación de un micro imán, este utilizó un valor de corriente de 300 mA; en nuestro caso se empleó una corriente de 0.3 A. Como se observó que la corriente influía mucho en cada modelo al momento de su desplazamiento, se decidió modificar el número de bobinas en cada uno de los modelos de acuerdo a la cantidad permitida por el mismo, para ello se realizó el siguiente procedimiento:

Inicialmente se tomó la superficie total de cada uno de los modelos, donde:

$$S = \pi x r^2 \quad (4.3.2)$$

,

Tomando un radio de 12.5 μm , dio como resultado un valor de $(4,909 \times 10^{-10} m^2)$, luego se divide

por la superficie de cada modelo utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Número de Vueltas} = \frac{s}{S} \quad (4.3.3)$$

$$\text{Número de Vueltas} = \frac{1,600 \times 10^{-10} m^2}{4,909 \times 10^{-10} m^2} \quad (4.3.4)$$

, dando un valor determinado de bobinas para cada modelo, en este caso la cantidad de bobinas ha utilizar es de 3.

4.3.2.1 Modelo N.1

Como se ha mencionado antes, este modelo presenta una medida total de $80 \times 80 \mu m$ y se le aplicará una corriente de 0.3 A, modificando únicamente el número de vueltas que para este modelo el máximo permitido es de 3.

La siguiente gráfica 4.3.4 refleja la relación existente entre la fuerza generada al momento de producirse el desplazamiento, hasta un máximo de $45 \mu m$.

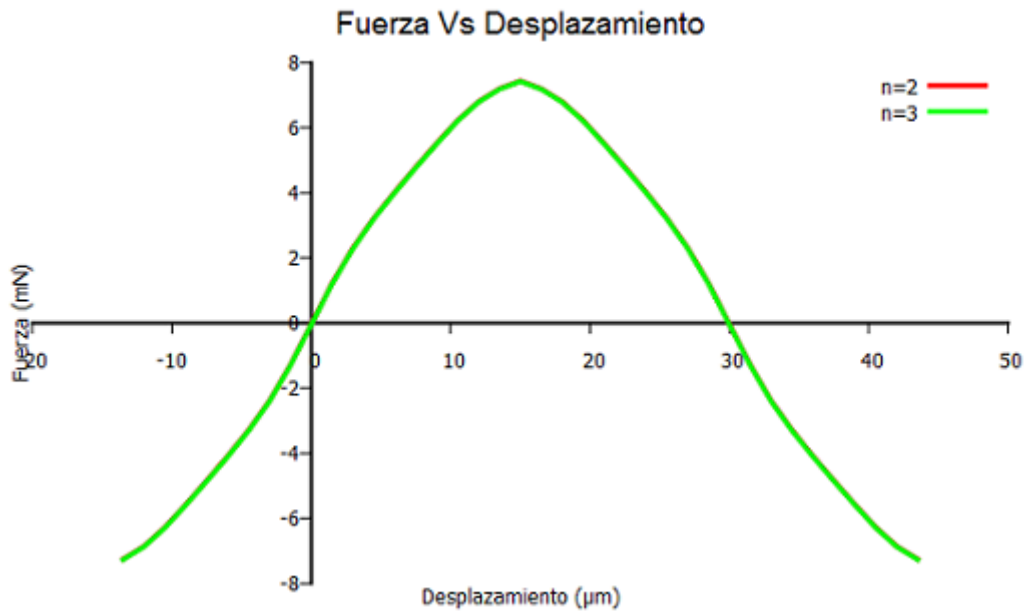


Figura 4.3.4: Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.1.

Es importante anotar que para estas simulaciones se utilizará un gap de $2 \mu m$, este valor se tomó como base del artículo [21]. La gráfica 4.3.5 presenta la relación de la fuerza frente al desplazamiento producida al momento de iniciarse el movimiento del micromotor, para este modelo es aconsejable utilizar el mayor número de bobinas ya que, según la gráfica, ésta presenta un mayor espacio de regulación en el modelo N.1.

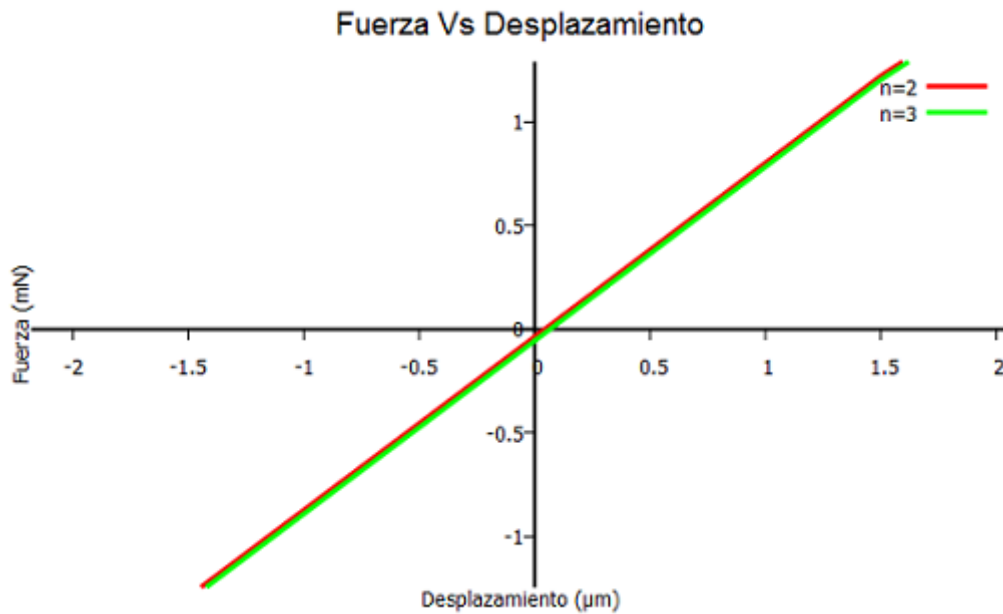


Figura 4.3.5: Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.1.

4.3.2.2 Modelo N.2

Este modelo permite como máximo 7 bobinas. Al igual que en el modelo anterior se aplicará una corriente de 0,3 A. En la gráfica 4.3.6 se observa como la fuerza aumenta a medida que se produce el desplazamiento, llegando a un valor máximo de 13,39 μm .

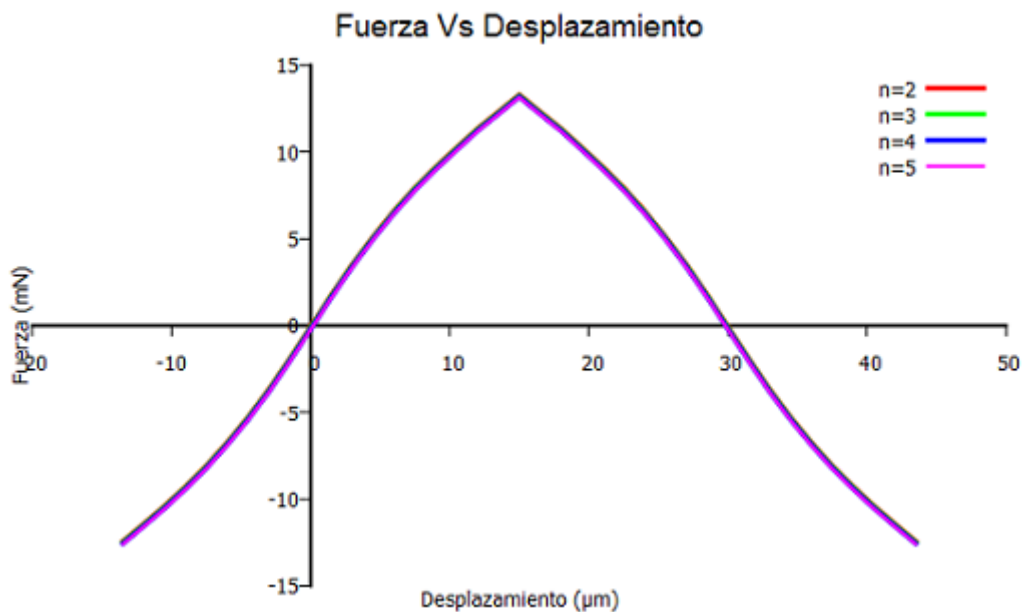


Figura 4.3.6: Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.2.

Para este modelo es aconsejable utilizar un bobinado máximo de 5, ya que esta presenta un mayor rango para poder regular cuando se presente una perturbación.

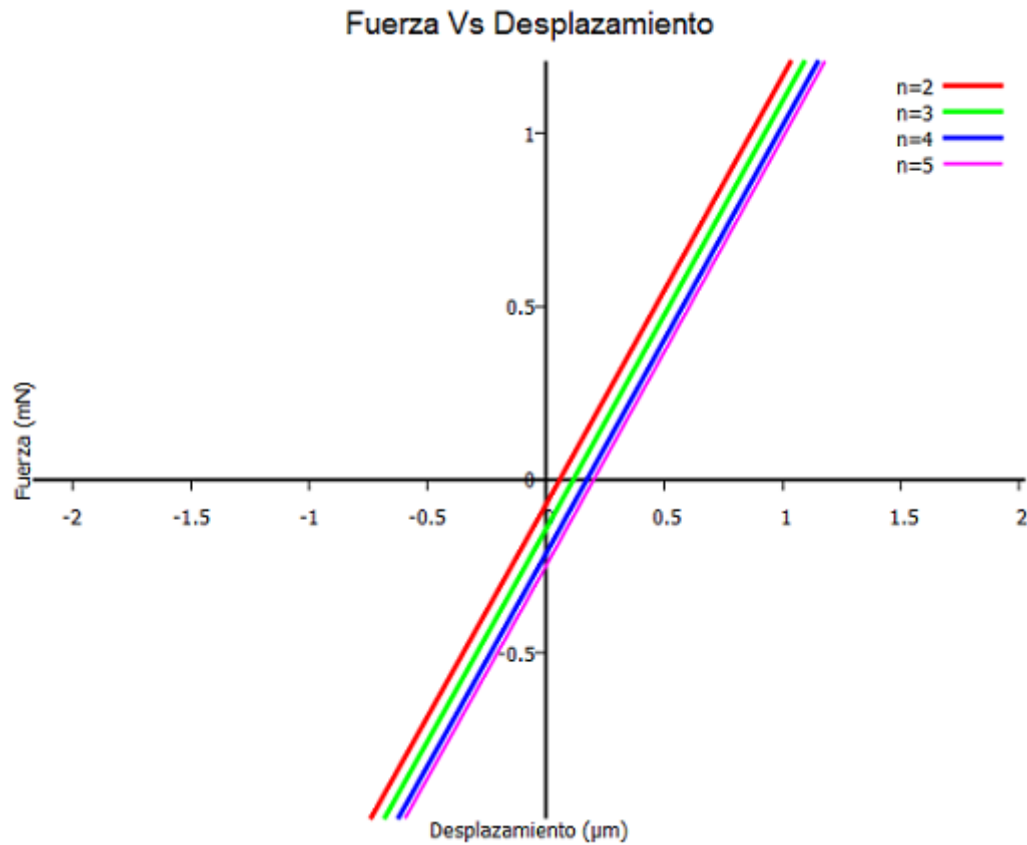


Figura 4.3.7: Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.2.

4.3.2.3 Modelo N.3

Para este se pueden emplear un máximo de 14 bobinas, esto de acuerdo a las medidas del modelo. La gráfica 4.3.8 presenta la relación existente entre el desplazamiento y el desplazamiento para cada una de las bobinas empleadas en el modelo. Se observa como aumenta la fuerza al momento del desplazamiento llegando a un valor máximo de 22,01 μm .

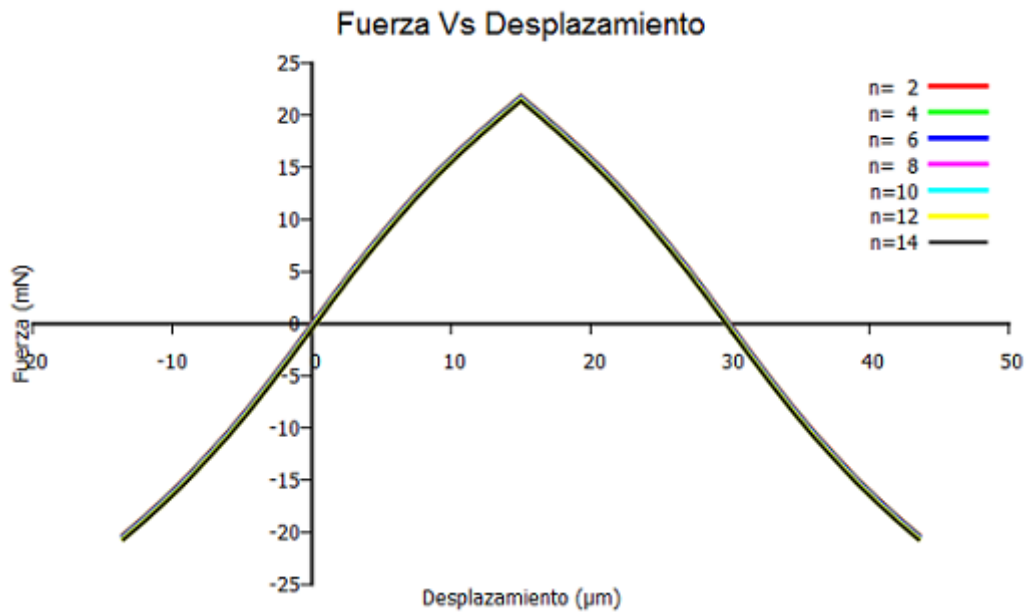


Figura 4.3.8: Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.3.

La gráfica 4.3.9 presenta la relación de la fuerza para cada número de bobinados, que en este caso son de 14. Se observa como el número máximo de bobinas presenta un mayor espacio de regulación por lo cual sería el mas recomendado para utilizar.

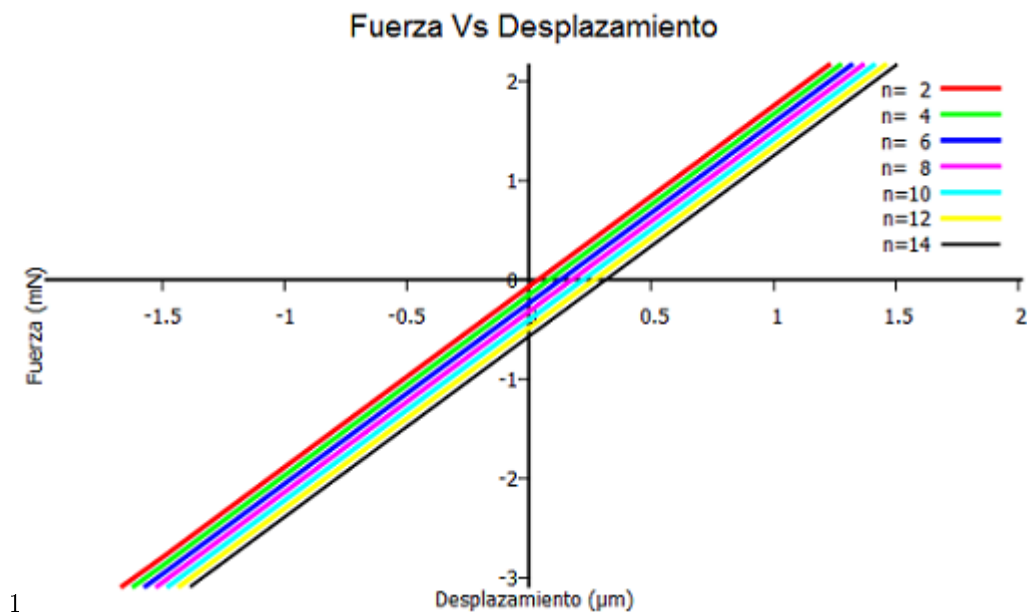


Figura 4.3.9: Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.3.

4.3.2.4 Modelo N.4

En el modelo N.4 el número total de bobinas que se pueden incorporar es de 19 y se le aplicará una corriente de 0.3 A como en los casos anteriores. La gráfica 4.3.10 muestra la

relación existente entre la fuerza y el desplazamiento generado al momento del movimiento del motor; no se observa mucha diferencia con el modelo anterior ya que la fuerza toma un valor máximo de unos 22,64 mN con un número de bobinas de 4, algo similar al modelo anterior.

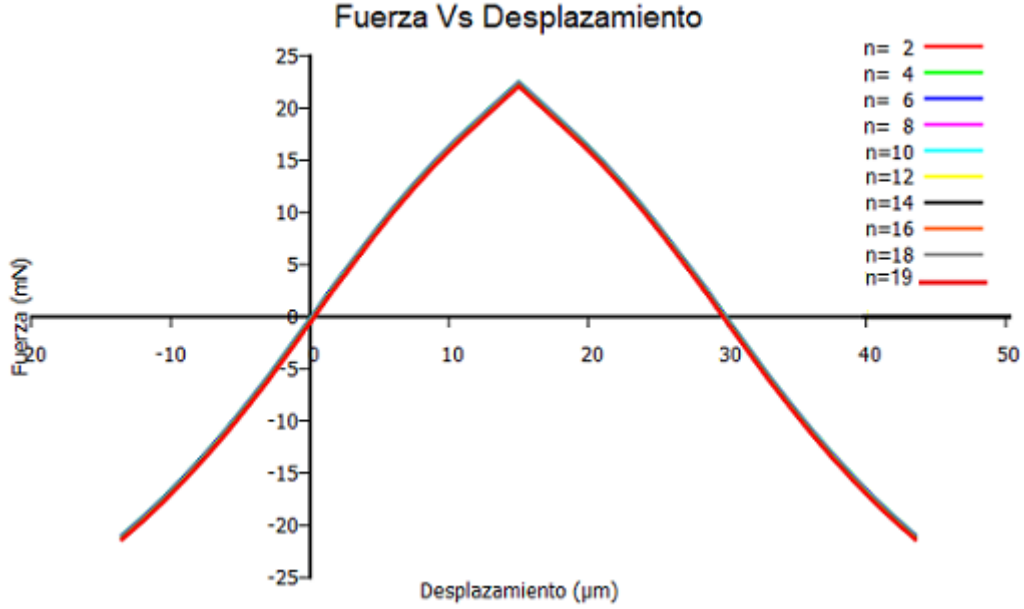


Figura 4.3.10: Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.4.

Para este modelo al igual que en los anteriores se recomienda utilizar el máximo de bobinas ya que permitiría tener un mayor rango de regulación.

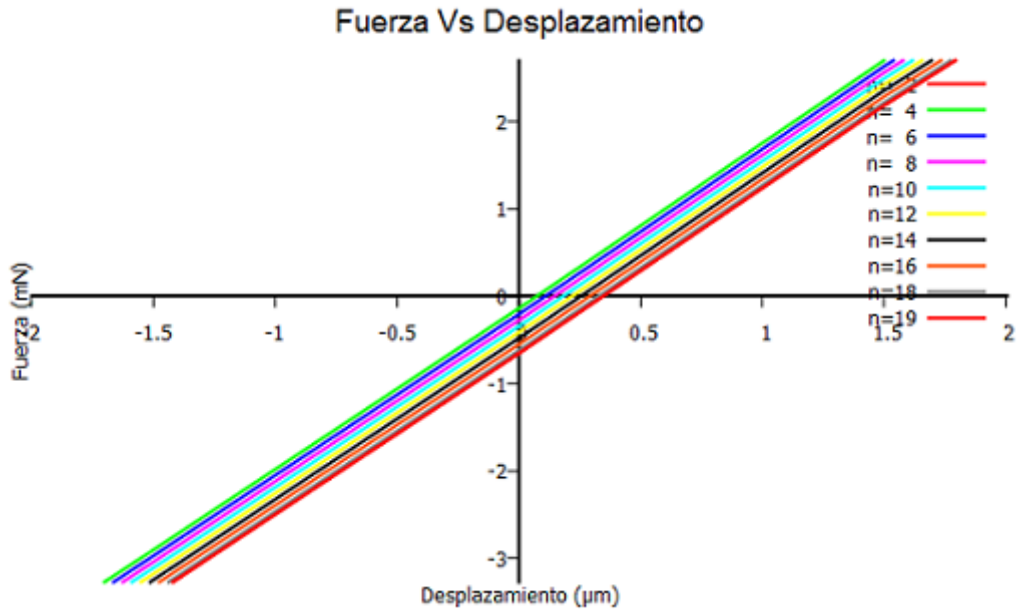


Figura 4.3.11: Fuerza entre los imanes del rotor y las bobinas de estator, Modelo N.4.

Por otra parte se ha calculado la rigidez dieléctrica k_i para cada uno de los modelos, esta

rigidez es calculada empleando la siguiente fórmula.

$$k_s = \frac{Fz}{I} \quad (4.3.5)$$

Donde F es la fuerza generada y I corresponde a la corriente utilizada. La rigidez dieléctrica dio como resultado un valor de

$$k_i = \frac{2}{0,3} = 6,66 \mu N/A \quad (4.3.6)$$

4.3.3. Análisis de sensibilidad de la fuerza axial ejercida en función del desplazamiento utilizando corriente y empleando el hierro

A continuación se presenta la gráfica que hace referencia a la relación existente entre la fuerza y el desplazamiento al momento de generarse una determinada perturbación, cuando se produce movimiento en el micromotor. Para hacer estas simulaciones solamente se usará el que presenta unas dimensiones más amplias y un mejor rango para el estudio.

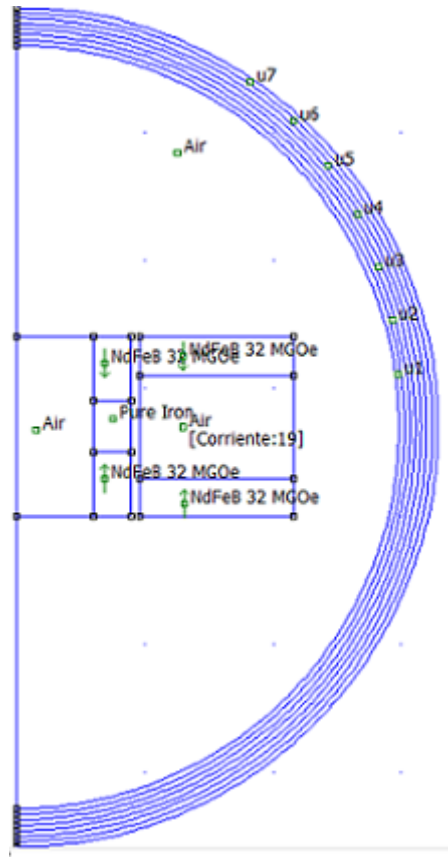


Figura 4.3.12: Diseño de los microcojinetes magnéticos .

Se malla la figura y se crean 6,861 nodos con 13,264 elementos, a continuación la figura presenta dicho mallado.

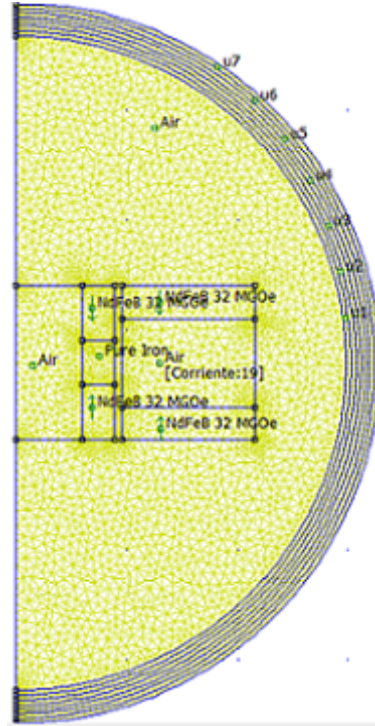


Figura 4.3.13: Geometría con IABC generada por la frontera abierta y mallada.

Por otra parte también se presenta el trazado de la densidad de flujo, a continuación la figura 4.3.14 refleja el flujo de densidad generado con el hierro. Se observa como la fuerza se centra principalmente al lado izquierdo en la zona que corresponde al hierro y a los imanes permanentes de esa zona.

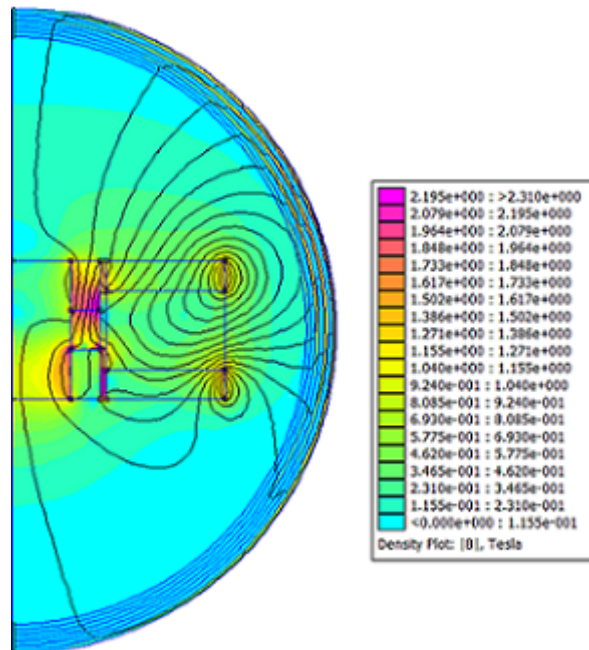


Figura 4.3.14: Trazado de la densidad de flujo.

Para realizar este análisis se utilizó el hierro como material conductor y se tomó el modelo N.4 ya que este presenta unas medidas mayores y un máximo de bobinas de 19. La gráfica 4.3.15 presenta la relación entre la fuerza y el desplazamiento utilizando como material conductor el hierro. Esta gráfica presenta un valor máximo de 22,66 mN con 2 bobinas. Estos valores son muy similares a las simulaciones realizadas con el mismo modelo pero utilizando como material conductor el aluminio, la única diferencia es el número de bobinado, ya que en el modelo del aluminio este presenta un bobinado de 4 con un valor de 22,64 mN.

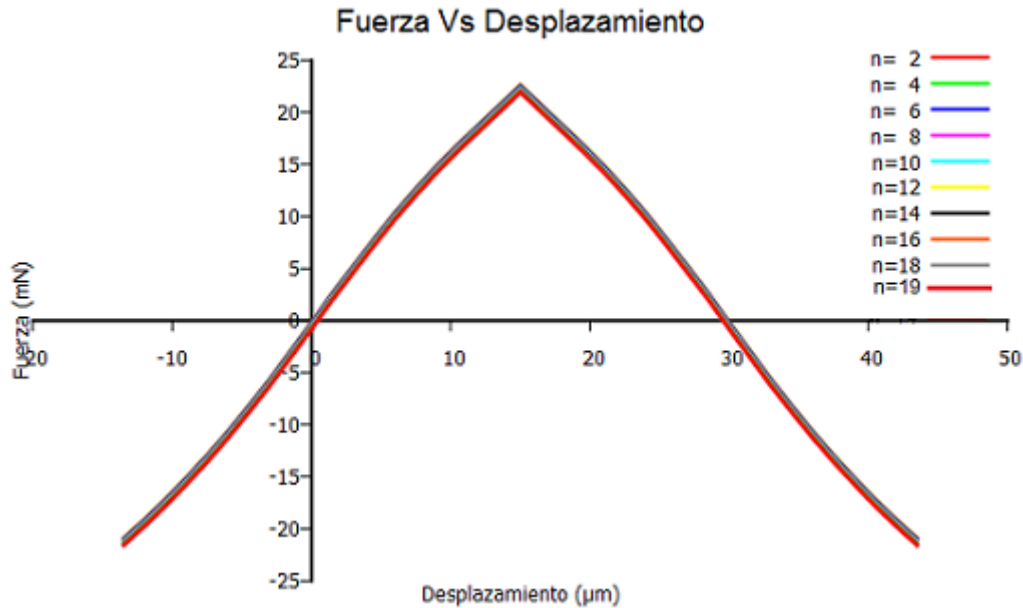


Figura 4.3.15: Relación entre la fuerza y el desplazamiento utilizando hierro, Modelo N.4.

Al igual que en las simulaciones anteriores se aplicó una corriente de 0,3 A y se tomó un gap de 2 μm . A continuación la gráfica 4.3.16 presenta cada una de las simulaciones aplicando un determinado número de bobinas. Se observa nuevamente que es recomendable utilizar el número máximo de bobinas ya que permitiría un mayor espacio de regulación. A diferencia de la simulación utilizando el aluminio, ésta presenta un mayor espacio ya que con un número de 19 bobinas corta en 0,5 μm , mientras que con el aluminio su corte es en 0,36 μm .

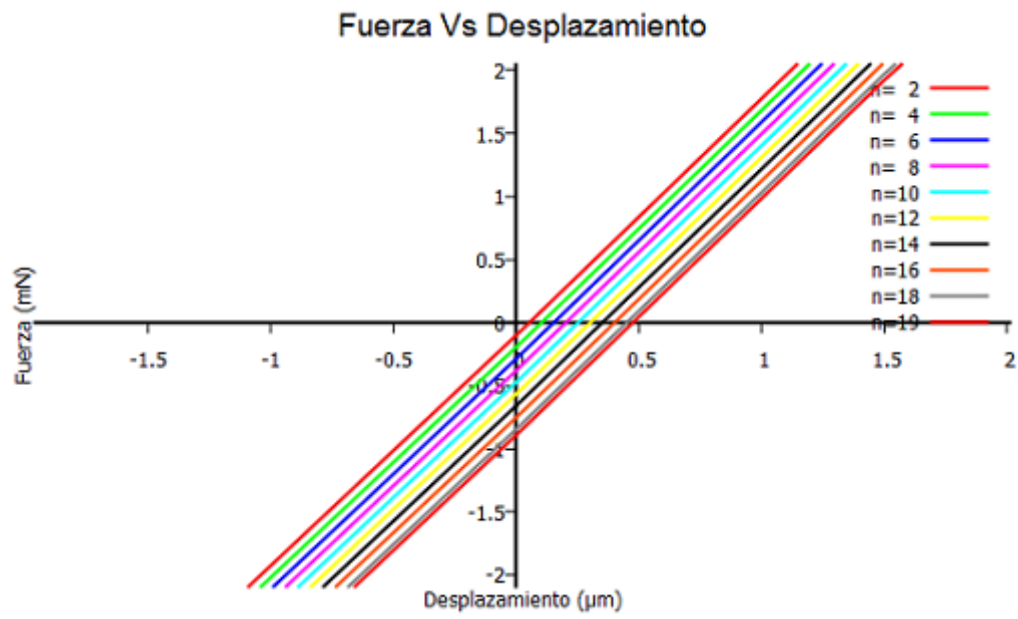


Figura 4.3.16: Relación entre la fuerza y el desplazamiento utilizando hierro, Modelo N.4.

Capítulo 5

Resultados obtenidos

Al realizar el análisis de los esfuerzos tangenciales y normales, se observó que el crecimiento de la velocidad de rotación en la fuerza tangencial se ve influenciada por la resistencia de la capa del conductor y aquellos que presentan un mayor valor en esta resistencia, muestran un menor par de arranque. Por otra parte se observa que los valores más pequeños en la resistencia son aquellos que tienen un par de arranque mayor. Mientras que los valores de la resistencia de la capa de rotación en la fuerza tangencial presentan un par máximo igual.

Al realizar el análisis por el método de los elementos finitos se observa cómo influye el diámetro de cada uno de los modelos, tanto en el número de bobinas como en el diámetro de regulación. La tabla 5.1 refleja la cantidad de bobinas calculadas para cada uno de los modelos planteados.

Como la corriente influye al momento de realizar las simulaciones, no es recomendable una corriente mayor a 0,3 A, por lo que tomando como base el artículo [6] se llegó a la conclusión de utilizar el número de bobinas, para no tener la necesidad de incrementar la corriente y de esa forma corregir las perturbaciones que se presenten.

Modelo	Medidas	Número de bobinas
1	80 x 40 μm	3
2	120 x 60 μm	7
3	140 x 90 μm	14
4	140 x 90 μm	19

Table 5.1: Número de bobinas para cada superficie.

Es importante mencionar que la fuerza en relación con el desplazamiento también se ve influenciada por el modelo durante la producción del movimiento. El modelo N.4 es el óptimo y el que generó mejores resultados al momento de realizar las simulaciones. Se observa que al emplear como elemento conductor el hierro este es más útil que el aluminio, por la misma razón que se ha mencionado anteriormente.

Capítulo 6

Resumen

En los primeros capítulos de este trabajo se trato de estudiar la historia del arte relacionada con los microcojinetes magnéticos aplicados a las micromáquinas de inducción electrostática, estudiando además tanto los principios como las limitaciones presentadas por estas técnicas de suspensión y levitación.

Por otra parte se realizó un pequeño estudio de todo lo que tiene relación con los micro-motores de inducción electrostáticos, se presentaron además las diferentes topologías que se encuentran actualmente de los microcojinetes magnéticos y se elaboraron dos diseños, uno de ellos simétrico y otro asimétrico, con medidas tomadas de algunos artículos encontrados que tratan sobre los microcojinetes magnéticos.

También se llevo a cabo un análisis de estos microcojinetes magnéticos por el método de los elementos finitos, presentando el diseño propuesto de los cuatro modelos de microcojinetes magnéticos, además de realizar un análisis de sensibilidad empleando dos elementos conductores como son el aluminio y el hierro, calculando para cada uno de ellos la fuerza de Maxwell, modificando la corriente en cada uno de estos casos.

Para terminar se presentan los resultados obtenidos, un pequeño resumen del trabajo efectuado, las conclusiones y las líneas futuras de trabajo.

6.1. Conclusiones

Inicialmente se presentó el diseño propuesto N.1, el cual presenta un microcojinete magnético asimétrico; este define todas las características que se ajustan a las necesidades de dichos microcojinetes, pero para mejorar la estabilidad del micromotor se presentó un segundo diseño el cual es simétrico y presenta las mismas características del modelo inicial, siendo prácticamente un duplicado del mismo, con iguales componentes ubicados en la parte superior de dicho micromotor, este segundo da mayor estabilidad al micromotor ya que controla mejor el desplazamiento del eje del rotor a velocidades muy altas ya, dado que contiene 2 pares de imanes permanentes; el primero en la parte inferior del micromotor y el segundo en la parte superior.

Al realizar el análisis de los esfuerzos tangenciales y normales se observó que el crecimiento de la velocidad de rotación en la fuerza tangencial, se ve influenciada por la resistencia de la capa del conductor y aquellos que presentan un mayor valor en esta resistencia muestran un menor par de arranque, las que presentan valores más pequeños en la resistencia son aquellas que tienen un par de arranque mayor. Por otro lado, se observa también que para todos los valores de la resistencia de la capa de rotación en la fuerza tangencial se presenta un par máximo igual.

Además, se realizó un análisis de sensibilidad utilizando el método de los elementos finitos, con este método se realizaron las simulaciones relacionadas con el número de bobinas y la corriente, empleando para esto cuatro modelos con diferentes tamaños; se observa cómo el tamaño del modelo influye y mejora el espacio de regulación del micromotor, ya que a mayor medida mayor espacio para regular.

Al realizar el análisis de sensibilidad utilizando como elemento conductor el hierro, se observa que presentan un mayor espacio regulador por lo cual es mejor utilizar este elemento. Por otra parte, se observa que empleando el aluminio y el hierro al momento de realizar el trazado de la densidad de flujo, las corrientes inducidas se centran principalmente en la región donde se encuentran dichos elementos.

6.2. Líneas futuras de trabajo

A continuación se presentan algunas sugerencias de líneas futuras de trabajo.

1. Diseño de reguladores óptimos para sistemas de lazo cerrado.
2. Diseño de un programa de algoritmos genéticos para la creación del modelo que mas se adecue a las necesidades del momento.
3. Fabricación del modelo empleando como base la tecnología aplicada en el artículo [3], el cual crea un microcojinete magnético.

Bibliografia

- [1] . Aplicaciones, 2013. URL <http://www.hindawi.com/journals/je/2013/537986/>. l.
- [2] . Launchpoint, 2014. URL <http://www.launchpnt.com/portfolio/biomedical/pediaflow-pediatric-vad/>. l.
- [3] V. Badilita, K. Kratt, T. Burger, J.G. Korvink, and U. Wallrabe. 3d high aspect ratio, mems integrated micro-solenoids and helmholtz micro-coils. In *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2009. TRANSDUCERS 2009. International*, pages 1106–1109, June 2009. doi: 10.1109/SENSOR.2009.5285923.
- [4] M V Berry and A K Geim. Of flying frogs and levitrons. *European Journal of Physics*, 18(4):307, 1997. URL <http://stacks.iop.org/0143-0807/18/i=4/a=012>.
- [5] Mei-Lin Chan, B. Yoxall, Hyunkyu Park, Zhaoyi Kang, I. Izyumin, J. Chou, M.M. Megens, M.C. Wu, B.E. Boser, and D.A. Horsley. Low friction liquid bearing mems micromotor. In *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2011 IEEE 24th International Conference on*, pages 1237–1240, Jan 2011. doi: 10.1109/MEMSYS.2011.5734656.
- [6] Tsung-Shune Chin. Permanent magnet films for applications in microelectromechanical systems. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pages 75–79, June 2000. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00649-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00649-6).
- [7] O. Cugat, J. Delamare, and G. Reyne. Magnetic Micro-actuators and Systems (MAGMAS). *Magnetics, IEEE Transactions on*, 39(6):3607 – 3612, nov. 2003. ISSN 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.2003.816763.
- [8] N. Ghalichechian, A. Modafe, M.I. Beyaz, and R. Ghodssi. A rotary micromotor supported on microball bearings. In *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2007. TRANSDUCERS 2007. International*, pages 1123–1126, June 2007. doi: 10.1109/SENSOR.2007.4300332.
- [9] N. Ghalichechian, M. McCarthy, M.I. Beyaz, and R. Ghodssi. Measurement and modeling of friction in linear and rotary micromotors supported on microball bearings. In *Micro Electro Mechanical Systems, 2008. MEMS 2008. IEEE 21st International Conference on*, pages 507–510, Jan 2008. doi: 10.1109/MEMSYS.2008.4443704.
- [10] Nima Ghalichechian, Alireza Modafe, M.I. Beyaz, and R. Ghodssi. Design, fabrication, and characterization of a rotary micromotor supported on microball bearings. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 17(3):632–642, June 2008. ISSN 1057-7157. doi: 10.1109/JMEMS.2008.916346.
- [11] M K Ghantasala, L Qin, D K Sood, and R B Zmood. Design and fabrication of a micro magnetic bearing. *Smart Materials and Structures*, 9(2):235, 2000. URL <http://stacks.iop.org/0964-1726/9/i=2/a=404>.

- [12] R. Ghodssi, B. Hanrahan, and M. Beyaz. Microball bearing technology for mems devices and integrated microsystems. In *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS), 2011 16th International*, pages 1789–1794, June 2011. doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2011.5969887.
- [13] P.-A. Gilles, J. Delamare, and O. Cugat. Rotor for a brushless micromotor. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pages 1186 – 1189, June 2002. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-8853\(01\)01286-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-8853(01)01286-0).
- [14] Fengtian Han, Zhenbin Fu, and Jingxin Dong. Design and simulation of an active electrostatic bearing for mems micromotors. In *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2009. NEMS 2009. 4th IEEE International Conference on*, pages 80–85, Jan 2009. doi: 10.1109/NEMS.2009.5068531.
- [15] B V Jayawant. Electromagnetic suspension and levitation. *Reports on Progress in Physics*, 44(4):411, 1981. URL <http://stacks.iop.org/0034-4885/44/i=4/a=002>.
- [16] Wang Jiangbo, Li Chunsheng, Xu Wei, and Yang Baofeng. Optimization design of linear halbach array for eds maglev. In *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*, pages 1–5, Sept 2008. doi: 10.1109/VPPC.2008.4677556.
- [17] J.R Quinn. fem, 2010. URL <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>. l.
- [18] M.H. Kimman, H.H. Langen, J. Van Eijk, and R.M. Schmidt. Design and realization of a miniature spindle test setup with active magnetic bearings. In *Advanced intelligent mechatronics, 2007 IEEE/ASME international conference on*, pages 1–6, Sept 2007. doi: 10.1109/AIM.2007.4412502.
- [19] J.H. Lang and S.F. Bart. Toward the Design of Successful Electric Micromotors. In *Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 1988. Technical Digest., IEEE*, pages 127 –130, jun 1988. doi: 10.1109/SOL-SEN.1988.26458.
- [20] Kai Liu, Weiping Zhang, Wenyuan Chen, Kai Li, Fuyan Dai, Feng Cui, Xiaosheng Wu, Gaoyin Ma, and Qijun Xiao. The development of micro-gyroscope technology. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(11):113001, 2009. URL <http://stacks.iop.org/0960-1317/19/i=11/a=113001>.
- [21] S.F. Nagle, C. Livermore, L.G. Frechette, R. Ghodssi, and Jeffrey H. Lang. An electric induction micromotor. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 14(5):1127–1143, Oct 2005. ISSN 1057-7157. doi: 10.1109/JMEMS.2005.851816.
- [22] M.D. Noh, J.F. Antaki, M. Ricci, J. Gardiner, E. Prem, H.S. Borovetz, and B.E. Paden. Magnetic levitation design for the pediaflow ventricular assist device. In *Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on*, pages 1077–1082, July 2005. doi: 10.1109/AIM.2005.1511153.
- [23] Chi Nan Pai, Tadahiko Shinshi, and Akira Shimokohbe. Sensorless measurement of pulsatile flow rate using a disturbance force observer in a magnetically levitated centrifugal blood pump during ventricular assistance. *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(1):33 – 39, 2010. ISSN 0955-5986. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2009.11.003>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598609000521>.
- [24] V.D. Samper, A.J. Sangster, U. Wallrabe, R.L. Reuben, and J. K. Grund. Advanced liga technology for the integration of an electrostatically controlled bearing in a wobble micromotor. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 7(4):423–427, Dec 1998. ISSN 1057-7157. doi: 10.1109/84.735351.
- [25] Jan Sandtner and Hannes Bleuler. Electrodynamic passive magnetic bearing with planar halbach arrays.

- [26] E. Sarajlic, C. Yamahata, M. Cordero, and H. Fujita. Three-phase electrostatic rotary stepper micromotor with a flexural pivot bearing. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 19(2):338–349, April 2010. ISSN 1057-7157. doi: 10.1109/JMEMS.2010.2040139.
- [27] Gerhard Schweitzer, H Bleuler, Eric H Maslen, M Cole, P Keogh, R Larssonneur, E Maslen, Y Okada, G Schweitzer, A Traxler, et al. *Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery*. Springer, 2009.
- [28] C Mike Waits, Bruce Geil, and Reza Ghodssi. Encapsulated ball bearings for rotary micro machines. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17(9):S224, 2007. URL <http://stacks.iop.org/0960-1317/17/i=9/a=S03>.
- [29] S. G. Wilkinson, P.H. Mellor, and D. Holliday. Design of a magnetic bearing for high speed rotating micro-machines. In *Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International*, volume 2, pages 570–574 vol. 1, Sept 2004.
- [30] W.S.H. Wong, W. K S Pao, D. Holliday, and P.H. Mellor. Design and modeling of an electromagnetic levitated and actuated micromotor. In *Semiconductor Electronics, 2006. ICSE '06. IEEE International Conference on*, pages 309–313, Oct 2006. doi: 10.1109/SMELEC.2006.381071.
- [31] Wenming Zhang, Guang Meng, and Hongguang Li. Electrostatic Micro-motor and its Reliability. *Microelectronics Reliability*, 45(7-8):1230 – 1242, 2005. ISSN 0026-2714. doi: DOI: 10.1016/j.microrel.2004.12.017. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V47-4FWS7K6-1/2/04c9622c8e87249b7e17263a99bff0ce>.