



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE
QUERÉTARO**



Facultad de Ingeniería

Campus San Juan del Río

TESIS

**Rodamiento magnético aplicado a un
aerogenerador de flujo axial**

Como parte de los requisitos para obtener el
grado de:

Maestro en Ciencias (MECATRÓNICA)

Presenta:

Isac Andrés Espinosa Vizcaíno

Director: **Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa**

SAN JUAN DEL RÍO, QUERÉTARO

DICIEMBRE 2018





Universidad autónoma de Querétaro
Facultad de ingeniería
Maestría en Ciencias (Mecatrónica)

Rodamiento magnético aplicado a un aerogenerador de flujo axial

Opción de titulación
Tesis

Como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en ciencias (Mecatrónica)

Presenta:
Isac Andrés Espinosa Vizcaíno

Dirigido por:
Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
Presidente



Firma

Dr. Miguel Trejo Hernández
Secretario



Firma

Dr. Juan Primo Benítez Rangel
Vocal



Firma

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos
Suplente

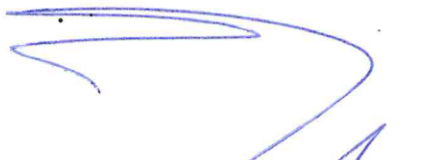


Firma

Dr. Jesús Rooney Rivera Guillén
Suplente



Firma



Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la facultad



Firma

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de investigación y posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Septiembre 2017

DEDICATORIA

**A mis padres
A quienes debo lo que tengo y lo que soy**

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, quien me regaló su amor eterno

A mi padre, quien me educó con cariño y valores

A mis hermanos, quienes han sido parte fundamental de mi desarrollo y me han otorgado los mejores momentos de la vida.

A Andrés y Héctor, quienes me han hecho conocer lo que vale el amor y el sacrificio de un padre.

Al Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa por el apoyo y la confianza brindada para el desarrollo del proyecto.

A cada docente que ayudo a mi formación como profesional.

A mis compañeros, quienes me han ayudado en los momentos más difíciles y felicitado en los mejores.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por ser mi segundo hogar y darme los medios para estudiar la maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada para la realización de mis estudios de Maestría en la Universidad Autónoma de Querétaro.

RESUMEN

En este trabajo se evaluará la viabilidad de fabricar un aerogenerador de eje horizontal aplicando un rodamiento magnético. Ya se conocen aerogeneradores de flujo radial y eje vertical que aplican la tecnología de levitación magnética para realizar el soporte de las aspas, en este caso se plantea diseñar un aerogenerador de flujo axial y eje horizontal en el cual se puedan eliminar los elementos centrales para tener una mejor captación del viento y una menor fricción por parte del soporte utilizando rodamientos magnéticos. Se plantea la fabricación del sistema de generación eléctrica alrededor de la turbina eólica con el fin de aprovechar de mejor manera el viento, así se evita que los elementos del sistema generen turbulencia o cambios de dirección de viento no deseados. Por otra parte la implementación de los rodamientos magnéticos disminuirá los costos debido a fallas de elementos como son los baleros o la caja multiplicadora del generador, los cuales tienen problemas debidos al desgaste, la falta de lubricación o los factores debidos a la interacción con el ambiente. Se plantea el uso de estos sistemas a un nivel doméstico, con estos sistemas se pueden aprovechar las corrientes de viento alrededor de los edificios ubicados en zonas urbanas.

(Palabras Clave: levitación magnética, aerogenerador, rodamiento magnético, generador eléctrico)

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	12
2. ANTECEDENTES.....	14
3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	21
4. JUSTIFICACIÓN	22
5. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	23
5.1 Objetivo General.....	23
5.2 Objetivos Particulares.....	23
5.3 Hipótesis	24
6. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	25
Diseño eléctrico	30
7. METODOLOGÍA	32
7.1 Software	32
7.2 Diseño de los álabes	33
Clima en Querétaro, Qro. el tiempo en 2013	33
7.3 Cálculo de la energía cinética del viento en función de su velocidad. .	35
7.4 Selección y Diseño de la suspensión magnética.....	39
7.4.1 Cojinetes magnéticos.....	39
7.4.2 Cojinetes activos	40
7.4.3 Cojinetes híbridos	42
7.4.4 Selección del soporte	42
7.4.5 Configuración de los imanes para el rodamiento magnético	46
8. VALIDACIÓN Y RESULTADOS	63
9. CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS.....	81
10. REFERENCIAS	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zona de intrados y estrados en un perfil alar	25
Figura 2. Efectos del viento a través de un perfil alar	26
Figura 3. Elementos de un perfil alar	26
Figura 4. Fuerzas actuantes en un perfil alar	27
Figura 5. Gráfica de relación C/C_d	27
Figura 6. Componentes del viento relativo en un perfil alar.	28
Figura 7. Acción del viento sobre las palas de una turbina	29
Figura 8. Configuración de imanes en “V” para simular un rodamiento cónico .	46
Figura 9. Campo magnético de la configuración en “V” en una zona estable. ..	47
Figura 10. Campo magnético de la configuración en “V” a menor distancia	47
Figura 11. Configuración de imanes en “V” con un disturbio pronunciado	48
Figura 12. Campo magnético de la configuración en “V” con un disturbio menor	49
Figura 13. Campo magnético de la configuración en “V” con un disturbio mayor	49
Figura 14. Campo magnético estable de la 2º configuración propuesta	50
Figura 15. Campo magnético de la 2º configuración propuesta con un disturbio menor.....	50
Figura 16. Campo magnético de la 2º configuración propuesta con un disturbio mayor	51
Figura 17. Campo magnético de la 2º configuración propuesta con un disturbio mayor	51
Figura 18. Tercera configuración de imanes propuesta en estado estable	52
Figura 19. Campo magnético estable de la tercera configuración propuesta....	52

Figura 20. Tercera configuración de imanes propuesta con un disturbio menor	53
Figura 21. Campo magnético estable de la tercera configuración propuesta con un ligero disturbio	54
Figura 22 Tercera configuración de imanes propuesta con un disturbio radialmente	55
Figura 23. Campo magnético estable de la tercera configuración con un ligero disturbio radial	55
Figura 24. Campo magnético inestable de la tercera configuración con un disturbio radial y axial	56
Figura 25. Balero magnético para soportar cargas axiales y radiales	57
Figura 26. Configuración para contener las fuerzas radiales y axiales independientemente	57
Figura 27. Campo magnético para la cuarta configuración propuesta.	58
Figura 28 Simulación de un rodamiento de acción axial y radial con un corte lateral.	59
Figura 29 Simulación de un rodamiento de acción axial y radial con un corte lateral girado en sentido horario y desplazado verticalmente 2mm	60
Figura 30 Simulación de un rodamiento de acción axial y radial con un corte lateral desplazado a la derecha 0.9mm y desplazado verticalmente 0.9mm	61
Figura 31 Simulación de un rodamiento de acción axial con un corte lateral desplazado a la derecha 2mm.....	61
Figura 32 Simulación del rodamiento magnético de acción axial con un corte lateral y un giro en sentido horario del rotor.	62
Figura 33. Perfiles NACA 2515 y 9515.....	63

Figura 34. Gráficas C_l/C_d de los perfiles NACA 2515 al 9515	63
Figura 35. Perfiles NACA 8415 y 8715.....	64
Figura 36. Gráficas C_l/C_d de los perfiles NACA 8415 al 8715	65
Figura 37. Perfiles NACA 8605 y 8625.....	65
Figura 38. Gráficas C_l/C_d de los perfiles NACA 8605 al 8625	66
Figura 39. Gráficas C_l vs α de los perfiles NACA 8605 al 8625	67
Figura 40. Perfil NACA 8610.....	67
Figura 41. Gráfica C_l del perfil NACA 8610.....	68
Figura 42. Gráfica C_d del perfil NACA 8610.....	68
Figura 43. Vista en 3D del al turbina diseñada con Qblade.....	69
Figura 44. Curvas de potencia de la máquina.....	69
Figura 53. Diseño del perfil NACA 8610 en Inventor	70
Figura 54. Vista en 3D del diseño de la turbina de viento en Inventor.....	71
Figura 55. Modelo en Inventor del aro que rodea los álabes	71
Figura 56 modelo de las aspas y aro impresos en polímero ABS	71
Figura 57. Imanes del rodamiento magnético del rotor.	72
Figura 58. Carcasa en vista superior con imanes del rodamiento magnético del estator	73
Figura 59. Carcasa en vista inferior	73
Figura 60. Vista a detalle de los imanes del estáticos del rodamiento magnético	74
Figura 61. Eje y soporte del eje para la restricción radial.	75
Figura 62. Sistema físico ensamblado	75
Figura 63. Vista a detalle del buje para restringir la posición radial	76
Figura 64. Vista frontal del modelo físico	76

Figura 65. Vista trasera del modelo físico.....	77
Figura 66. Túnel de viento, vista lateral.	78
Figura 67. Túnel de viento, vista frontal.	78
Figura 68. Modelo puesto a prueba en el túnel de viento	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Calibre de conductores.....	32
Tabla 2. Datos climáticos del año 2010	34
Tabla 3. Datos climáticos del año 2011	34
Tabla 4. Datos climáticos del año 2012	34
Tabla 5. Datos climáticos del año 2013	34
Tabla 6. Datos climáticos del año 2014	34
Tabla 7. Datos climáticos del año 2015	35
Tabla 8. Velocidad promedio del viento en Querétaro del 2006 al 2013	35
Tabla 10. Tabla para la selección del tipo de soporte	43
Tabla 10. Relación C_l/C_d máxima para los perfiles NACA 2515 al 9515	64
Tabla 11. Relación C_l/C_d máxima para los perfiles NACA 8415 al 8715	65
Tabla 12. Relación C_l/C_d máxima para los perfiles NACA 8605 al 8625	66
Tabla 13. Parámetros del perfil a diseñar.	68
Tabla 15. Coordenadas para el diseño del perfil alar.	70

1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de producción de electricidad en México se realiza mediante el empleo de combustibles fósiles altamente contaminantes que han repercutido drásticamente en el medio ambiente. Sin embargo, ya se han tomado algunas medidas para reducir el uso de energías fósiles, tal es el ejemplo de las centrales hidroeléctricas, conversión de energía solar a eléctrica y uso de generadores eólicos, por mencionar algunos. El principal problema del uso de las energías alternas es que su empleo requiere un elevado costo inicial en comparación, por ejemplo, a construir una red eléctrica para suministrar energía a una pequeña comunidad. Una opción para reducir el consumo de combustibles fósiles es el establecimiento de aerogeneradores de pequeña capacidad en edificios. Si se piensa en una microturbina eólica se verá que, aunque su costo inicial se pague así mismo en un cierto tiempo, el hecho de pertenecer a un particular atrae inconvenientes en lo que a mantenimiento respecta, mientras una empresa de suministro de electricidad toma responsabilidad de los daños que puedan ocurrir a la red eléctrica, el dueño de un aerogenerador debe hacerse responsable del mantenimiento del mismo.

Lo anterior mencionado es un factor importante del por el cuál no se hace uso en gran escala de sistemas de generación de energía alterna tan simples como los generadores eólicos. Éste sector energético puede tomar un importante avance en aplicación si se plantea el desarrollo de un aerogenerador con mejores características en cuanto funcionabilidad y mantenimiento se refiere. En este trabajo se plantea el diseño y desarrollo de un aerogenerador más simple en construcción y más eficiente en comparación a los tradicionales aerogeneradores de eje horizontal que emplean rodamientos de contacto, de igual forma se busca que sea capaz de generar electricidad con baja velocidad del viento y no requiera grandes gastos en mantenimiento.

Si bien no es posible reducir en gran medida el costo de materiales y elaboración aun así contar con una opción que nos ofrezca tales características descritas es una ventaja que pone la pauta para hacer un mayor uso de generadores eólicos.

Actualmente existe un gran avance en el modelado de álabes para turbinas así como muchos diseños de generadores que convierten la energía mecánica a

eléctrica con una gran eficiencia, sin embargo no se ha prestado gran atención a los rodamientos, los cuales pueden influir considerablemente en la eficiencia total de la máquina.

Cualquier balero de contacto proporciona un cierto grado de fricción, lo cual se traduce en deficiencia mecánica y, que al paso del tiempo por cuestiones de desgaste o falta de lubricación, esta deficiencia incrementa considerablemente, más aun sabiendo que los generadores eólicos son máquinas que trabajan comúnmente a la intemperie.

La opción para para enfrentar el problema de fricción en los rodamientos es la aplicación de la tecnología de levitación magnética (MAGLEV, magnetic levitation). Lo que se plantea con la aplicación de esta tecnología es dotar al aerogenerador de un soporte magnético.

En aplicaciones existen tres tipos de soportes magnéticos, los cuales son.

- * Soportes magnéticos pasivos: de imanes permanentes.
- * Soportes magnéticos activos: de electroimanes.
- * Soportes magnéticos híbridos: combinación de los anteriores.

Teniendo un soporte que nos garantice menor fricción no solo se gana en la cuestión de eficiencia total, también se puede lograr que el aerogenerador en cuestión trabaje con velocidades menores de viento que en el caso de los aerogeneradores soportados por rodamientos de contacto.

2. ANTECEDENTES

Diversos trabajos se han desarrollado en la cuestión de generación de energía eléctrica a través del empleo de aerogeneradores, ahora se revisarán las innovaciones últimas efectuadas en diseño de aspas, microturbinas eólicas, en el diseño aerodinámico, la reducción del par de frenado y aerogeneradores MAGLEV.

Cuando se habla de un aerogenerador, se puede decir que lo más destacable es el diseño de las aspas. A través de los últimos años se han realizado importantes aportes en este rubro.

Díaz et al. (2006) describieron un ambiente de diseño automático realizado para generar el perfil de un aspa para aerogenerador óptimo. La finalidad de este trabajo fue proporcionar una herramienta que permitiera la creación de un aspa para aerogenerador adaptada a una locación específica con condiciones particulares de viento. El módulo creado consiste principalmente en tres etapas, la primera es el bloque para la búsqueda de la solución, el segundo es un bloque de evaluación en el cual puede o no participar el usuario, el tercero y último consiste en la distribución computacional. En este ejemplo se aprecia la realización de un sistema automatizado en el cual se introducen los parámetros de viento y especificaciones del aerogenerador para encontrar una solución. Otro ejemplo es en el cual Zhang et al. (2009) hicieron un método para optimizar la longitud de la cuerda y ángulo de ataque de un aspa para aerogenerador, lo anterior mencionado fue realizado de acuerdo a algoritmos genéticos y cálculos basados en el método de impulso para un elemento aspa (BEM, Blade Element Momentum). Las verificaciones se realizaron mediante el método de dinámica de fluidos computacional (CFD, Computational Fluid Dynamics). Aquí se aprecia el uso de un algoritmo de optimización combinado con dos métodos para obtener una solución. Liu et al. (2011) propusieron un modelo de cálculo para los parámetros aerodinámicos y el perfil de un aerogenerador de eje horizontal de acuerdo a la *strip theory*, (la cual es una combinación entre la teoría de impulso

y la teoría de impulso para un elemento aspa), este es un método para diseñar aspas y aerodinámica de los sistemas muy frecuentemente usado. Tarfaoui et al. (2013) realizaron un análisis modal con la finalidad de calcular los efectos del diseño de la sección transversal de los largeros sobre el comportamiento dinámico de un aspa de un aerogenerador hecho de materiales compuestos. El método de elemento finito fue realizado en ABACUS (programa para simular que aplica el método de elementos finitos). Tarfaoui y su equipo se enfocaron en el modelo dinámico del sistema, independientemente a que el cálculo realizado por ellos fue enfocado al uso de materiales compuestos, los procedimientos que ellos realizaron son aplicables para cualquier material utilizado, la obtención del modelo mecánico es de gran utilidad puesto que, para el caso del trabajo presentado aquí, este puede ser de gran ayuda para los cálculos del soporte magnético. Stylianidis et al. (2014) realizaron investigaciones en las cuales proponen un método de optimización para el diseño aerodinámico de las aspas de un aerogenerador considerando las restricciones de fabricación. Este trabajo está argumentado en que los métodos convencionales para el diseño de aspas no contemplan las variables del maquinado observándose una diferencia entre la eficiencia real e ideal del producto. Ellos utilizan un método basado en algoritmos genéticos para realizar el mejoramiento de una variable de salida de interés, en este caso la potencia de salida, en función de las diversas variables de entrada. Aquí se observa un ejemplo orientado a los procesos de manufacturación de aspas, el autor de este trabajo acentúa que se puede tener un mejor rendimiento del producto si se modela un proceso de fabricación que otorgue un producto más apegado a la realización ideal. Rapin et al. (2015) desarrollaron métodos para realizar el diseño de las aspas así como de un sistema de tobera para mejorar la eficiencia del sistema, por encima del diseño de las aspas ellos se enfocaron en el diseño de la tobera, la cual es de utilidad para incrementar el flujo de masa de aire, incrementando con esto la potencia de salida. Rapin y su equipo de trabajo proponen aquí que la forma de hacer más eficiente un sistema de este tipo no está solo en generar perfiles de aspas más adecuadas, sino también en el empleo de toberas diseñadas para mejorar la captación del viento en formas óptimas.

El diseño de micro turbinas es, en ciertos aspectos, diferente al de las turbinas de viento de gran capacidad. Ying et al. (2012) diseñaron un aerogenerador que tiene la finalidad de ser situado sobre edificios en áreas urbanas para aprovechar las corrientes de viento local. Su diseño cuenta con más de 20 aspas, de igual forma cuenta con una serie de veletas entre la entrada de viento y la turbina que sirve para cambiar la dirección del viento, el diseño se realizó basándose en el principio de turbinas de acción y ha sido probado mediante (CFD). Aquí se aprecia la flexibilidad del diseño de micro turbinas, ellos salieron de los modelos tradicionales de tres aspas colocando una cantidad de 20, es interesante ver que atacan el problema de la dirección de entrada del viento proveyendo un sistema redireccionador de viento. Kolter et al. (2012) contribuyeron en dos aspectos con relación al diseño de microturbinas, desarrollaron un actuador completo para variar el ángulo de paso de las aspas para una micro turbina de viento, ellos mencionan que las condiciones variantes de viento genera reacciones diferentes sobre cada aspa, con esto argumentan la necesidad de controlar individualmente el ángulo de paso de cada aspa. De igual forma desarrollan un método para realizar una optimización online aplicada en la turbina para maximizar la potencia de salida. McGowan et al. (2012) desarrollaron un modelo computacional para guiar el diseño y predicción de perfiles para un micro aerogenerador de eje vertical. La formación de su modelo es validado contra modelos predictivos y datos tomados de la literatura. Los efectos del número de Reynolds y algunas variaciones son modelados para mejorar el modelo de predicción. Se puede replantear este modelo para las turbinas de eje horizontal. Drumheller et al. (2015) realizaron la descripción de microturbinas de viento para generar una capacidad aproximada de 10 W que sería útil para cargar dispositivos electrónicos como celulares. Ellos proponen la producción de estas turbinas utilizando la impresión 3D puesto que mencionan el bajo costo de este método de producción. Aquí se introduce el uso de la impresión 3D, la propuesta de Drumheller es interesante aunque en ciertos puntos de vista limitada puesto que la impresión 3D está más orientada a la fabricación de prototipos y los acabados no son de la mejor calidad posible.

En la cuestión del diseño aerodinámico se puede resaltar lo siguiente.

Dong et al. (2009) realizaron en su trabajo un estudio sobre el diseño aerodinámico de una turbina eólica de eje horizontal (HAWT, Horizontal Axis Wind Turbine), para este análisis se introduce el método de optimización Schmitz en el cual se consideran las diferentes pérdidas aerodinámicas y dos parámetros físicos reales son introducidos en lugar de los factores del método Wilson. Una vez realizado el diseño se procede a corregir el largo de la cuerda, así como el ángulo de ataque mediante el principio de máxima energía del viento capturada. Chen et al. (2010) construyeron un sistema capaz de aprender. A partir de una base datos genera un nuevo diseño de acuerdo a las características originales. Su estudio estuvo basado en una red neuronal artificial (ANN, Artificial Neural Network), este es un método aplicado para el diseño aerodinámico inteligente de perfiles alares. Jiang et al. (2011) mencionaron un método de simulación aerodinámica de forma numérica, la predicción del perfil de aerogeneradores que puede ayudar a los investigadores a entender el perfil aerodinámico, así como las características de las aspas. Con su método propuesto predicen que se acortará el ciclo de proceso de diseño y se reducirá el costo de experimentación. Congxin et al. (2011) utilizaron un método conocido como optimización de enjambre de partículas (PSO, particle swarm optimization), el cual es un método que evoca el comportamiento de las abejas, este método fue utilizado en conjunto con la teoría de HAWT para realizar los cálculos y la optimización aerodinámica de un aerogenerador de eje horizontal, ellos adoptaron la corrección de la velocidad del viento mediante el análisis de la alteración de la circulación de aire a través de las aspas del rotor. Zhang et al. (2014) programaron, como el nombre de su artículo lo dice, una herramienta de software para realizar la optimización estructural y las configuraciones de los materiales para un aspa de aerogenerador adaptativa. Esta herramienta de software es requerida para que un diseñador pueda definir varias configuraciones de acoples elásticos y entonces así analizar la respuesta del aspa en términos del giro producido respecto a un punto de referencia dado. El software la sección de succión y presión están construidas en base a un número de trapecoides, cada trapecoide tiene su material de construcción y con sus configuraciones.

Ahora bien, uno de los problemas más grandes es el torque de frenado producido por las fuerzas entre los imanes permanentes del rotor y las muescas metálicas del estator. Por lo tanto se han realizado diversas investigaciones en torno a esta problemática y diversas soluciones han surgido para erradicarlo en la manera mayor posible. Sivachandran et al. (2008) realizaron una investigación para realizar la reducción del torque de frenado, su investigación se enfocó en aerogeneradores con doble rotor de imanes permanentes de flujo radial. Los métodos utilizados fueron el cambio de ancho de los polos magnéticos y el cambio del ancho de las aperturas de las muescas. Para realizar el análisis se basaron en elementos finitos. Deng et al. 2009 investigaron la influencia de algunos parámetros que propician el torque de frenado en los generadores síncronos de imanes permanentes. Encontraron que la combinación entre número de polos y de muescas tiene un efecto importante sobre el torque de frenado. He & Wang (2011) presentaron dos métodos para minimizar el torque de frenado en los aerogeneradores de imanes permanentes en condiciones de bajas velocidades de viento. Los métodos son la optimización del arco polar magnético y la optimización del juego entre muescas y polos. Ellos proponen un simple modelo original del mecanismo del torque de frenado y un análisis de Fourier. Los métodos son aplicados para diseñar los generadores de imanes permanentes a bajas velocidades de viento y su perfil es calculado por elementos finitos. Islam et al. (2012) llevaron a cabo un estudio acerca del torque de frenado, el rizado de torque y el análisis de la vibración debido a las fuerzas radiales. El estudio es realizado utilizando el método de Elemento Finito en donde las fuerzas son calculadas usando el método de tensor de esfuerzos de Maxwell, y la vibración es obtenida utilizando superposición modal. Lee & Jung (2013) diseñaron una estructura electromagnética pensada para reducir el torque de frenado, esta estructura está diseñada con rotores de tipo interno y externo, este diseño fue nombrado generador de imanes permanentes de doble estator. Para reducir el torque de frenado primero se diseñó el emparejamiento de los dientes del estator, después el desplazamiento del rotor, finalmente se tomaron estos aspectos para diseñar simultáneamente. Lee et al. (2013) diseñaron un generador de imanes permanentes de flujo radial de rotor externo con la finalidad de reducir el torque de frenado, el diseño de este fue calculado por el método de análisis por elementos finitos en dos dimensiones. Para reducir el par de frenado

primero se diseña el radio del arco de los polos de los imanes permanentes, posteriormente se diseña el perfil de los imanes, finalmente el radio del arco polar y la estructura de los imanes son llevadas a cabo. Lee et al. (2014) realizaron un estudio en el cual buscaban reducir el par de detención un sistema de generación que emplea imanes permanentes. A pesar de que la manera más conocida de reducir el par de detención es colocar un determinado número de polos para un determinado número de ranuras del estator, ellos encontraron que se puede corregir el par de frenado modificando el perfil de los imanes de una forma curva así como hallando una buena relación del arco de los polos. Aunque modificar el perfil de los imanes produce la generación de menor voltaje, dependiendo cual es la variación del perfil, el par de frenado se reduce drásticamente trayendo ventajas al sistema. Jia et al. (2015) plantearon que los generadores de imanes permanentes de flujo transversal pueden ser especialmente usables para aerogeneradores debido a su gran número de polos y gran densidad de campo. Basándose en una construcción de doce pares de polos, de igual forma en la influencia que los radios del aro del estator y el núcleo del rotor tiene sobre el par de detención el método por elemento finito en tres dimensiones (3D-FEM) es utilizado para investigar la distribución de campos magnéticos y la relación de medidas. Ahora bien, estos investigadores realizaron modelos en los cuales sesgaban el núcleo del rotor para mejorar el enlace de flujo y minimizar el par de detención del generador.

Ya habiendo revisado algunos de los aportes que se han realizado en relación a la reducción del torque de frenado, se procederá a comentar acerca de la tecnología MAGLEV, esta tiene muchísimas aplicaciones prácticas, pero se trata de una que genera interés en particular para este trabajo, hasta el día de hoy se han diseñado una serie de aerogeneradores MAGLEV de eje vertical. La aplicación de rodamientos magnéticos en los aerogeneradores ha traído ventajas tanto en cuestiones de mantenimiento como en la generación de potencia eléctrica.

Macías et al. (2010) presentan los principios básicos de diseño, construcción y caracterización de una mini turbina de viento suspendida magnéticamente. La fuerza repulsiva es generada mediante imanes permanentes, ellos comparan la fuerza magnética con la fuerza gravitacional para determinar el momento magnético de los imanes, con esto ellos pueden saber el campo magnético teórico. Conocer los campos magnéticos permite conocer los límites del sistema de levitación. Huachun et al. (2010) introdujeron la estructura y el principio para su turbina de viento magnéticamente levitada, los parámetros geométricos son optimizados utilizando el método de análisis por elemento finito. El análisis del sistema dinámico es realizado, presentan el modelado e implementación de un controlador de posición axial, su simulación presenta levitación estable y buena rotación de levitación. Aravind et al. (2012) propusieron un aerogenerador de eje vertical en el cual introducen el concepto de levitación magnética para el diseño, la finalidad es su sistema pueda producir potencia a partir de velocidades de viento de 1m/s. Patel et al. (2012) presentaron un innovador diseño de un aerogenerador de eje vertical de flujo axial suspendido magnéticamente, su diseño presenta el concepto de levitación magnética usando imanes permanentes entre rotores dobles para reducir las pérdidas. La fuerza de levitación es generada usando repulsión magnética. El diseño del generador que levita sin engranes y rodamientos provee un flujo prácticamente sin fricción que minimiza el ruido y reduce las pérdidas. Este diseño permite reducir los costos de mantenimiento.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los aerogeneradores de flujo axial con rodamientos de contacto tienen problemas relacionados con elementos en movimiento (2 rodamientos, caja amplificadora y fechas).

Estos elementos son susceptibles a fallar, ya sea por desgaste, atascamiento, falta de lubricación etc.

Existe una constante fricción entre los elementos, ya sean los baleros o los engranes. Este problema se agrava con el tiempo debido al desgaste y por falta de mantenimiento, esto hasta el grado de afectar la eficiencia de la máquina.

4. JUSTIFICACIÓN

Actualmente existen aerogeneradores de flujo radial que usan la tecnología MagLev pero no existen aerogeneradores de flujo axial que ocupen esta tecnología. Aquí se plantea la fabricación de un aerogenerador de flujo axial con mejores características con respecto lo que usan rodamientos convencionales y cajas multiplicadoras. En este diseño se plantea integrar tanto el rodamiento magnético como el generador alrededor de las aspas para aprovechar de mejor manera el viento.

5. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

5.1 Objetivo General

Diseñar y fabricar un aerogenerador de eje horizontal en el cual se reduzca la fricción debido a piezas en contacto, también se busca aprovechar de mejor forma el flujo de viento que alimenta al sistema. Para conseguir lo anterior mencionado se realizará la aplicando un rodamiento magnético al diseño mencionado, también se colocarán todos los elementos que obstruyan el flujo de aire alrededor de las aspas, esto tiene la finalidad de obtener un modelo de aerogenerador de eje horizontal con menores limitaciones en la cuestión de frenado por fricción, que pueda trabajar con menores velocidades de viento en comparación a su análogos de rodamientos de contacto y finalmente que requiera menor mantenimiento en comparación a un aerogenerador con mecanismos en contacto.

5.2 Objetivos Particulares

Diseñar el rodamiento magnético aplicando un modelo dinámico del sistema que permita calcular las fuerzas actuantes sobre el soporte, así como la aplicación de un software de simulación de elementos finitos para obtener un modelo que sea práctico de construir pero sobre todo que cumpla las características deseadas.

Obtener el modelo de una turbina eólica eficiente a través de diversos modelos matemáticos, teoría HAWT y el apoyo un software de elementos finitos con la finalidad de crear un sistema de aspas que sea capaz extraer la máxima potencia posible del viento.

Generar un diseño eléctrico capaz de ser integrado alrededor de la turbina eólica el cual a su vez proporcione el par de frenado menor posible, esto se llevara a cabo utilizado teoría circuitos eléctricos, utilizando software de diseños electromagnéticos, así como el empleo de elementos finitos con el propósito de reducir las pérdidas en el sistema o generar vibraciones debidas a fuerzas magnéticas no previstas.

5.3 Hipótesis

Con la integración de un rodamiento magnético a un aerogenerador de eje horizontal se estima una considerable reducción de la fricción. De igual forma al utilizar un sistema de este tipo se plantea reducir el mantenimiento del sistema debido a componentes en contacto. Integrando tanto el rodamiento magnético como el sistema de generación alrededor de las aspas se obtendrá un mejor aprovechamiento de las corrientes de viento. El mejor aprovechamiento del viento así como la reducción de la fricción traerá como consecuencia una mayor extracción de potencia mecánica del viento.

6. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Diseño de los álabes

Para entender cómo se impulsan las palas de un aerogenerador se requiere comprender que no lo hacen solo por una cuestión de moléculas de viento impactándose en contra de una superficie, esto también implica comprender como se desplaza el flujo de aire a través del perfil del álabes.

Los perfiles son diseñados de tal forma que el flujo de aire a través de ellos genere una fuerza de sustentación con un mínimo arrastre.

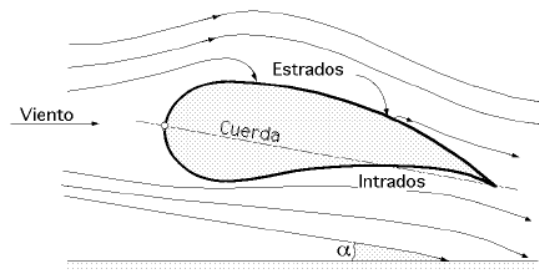


Figura 1. Zona de intrados y estrados en un perfil alar

En la Figura 1 se ilustra cómo se comportan las de viento a través de un perfil alar, igualmente en la Figura 2 se aprecian los efectos del flujo de aire a través del perfil.

Para conseguir lo anterior mencionado el perfil se genera de tal forma que el flujo de aire que atraviesa la zona de intrados se concentre creando una sobrepresión y con esto una fuerza de empuje en la dirección de sustentación deseada. Ahora bien, en la zona de estrados las líneas de flujo se expanden ocasionando una baja en la presión local con lo cual se crea una fuerza de succión dándose esta en la dirección de la sustentación.

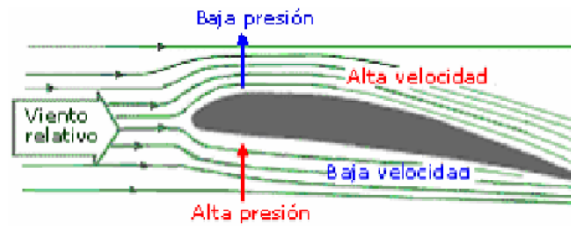


Figura 2. Efectos del viento a través de un perfil alar

Hay una serie de parámetros importantes que revisar con los cuales se realiza el diseño de los perfiles alares. En la Figura 3 se mencionan los nombres de los parámetros para realizar el diseño de estos perfiles.

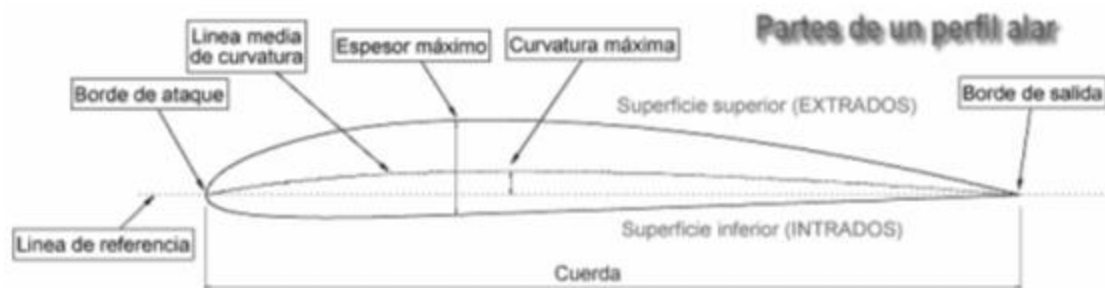


Figura 3. Elementos de un perfil alar

Ahora bien, la suma de las fuerzas de empuje, succión y fricción del viento dan como resultado una fuerza total o fuerza resultante, el coeficiente de esta fuerza se aprecia en la Figura 4 como C_R , esta fuerza se descompone en dos componentes que son muy importantes para el cálculo del ángulo óptimo de diseño: el coeficiente de la fuerza de sustentación C_L que aparece perpendicular a la dirección del viento relativo y el coeficiente de la fuerza de arrastre C_D que aparece sobre el mismo eje de acción del viento relativo.

$$C_L = C_R \sin(\gamma)$$

$$C_D = C_R \cos(\gamma)$$

Siendo γ el ángulo formado entre el viento relativo y la fuerza de reacción resultante.

La importancia de calcular estas dos fuerzas se deriva en que existe una mayor eficacia teniendo un mayor coeficiente C_L y disminuyendo C_D , es decir con una relación de sustentación-arrastre mayor

$$\frac{C_L}{C_D} = Max$$

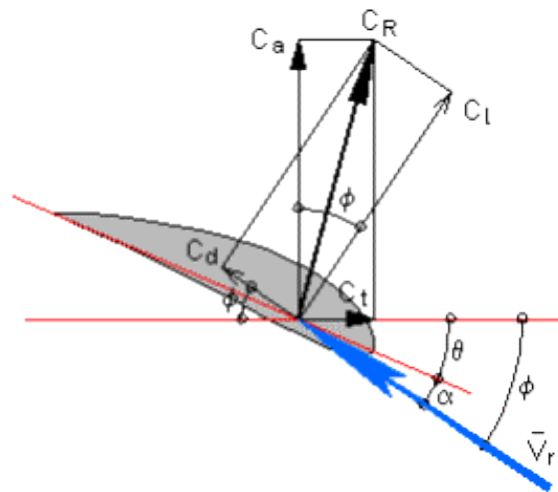


Figura 4. Fuerzas actuantes en un perfil alar

La justificación de lo anterior mencionado es que entre mayor sea la fuerza de sustentación mayor es el movimiento de las palas respecto al viento local. La cantidad de la fuerza de arrastre está relacionada con la oposición al movimiento respecto al viento relativo, un elevado C_D ocasiona que las líneas del flujo del viento se separen con respecto al perfil del álabo, con esto que el flujo pase del régimen laminar al turbulento y por ende el sistema pierda la sustentación.

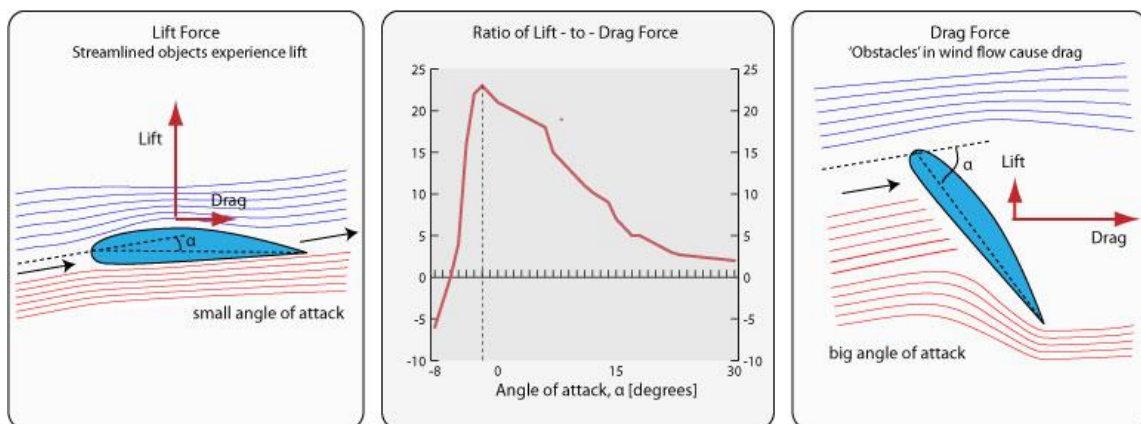


Figura 5. Gráfica de relación C_L/C_D

Durante el diseño de los álabos se tiene que considerar una gráfica muy importante, la cual representa el coeficiente C_L/C_D través de un régimen ángulos de ataque (ángulo formado entre la línea de cuerda y el viento relativo), un ejemplo de esta gráfica se presenta en le Figura 5, en esta se explica de igual

forma que un pequeño ángulo de ataque proporciona sustentación, de forma contraria, un elevado ángulo de ataque proporciona arrastre.

El ángulo de ataque de las Palas de un aerogenerador respecto al viento parece ofrecer un elevado coeficiente de arrastre por la posición de la cuerda casi perpendicular al viento real de la zona, sin embargo hay que considerar que hay un movimiento de la pala sobre un plano perpendicular a la dirección del viento de la zona, este movimiento genera una velocidad aparente del viento que va en contra del movimiento real de las palas, la suma vectorial de la velocidad del viento en la zona y la velocidad aparente mencionada dan como resultado una velocidad relativa sobre el álabe la cual es considerada para realizar el cálculo del ángulo de ataque.

En la Figura 6 se aprecian las componentes de viento relativo C mencionadas en el párrafo anterior, el vector V representa la dirección del viento en la zona, el vector U representa la dirección del viento aparente. La componente U , como ya se mencionó, representa la velocidad del aspa que se mueve a través del viento estático sobre el plano del movimiento.

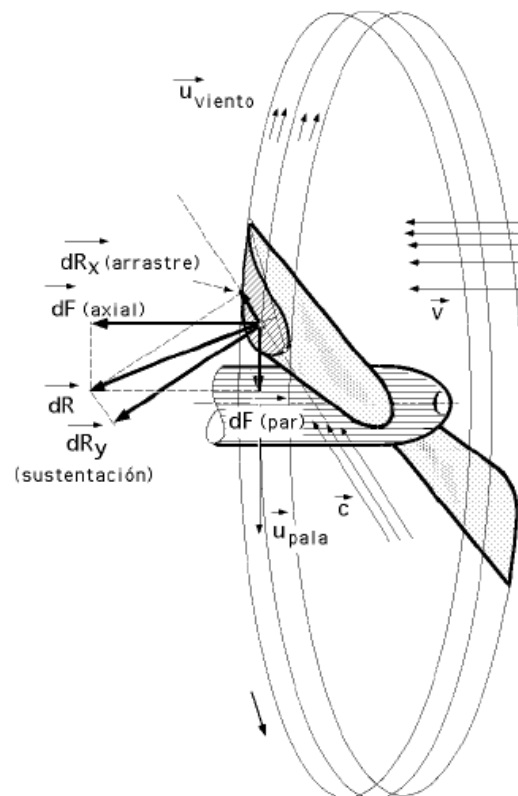


Figura 6. Componentes del viento relativo en un perfil alar.

Ya calculado el ángulo de ataque para una mayor relación $\frac{C_L}{C_D}$ se hace la suma vectorial de las fuerzas de sustentación y de arrastre, esta fuerza resultante se descompone finalmente en una fuerza perpendicular al eje de giro y una fuerza axial respecto el eje de giro.

$F_T \rightarrow$ fuerza de par de giro

$F_A \rightarrow$ fuerza axial

La Figura 7 muestra que la combinación entre el viento real y el viento relativo que actúa sobre el perfil trae como resultado una diferencial de fuerza representada en la imagen por el vector dR , este vector se descompone en sustentación y arrastre por interés del análisis de perfil, la sustentación se aprecia perpendicular al viento relativo C , el arrastre se aprecia paralelo al viento relativo C . también el vector de la fuerza resultante se descompone en axial y radial (par) por interés en el análisis de las cargas y potencia útil sustraída del viento.

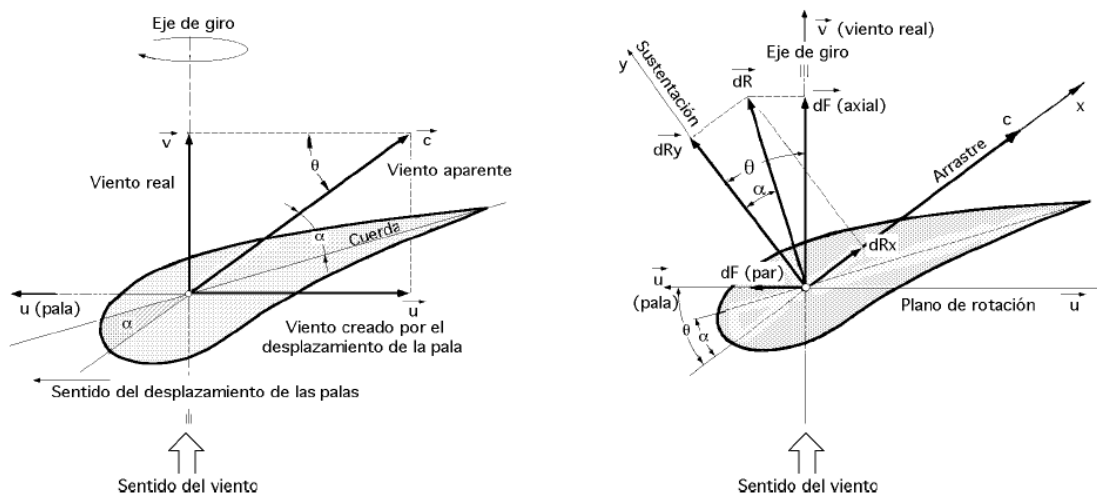


Figura 7. Acción del viento sobre las palas de una turbina

Para conocer el torque que el sistema nos entrega se integran todas las diferenciales de fuerza de par en función al radio de giro al que se encuentran a lo largo de las palas.

Diseño eléctrico

La ecuación que rige el comportamiento de generación de voltaje de un generador eléctrico es:

$$E = k * F_i * w$$

Dónde:

E = Voltaje generado.

k = Constante de construcción del generador.

F_i = Flujo magnético a través del estator.

w = Velocidad angular de giro.

La energía máxima que un imán puede suministrar cuando se coloca en el generador se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$E_M = \frac{(B - H)_{m\acute{a}x} * V * N}{2}$$

Dónde:

V = Volumen del imán

N = Número de imanes del generador

$(B - H)_{m\acute{a}x}$ = Producto energético, mide la densidad de la energía magnética

E_M = Energía máxima que un imán puede suministrar

La potencia máxima que se puede producir resulta de multiplicar la energía máxima de los imanes por la velocidad angular a la cual se encuentra girando.

Fuerza electromotriz generada en una espira debido a un campo variable.

La tensión inducida en cada segmento está dada por la expresión siguiente:

$$\varepsilon = 2 * v * B * l$$

Dónde:

ε = Tensión en cada segmento

v = Velocidad en m/s

B = densidad de flujo magnético (teslas)

Si se considera que la velocidad lineal es:

$$v = w * r$$

Con:

w = velocidad angular en rad/s

r = radio

Se tiene que:

$$\varepsilon_T = 2w * r * B * l$$

Sabiendo que ε_T es el valor de la tensión máxima que puede alcanzar, el valor rms de ésta se calcula como:

$$\varepsilon_{rms} = \frac{2}{\sqrt{2}} w * r * B * l$$

Si se desea hacer el cálculo de la tensión conociendo la velocidad de angular en rpm solo se considera lo siguiente:

$$w = \frac{2\pi}{60} rpm$$

$$\varepsilon_{rms} = \frac{4\pi}{60\sqrt{2}} (rpm) * r * B * l$$

$$\varepsilon_{rms} = 1.48(rpm) * r * B * l$$

Considerando una bobina con N número de espiras, la tensión rms total generada se define por la expresión:

$$E_{rms} = 1.48(rpm) * r * B * N * l$$

B = Campo magnético que actúa sobre los lados de la bobina

N = Número de espiras de cobre que forman la bobina

r = radio de giro de los imanes

l = longitud de la bobina perpendicular al movimiento de los imanes

Una vez definida la corriente máxima que circulará por los embobinados se recurre a la Tabla 1 para la selección del calibre del conductor, considerando que la densidad de corriente para el alambre de cobre es de 2.5 a 3.5 A/mm² que para un primer cálculo se puede considerar como 3 A/mm².

Tabla 1. Calibre de conductores.

AWG	Ø [Pulg]	Ø [mm]	Ø [mm ²]	AWG	Ø [Pulg]	Ø [mm]	Ø [mm ²]
6/0 = 000000	0.580	14.73	170.30	18	0.0403	1.02	0.823
5/0 = 00000	0.517	13.12	135.10	19	0.0359	0.912	0.653
4/0 = 0000	0.460	11.7	107	20	0.0320	0.812	0.518
3/0 = 000	0.410	10.4	85.0	21	0.0285	0.723	0.410
2/0 = 00	0.365	9.26	67.4	22	0.0253	0.644	0.326
1/0 = 0	0.325	8.25	53.5	23	0.0226	0.573	0.258
1	0.289	7.35	42.4	24	0.0201	0.511	0.205
2	0.258	6.54	33.6	25	0.0179	0.455	0.162
3	0.229	5.83	26.7	26	0.0159	0.405	0.129
4	0.204	5.19	21.1	27	0.0142	0.361	0.102
5	0.182	4.62	16.8	28	0.0126	0.321	0.0810
6	0.162	4.11	13.3	29	0.0113	0.286	0.0642
7	0.144	3.66	10.5	30	0.0100	0.255	0.0509
8	0.128	3.26	8.36	31	0.00893	0.227	0.0404
9	0.114	2.91	6.63	32	0.00795	0.202	0.0320
10	0.102	2.59	5.26	33	0.00708	0.180	0.0254
11	0.0907	2.30	4.17	34	0.00631	0.160	0.0201
12	0.0808	2.05	3.31	35	0.00562	0.143	0.0160
13	0.0720	1.83	2.62	36	0.00500	0.127	0.0127
14	0.0641	1.63	2.08	37	0.00445	0.113	0.0100
15	0.0571	1.45	1.65	38	0.00397	0.101	0.00797
16	0.0508	1.29	1.31	39	0.00353	0.0897	0.00632
17	0.0453	1.15	1.04	40	0.00314	0.0799	0.00501

7. METODOLOGÍA

7.1 Software

El motivo de este apartado no es promocionar el uso de algún software en específico, se recomienda usar un software que tenga la capacidad de proporcionar una solución aproximada en función de la aplicación para la cual

está destinado su uso. También hay que tener presente que la aplicación de un software es más apropiada para la comprobación de datos, puesto que, si se realiza un trabajo de ingeniería previo y se comprueba con el uso del software es altamente probable que la solución sea correcta.

Para la parte de la modelación tanto de flujo magnético se hace el uso del software (QuikField ®), para la cuestión del diseño de los álabes se aplica el software (Qblade ®) y se complementa el diseño con el uso de (Inventor ®)

7.2 Diseño de los álabes

Para el diseño hay que realizar algunas consideraciones tales como:

- Capacidad de generación en KW
- Diámetro propuesto para la dimensión de los álabes
- Flujo de aire (este depende de la región y altura en donde se colocará el aerogenerador)
- Condiciones del medio ambiente (ayudará a determinar el material para la manufactura de los álabes)

La capacidad de generación se ha planteado que sea de 1KW. Se propone que los álabes tengan un diámetro de 1m aproximadamente.

Para determinar la velocidad del viento anual en Querétaro, que es la región en la cual se piensa está desarrollando esta tecnología, se ha recurrido a la página web (Tu tiempo.net)

Clima en Querétaro, Qro. el tiempo en 2013

Datos reportados por la estación meteorológica: **766250 (MMQT)**

Latitud: **20.58** | Longitud: **-100.38** | Altitud: **1813**

Los valores climáticos en Querétaro registrados del año 2010 hasta el 2015 se aprecian desde la Tabla 2 hasta la Tabla 7. Datos climáticos del año 2015

Datos	Valor	Días computados
--------------	--------------	------------------------

Temperatura media anual:	17.6°C	365
Temperatura máxima media anual:	26.6°C	365
Temperatura mínima media anual:	9.1°C	365
Precipitación total acumulada anual:	419.36 mm	361
Velocidad del viento media anual:	12.4 km/h	365

Tabla 2. Datos climáticos del año 2010

Tabla 3. Datos climáticos del año 2011

Datos	Valor	Días computados
Temperatura media anual:	18.0°C	365
Temperatura máxima media anual:	28.1°C	365
Temperatura mínima media anual:	9.5°C	365
Precipitación total acumulada anual:	264.40 mm	365
Velocidad del viento media anual:	12.2 km/h	365

Tabla 4. Datos climáticos del año 2012

Datos	Valor	Días computados
Temperatura media anual:	17.7°C	366
Temperatura máxima media anual:	27.3°C	366
Temperatura mínima media anual:	9.8°C	366
Precipitación total acumulada anual:	564.87 mm	363
Velocidad del viento media anual:	11.6 km/h	366

Tabla 5. Datos climáticos del año 2013

Datos	Valor	Días computados
Temperatura media anual:	17.9°C	365
Temperatura máxima media anual:	27.5°C	365
Temperatura mínima media anual:	10.6°C	365
Precipitación total acumulada anual:	448.27 mm	365
Velocidad del viento media anual:	10.3 km/h	365

Tabla 6. Datos climáticos del año 2014

Datos	Valor	Días computados
--------------	--------------	------------------------

Temperatura media anual:	17.6°C	365
Temperatura máxima media anual:	27.4°C	365
Temperatura mínima media anual:	10.6°C	365
Precipitación total acumulada anual:	698.21 mm	365
Velocidad del viento media anual:	9.7 km/h	365

Tabla 7. Datos climáticos del año 2015

Datos	Valor	Días computados
Temperatura media anual:	17.1°C	365
Temperatura máxima media anual:	26.5°C	365
Temperatura mínima media anual:	10.2°C	365
Precipitación total acumulada anual:	510.25 mm	365
Velocidad del viento media anual:	10.7 km/h	365

Tabla 8. Velocidad promedio del viento en Querétaro del 2006 al 2013

Año	Velocidad promedio del viento km/h
2015	10.7
2014	9.7
2013	10.3
2012	11.6
2011	12.2
2010	12.4
2009	12.9
2008	12.7
2007	12.6
2006	13.1

Analizando la Tabla 8 que muestra la velocidad promedio del viento en Querétaro de los años 2006 a 2015 podemos ver claramente que la tendencia de velocidad promedio del viento va a la baja, puesto que de 2006 a 2015 bajó de 13.1 a 10.7 km/h,

7.3 Cálculo de la energía cinética del viento en función de su velocidad.

Para determinar la energía que se puede extraer del aire en primer lugar se tiene que determinar cuál es la cantidad de energía cinética que tiene una cierta cantidad de masa de aire en función de la velocidad a la que viaja.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Dónde:

E_c = Energía cinética.

m = masa del aire.

v = velocidad del aire.

Como es más fácil medir la cantidad de volumen de aire se sustituye la el volumen por la densidad de aire en lugar de la masa.

$$E_c = \frac{1}{2}V\rho v^2$$

En donde:

V = volumen del aire desplazado.

ρ =densidad del aire.

Se puede conocer de igual forma el flujo volumétrico del aire que pasa a través del área que abarcan los álabes.

$$\dot{V} = Av$$

Donde

A = Área ocupada por los álabes.

De igual forma se indica el volumen multiplicando la ecuación de flujo másico por el tiempo.

$$V = Avt$$

Con lo que la ecuación de energía cinética se reescribe de la siguiente manera:

$$E_c = \frac{1}{2} A \rho v^3 t$$

Revisando las unidades (considerándolas en el S.I.) nos queda:

$$E_c = (m^2) \left(\frac{kg}{m^3}\right) \left(\frac{m}{s}\right)^3 s = (m^2)(kg)\left(\frac{1}{s^2}\right)$$

En donde

$$N = kgm/s^2$$

$$E_c = Nm$$

Se sabe que 1 Joule es 1N que realiza un trabajo en la distancia de 1 metro.

$$E_c = J$$

De igual forma la potencia está dada en Watts, los cuales son 1J/s, por lo que la potencia teórica que suministra el sistema está dada por la expresión:

$$P = \frac{1}{2} A \rho v^3$$

La ecuación de potencia anteriormente mostrada ofrece un caso ideal en el cual se puede extraer toda la energía del aire, mas sin embargo por leyes que nos menciona la termodinámica no se puede extraer el 100% de la energía en un proceso. Por las ecuaciones formuladas por Betz se conoce que:

$$P_{real} = P_{ideal} C_p \eta = C_p \eta \frac{1}{2} A \rho v^3$$

En donde:

C_p = es 59% (revisar ley de Betz).

η = eficiencia de los elementos del sistema.

Por lo que la máxima cantidad de energía extraída del sistema es:

$$P_{real} = 0.59 \eta \frac{1}{2} A \rho v^3$$

$$\frac{2P_{real}}{0.59\eta\rho v^3} = A$$

(Potencia del viento)

La densidad del aire se puede calcular de con la siguiente fórmula:

$$\rho = \left(\frac{P_0}{RT}\right) \exp\left(\frac{-gz}{RT}\right)$$

Dónde:

P_0 = presión atmosférica 101235Pa.

R = constante del aire 289.9J/(kg*K).

T = temperatura (K).

g = aceleración de la gravedad = 9.81m/s².

z = altitud (m).

7.4 Selección y Diseño de la suspensión magnética

La opción de sostener magnéticamente los álabes tiene diversas razones en donde las principales son:

- 1) Evitar el uso de chumaceras como rodamientos lo que atrae el beneficio de eliminar la fricción mecánica que producen estos mismos y por esta parte mejorar la eficiencia de generación.
- 2) La suspensión se realizará alrededor de los álabes lo cual se aprovechará para colocar las bobinas de generación eléctrica igualmente alrededor, con lo anterior se busca que no exista una obstrucción del flujo de aire lo cual mejora la aerodinámica del sistema y nuevamente se realizará una mejora en la eficiencia de generación.

Esta parte del diseño es lo más desafiante, puesto que existen, en comparación al diseño de álabes y generación de electricidad, muy poca innovación y pocos países se han dedicado a la creación de aplicaciones con la tecnología Maglev (Magnetic levitation)

Éste módulo de diseño es el que posiblemente lleve más carga iterativa por lo mencionado anteriormente, puesto que de los otros existe más teoría, lo factible es diseñar “a la par” todos los módulos, con esto se irá planteando la solución más adecuada para la suspensión

7.4.1 Cojinetes magnéticos.

Este tipo de cojinetes son capaces de soportar cargas mediante el uso de la levitación magnética. La principal finalidad de estos es el apoyo de partes móviles evitando el contacto físico.

Estos cojinetes se dividen principalmente en tres tipos, los cuales son:

- Cojinetes pasivos
- Cojinetes activos
- Cojinetes híbridos

7.4.1.1 Cojinetes pasivos

Por su parte los cojinetes pasivos están fabricados por imanes permanentes, los cuales no requieren una excitación eléctrica. La ventaja en estos es que no requieren una fuente de alimentación, lo cual se refleja en el ahorro de potencia eléctrica. La desventaja que se les aprecia claramente es que no se les puede realizar ningún tipo de control. Su comportamiento es claramente el de un sistema de control a lazo abierto, en el cual no se pueden manipular variables del sistema durante el tiempo de ejecución para obtener una salida deseada, lo único posible es el ajuste de una "ganancia" o parámetro que se ha calculado para que el comportamiento del sistema se encuentre en un rango deseado.

Mencionado lo anterior es importante hablar acerca de los parámetros que en este tipo de cojinetes se pueden manipular, primeramente tenemos la geometría de los imanes lo cual combinado con la posición nos establecerá la dirección del flujo magnético, en segundo lugar tenemos la dimensión (volumen) que combinada con las propiedades magnéticas del material usado nos definirá la magnitud del flujo magnético.

El reto que representa el empleo de este tipo de cojinetes es el hecho de la modelación de los flujos magnéticos manipulando los parámetros antes mencionados. Si pensamos en que cada beneficio conlleva un costo, para este caso *"el costo de no consumir potencia eléctrica es la falta de control del sistema que en una perturbación considerable puede sufrir daños."*

7.4.2 Cojinetes activos

Los cojinetes del tipo activo tienen una serie de ventajas y desventajas en comparación a los del tipo pasivo, pero de eso hablaremos más adelante cuando se haga la selección del cojinete.

Los cojinetes activos están compuestos por una serie de electroimanes los cuales realizan la función de la generación del campo magnético. Para este caso si se pueden manipular algunas variables durante el tiempo de ejecución del proceso para poder obtener una posición del eje deseada. Por lo antes descrito,

se puede decir que este tipo de cojinetes trabajan como sistemas de control a lazo abierto o lazo cerrado.

La gran ventaja que nos ofrece el empleo de cojinetes activos es que se puede evitar el uso de tantos recursos físicos al momento de pruebas, pues la carga de trabajo se vuelve un tanto más intelectual al tener que generar un sistema de control, lo cual de primer vista nos puede resultar en un beneficio económico pero esto se analizará más a detalle posteriormente. Una ventaja indiscutible es que el lazo de control cerrado nos atrae el beneficio de eliminar perturbaciones en el sistema, lo que nos lleva a un mejor funcionamiento de este.

Una de las desventajas más marcadas en el empleo de cojinetes activos es que se tiene que hacer uso de una porción de la potencia eléctrica generada para la alimentación de las bobinas generadoras de campo y el sistema de control. Cabe decir que el flujo magnético que se encuentre controlando un disturbio considerable nos puede atraer problemas en la parte de generación de electricidad por la variación del flujo magnético a través del tiempo, lo que en el caso de un cojinete pasivo no ocurre pues este es siempre estático a través del tiempo.

Uno de los parámetros que podemos manipular en el caso de cojinetes activos es la amplitud de la corriente eléctrica o el ancho de banda en caso de querer usar un PWM, para ambos casos es necesario analizar pro y contras de la manipulación de la corriente en cada camino. También se debe realizar un estudio de cuáles son los elementos para el lazo cerrado del sistema de soporte magnético

La complejidad del uso de este tipo de cojinetes consta en el modelado del control a emplear, puesto que los sistemas magnéticos no se pueden modelar con las leyes de control clásicas por lo que se necesitan modelos de control más complejos

“El costo de un excelente control de la posición del eje recae en el consumo de potencia para la retroalimentación del sistema.”

7.4.3 Cojinetes híbridos

Los cojinetes híbridos constan de la fusión de los cojinetes activos y los cojinetes pasivos. En este tipo de suspensión aprovechamos los cojinetes pasivos para referencia estática de la posición del eje y la propiedad de los activos para el control final de la posición mientras el sistema se ve afectado por perturbaciones.

Cabe decir que la ventaja que tiene este tipo de soporte se ve reflejada en el consumo final de potencia debido al control, pues al tener una referencia estática solo se consume la potencia que gaste el control de la posición. Otra ventaja, en comparación a los activos, es que pueden seguir trabajando a pesar de un fallo en el sistema de alimentación del control, puesto que como se puede decir, pasan de ser un lazo cerrado a un lazo abierto expuesto a perturbaciones.

Las desventajas para este tipo de soportes son prácticamente las mencionadas para los cojinetes activos, con la excepción de que no consumen tanta potencia.

Lo que hace muy complicado el empleo de estos cojinetes es la cuestión del modelado del sistema, pues se combina la complejidad de ambos. Algo remarcable es que, como su nombre lo dice, pueden trabajar como cojinetes activos o pasivos y realmente comparar el beneficio que nos trae cada uno.

Para un sistema donde la precisión es fundamental este tipo de cojinetes presenta obviamente grandes ventajas sobre los dos anteriores. Mas sin embargo para sistemas más simples puede resultar en un exceso la aplicación de este y se notaría que la ingeniería en este supuesto caso está sobrada

Realizando la analogía costo beneficio que se hizo para los anteriores dos:

“el beneficio de este sistema de suspensión es que se tiene un excelente control sobre los elementos acompañado de un consumo de energía más bajo que con los cojinetes activos, el costo es un doble trabajo de ingeniería para su concepción y mayores costos de producción”

(cojinetes magnéticos)

7.4.4 Selección del soporte

Para realizar una comparación más objetiva del uso de suspensión magnética seleccionada de acuerdo a la aplicación, ver la Tabla 9.

Tabla 9. Tabla para la selección del tipo de soporte

Característica	Tipo de soporte		
	pasivo	Activo	Híbrido
Consumo de energía	3	1	2
Control sobre sus elementos	0	3	3
Tiempo de planeación	2	1	0
Tiempo de fabricación	2	1	0
Costo de manufactura	3	2	1
Mantenimiento	3	1	1

La tabla anterior mostrada presenta puntos de vista personales, califica con un cero si la cualidad es muy mala o nula y con un tres si esta es muy buena o excelente, las ponderaciones pueden cambiar de lector a lector. Se tratará de explicar la selección de algún tipo de suspensión por lo beneficioso que resulte sobre los otros.

Siendo que la aplicación será destinada a un aerogenerador es muy importante ver el aspecto de eficiencia del sistema, considerando el punto uno de la tabla en primer instancia seleccionamos el uso de cojinetes pasivos pues consume 0% de la energía generada para control.

Es muy importante mantener equilibrado el sistema pues una perturbación mayor puede ocasionar una mal funcionamiento, como se ve en la tabla los soportes que nos ofrecen mayor control son el activo y el híbrido, si se considera solo este punto la decisión puede ser imparcial, mas sin embargo, considerando ya el punto anterior se puede descartar el uso del soporte activo, así que comparemos el uso soporte pasivo contra el híbrido. Puesto que en cuestión de consumo de energía los elementos no se encuentran muy distanciados y en cuestión de la aplicación de un control sí, por el momento se optará por el uso de la suspensión híbrida por su bajo consumo de potencia y excelente control.

Revisando el aspecto del tiempo de planeación vemos que en el soporte pasivo se llevaría un menor tiempo y por lógicas razones el tiempo de planeación del híbrido es mayor, a pesar de esto, hasta este punto, es más razonable el empleo de un soporte híbrido puesto que con un tiempo mayor de planeación se tiene aún un excelente control y bajo consumo de potencia.

Observando el tiempo de fabricación se aprecia que en este punto se puede considerar que los cojinetes pasivos y los híbridos se encuentran en el mismo nivel de selección, dejando un tanto más desplazados a los cojinetes activos. Por una parte el sistema carece de control, pero con los beneficios de “cero” consumo de potencia eléctrica, tiempo medio de planeación y tiempo medio de fabricación. Por otro lado existe la limitante de mayores tiempos de planeación y fabricación a costo de un excelente control y bajo o medio consumo de potencia.

Revisando el 5° aspecto se le otorga una ventaja a la realización de la aplicación con soporte pasivo puesto que los costos de la fabricación de este tipo de suspensión son sin duda alguna mucho más bajos.

En el aspecto de mantenimiento la opción del soporte pasivo toma más ventaja en comparación a los anteriores, debido a que no cuenta con un control, no emplea tantos elementos electrónicos que se puedan dañar y por ende no se realiza un mayor gasto en tiempo o dinero para su manutención.

Con lo tratado anteriormente se ha llegado a la solución del uso de los cojinetes pasivos con los cual el sistema de suspensión adquiere las siguientes características:

No consume potencia: al ser de imanes permanentes no requiere energía para la generación del campo magnético. Con lo que se incrementa la eficiencia por ser un sistema con prácticamente fricción nula.

*No hay control sobre el sistema: al ser un sistema con un parámetro de flujo magnético fijo no se puede efectuar ninguna ley de control, lo más factible es realizar un meticuloso análisis para dejar este parámetro fijo de tal forma que podamos trabajar en un rango de valores sin que las perturbaciones afecten de forma considerable el sistema.

Los tiempos de planeación y de fabricación no son muy elevados el comparación a los otros tipos de soportes, por lo tanto en un tiempo considerablemente no muy largo se puede desarrollar esta parte del sistema.

Los costos de fabricación no son muy elevados, puesto que solo conlleva elementos pasivos, como lo son los imanes. El costo de mantenimiento es de igual forma muy bajo, posiblemente mucho menor que en el caso del uso de chumaceras pues la fricción “cero” de este sistema aumenta la vida de los elementos visiblemente sobre el uso de cojinetes ordinarios.

Una ventaja más, de la cual no se ha tratado en este escrito, es que debido a flujos magnéticos estáticos en el estator del generador no se inducen perturbaciones en el momento de la generación, lo que en el caso de los soportes activos e híbridos se reflejaría como corrientes de rizo o armónicos en el sistema.

**NOTA: Se puede aún cuestionar sobre el uso de un soporte pasivo debido a los efectos de perturbaciones no previstas, pero el uso de este tipo de suspensión nos da la factibilidad de convertir de un soporte pasivo a un soporte híbrido si los resultados no son los deseados, solo se tendría que realizar una modificación para incluir los electroimanes que harían la función de control.*

7.4.5 Configuración de los imanes para el rodamiento magnético

En la Figura 8. Configuración de imanes en “V” para simular un rodamiento cónico se aprecia el primer modelo propuesto del balero magnético que tiene la función de soportar el peso de los elementos en movimiento.

Este modelo tiene la configuración de un balero cónico con el cual se busca soportar las cargas radiales, producidas por el peso de los elementos mencionados y el desbalance al momento del giro, así como las cargas axiales actuando sobre las aspas.

A primera vista, analizando el comportamiento de un componente mostrado en la Figura 9. Campo magnético de la configuración en “V” en una zona estable. se aprecia que las fuerzas entre los imanes son puramente expulsivas, con lo que se obtendría un punto de equilibrio para soportar las aspas.

En la Figura 10. Campo magnético de la configuración en “V” a menor distancia se observa que entre más cerca se encuentren los imanes la fuerza expulsiva incrementa al concentrarse las líneas de flujo magnético.

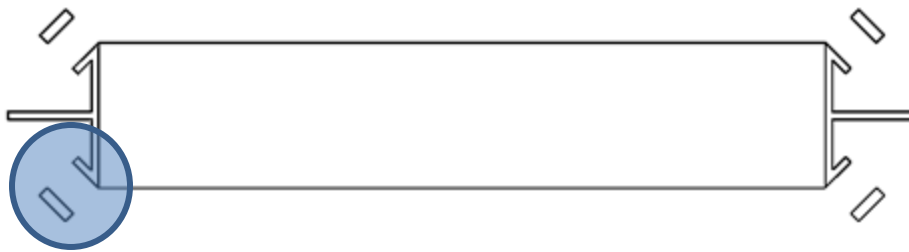


Figura 8. Configuración de imanes en “V” para simular un rodamiento cónico

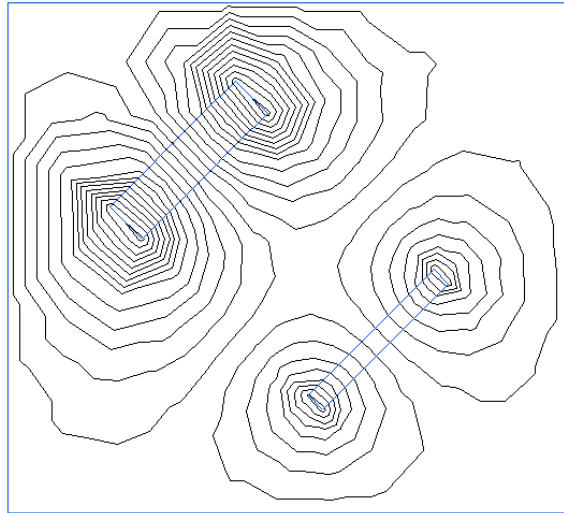


Figura 9. Campo magnético de la configuración en "V" en una zona estable.

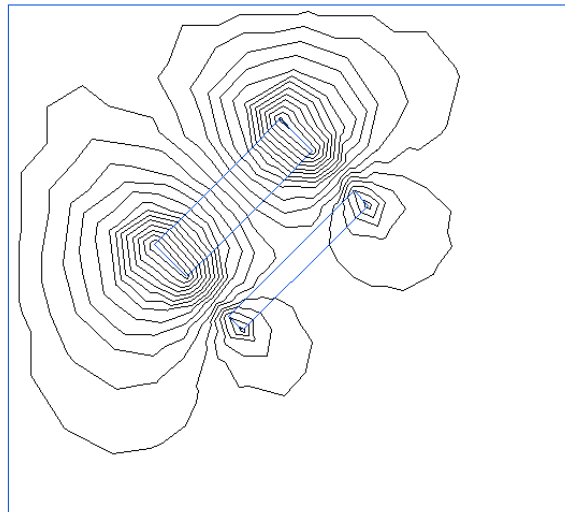


Figura 10. Campo magnético de la configuración en "V" a menor distancia

Aunque en la Figura 10. Campo magnético de la configuración en "V" a menor distancia se muestra una simulación con los resultados idealmente esperados, se debe de considerar algún punto de desequilibrio como el mostrado en le Figura 11. Configuración de imanes en "V" con un disturbio pronunciado.

Aquí se presenta un desalineamiento del eje de giro de las aspas con respecto al eje de giro deseado.

Los efectos de un ligero desbalanceo se muestran en la simulación del caso representada en la Figura 12. Campo magnético de la configuración en "V" con un disturbio menor analizando esta se aprecia que las líneas de flujo magnético dejan de ser puramente expulsivas y en gran parte se vuelen atractivas, si el disturbio incrementa se aprecia en las líneas de flujo en la fuerza de repulsión en los imanes desaparece por completo, ver Figura 13. Campo magnético de la configuración en "V" con un disturbio mayor.

El efecto principal de este desbalance es la generación de momentos actuando en el mismo sentido de giro trayendo como consecuencia la pérdida total del equilibrio del sistema. La analogía para este configuración es como tratar de equilibra un lápiz de punta, la más mínima perturbación colapsa el sistema.

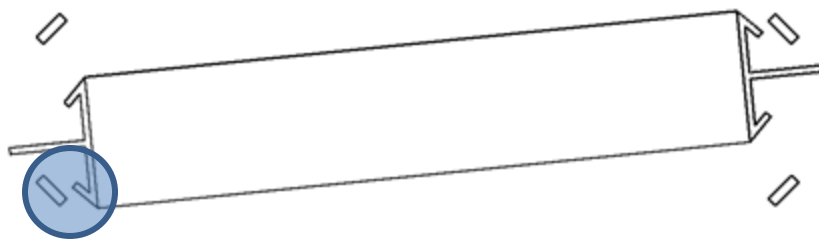


Figura 11. Configuración de imanes en "V" con un disturbio pronunciado

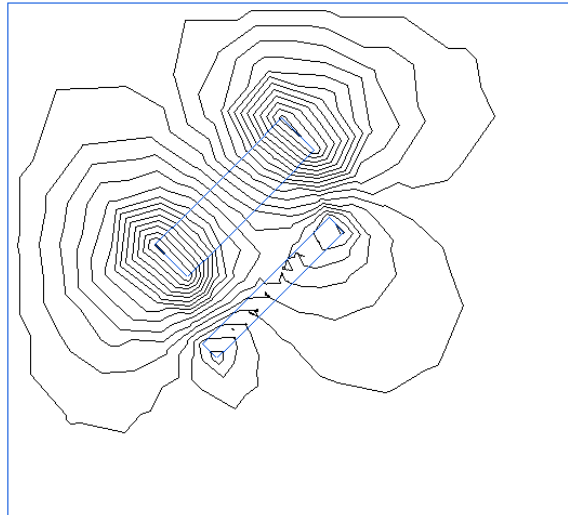


Figura 12. Campo magnético de la configuración en “V” con un disturbio menor

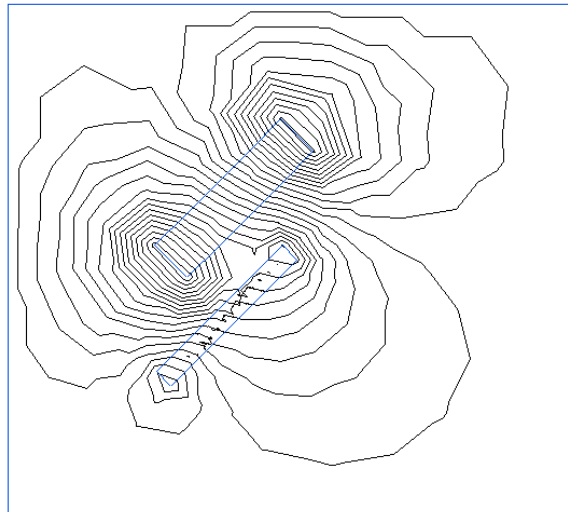


Figura 13. Campo magnético de la configuración en “V” con un disturbio mayor

Ha sido necesario utilizar una configuración diferente de lo anterior planteado debido a los problemas de desbalance presentados.

Se plantea una configuración del balero en donde se modifica un tanto el ángulo de los imanes situados en el estator.

Con la segunda configuración se consigue un sistema más equilibrado puesto que este mismo se vuelve menos susceptible al colapso debido a desbalanceo del sistema.

En la Figura 14. Campo magnético estable de la 2° configuración propuesta se muestra esta configuración simulada.

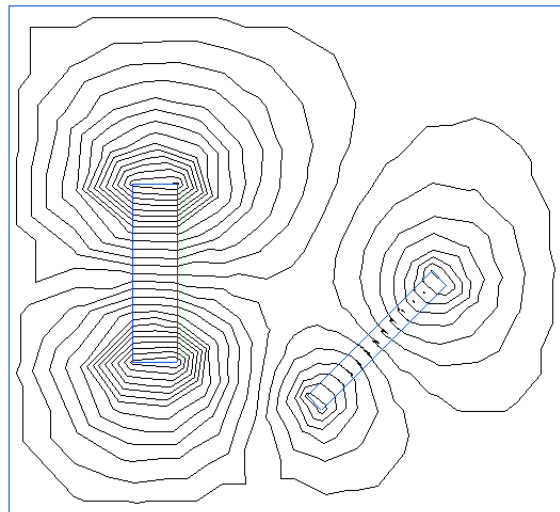


Figura 14. Campo magnético estable de la 2° configuración propuesta

En la Figura 15. Campo magnético de la 2° configuración propuesta con un disturbio menor. se presentan las trayectorias de los flujos magnéticos ante una pequeña perturbación, comparando los resultados contra los de la figura X se puede observar que las líneas de flujo magnético no son tan continuas entre ambos imanes como en el caso primero presentado, esto nos indica que la fuerza expulsiva entre imanes está aún presente ante esta perturbación.

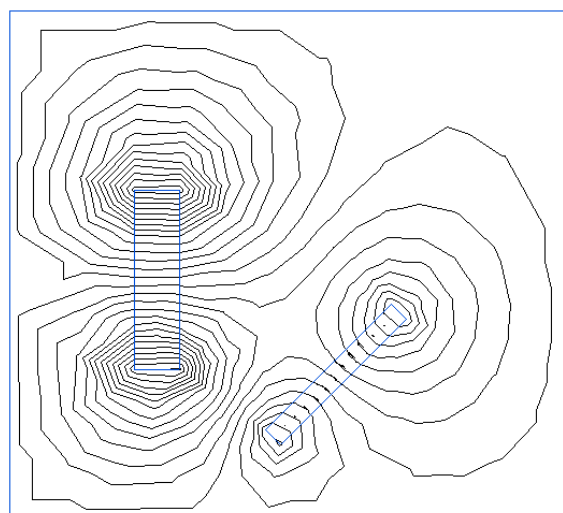


Figura 15. Campo magnético de la 2° configuración propuesta con un disturbio menor.

Más sin embargo la presencia de perturbaciones mayores en el sistema, como las mostradas en la Figura 16. Campo magnético de la 2° configuración propuesta con un disturbio mayor y Figura 17. Campo magnético de la 2° configuración propuesta con un disturbio mayor convierten a este en un sistema prácticamente atractivo.

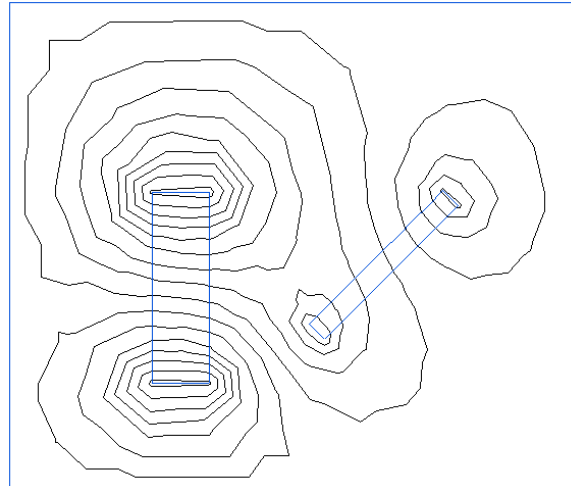


Figura 16. Campo magnético de la 2° configuración propuesta con un disturbio mayor

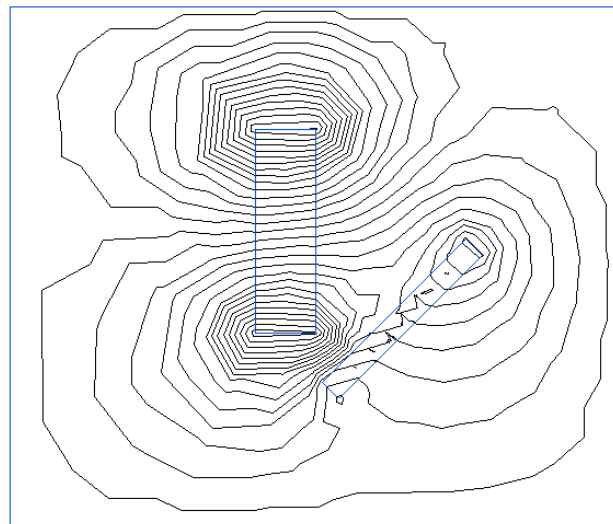


Figura 17. Campo magnético de la 2° configuración propuesta con un disturbio mayor

La Figura 18. Tercera configuración de imanes propuesta en estado estable presenta la tercera configuración pensada para ser aplicada en el balero magnético, se

aprecia que se ha agregado un imán para estabilizar de mejor forma las fuerzas magnéticas presentes en sistema.

En la Figura 19. Campo magnético estable de la tercera configuración propuesta se presentan las líneas de flujo magnético que actúan en el sistema. Se observa claramente que las líneas de flujo de los imanes del estator nunca son continuas respecto a las líneas de flujo de los imanes del rotor.

Un balero magnético con esta configuración es claramente más estable que con las configuraciones anteriormente mostradas debido a la mayor estabilidad en los dos ejes de este plano mostrado y el equilibrio de momentos que se presenta con este arreglo.

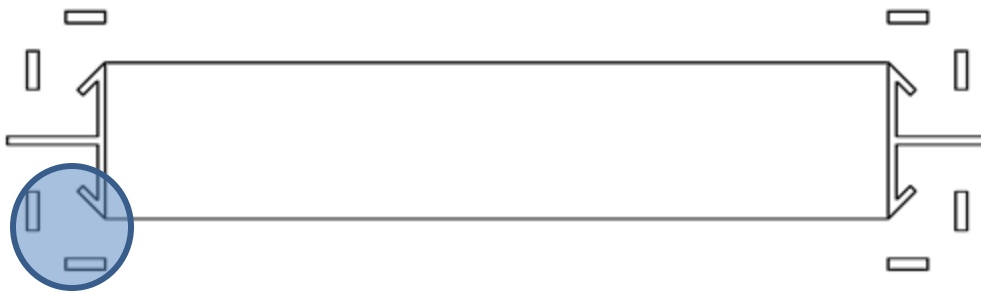


Figura 18. Tercera configuración de imanes propuesta en estado estable

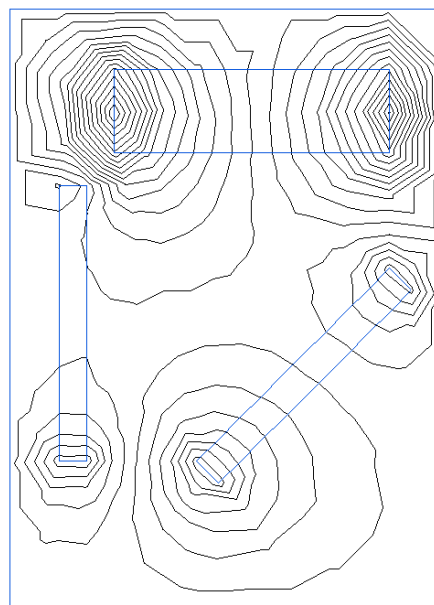


Figura 19. Campo magnético estable de la tercera configuración propuesta

El primer desbalance presentado para esta configuración es la rotación del eje de giro del rotor, el fenómeno se presenta en la Figura 20. Tercera configuración de imanes propuesta con un disturbio menor y la simulación de los flujos magnéticos se presenta en la Figura 21. Campo magnético estable de la tercera configuración propuesta con un ligero disturbio.

La simulación para este caso nos muestra que las líneas de flujo magnético entre los imanes del estator y los del rotor no son prácticamente discontinuas entre sí.

Se aprecia una saturación en las líneas de flujo magnético en la zona del rotor que se aproxima al estator debido a la perturbación presentada.

Siendo que el sistema tiene simetría en un eje vertical, la configuración de los imanes hace que al desplazarse el rotor horizontalmente el desequilibrio de fuerzas lo obliguen a regresar a su posición original.

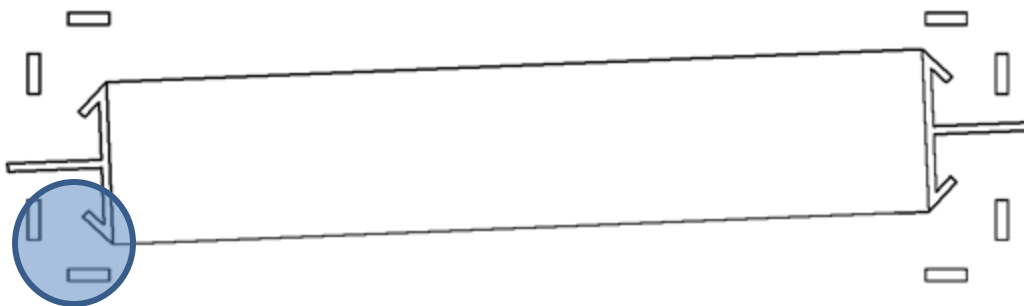


Figura 20. Tercera configuración de imanes propuesta con un disturbio menor

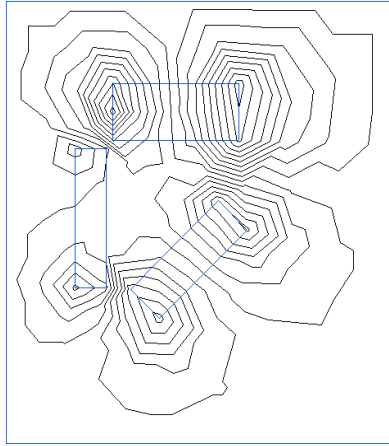


Figura 21. Campo magnético estable de la tercera configuración propuesta con un ligero disturbio

Ahora se presenta una excentricidad respecto al eje de giro del rotor que provoca que un desplazamiento vertical, ya sea hacia arriba o hacia abajo, ver Figura 22 Tercera configuración de imanes propuesta con un disturbio radialmente.

Los efectos son similares a los presentados debido al giro del eje de rotación de las aspas.

La Figura 23. Campo magnético estable de la tercera configuración con un ligero disturbio radial nos presenta la simulación del caso mostrado. Podemos ver que las líneas de flujo magnético son poco continuas entre los imanes del estator y los imanes del rotor.

En este caso, al existir una simetría en un eje horizontal del sistema el desequilibrio de fuerzas provocan que el sistema regrese nuevamente a su equilibrio original.

Hasta este momento esta parece ser una adecuada configuración para realizar la levitación magnética.

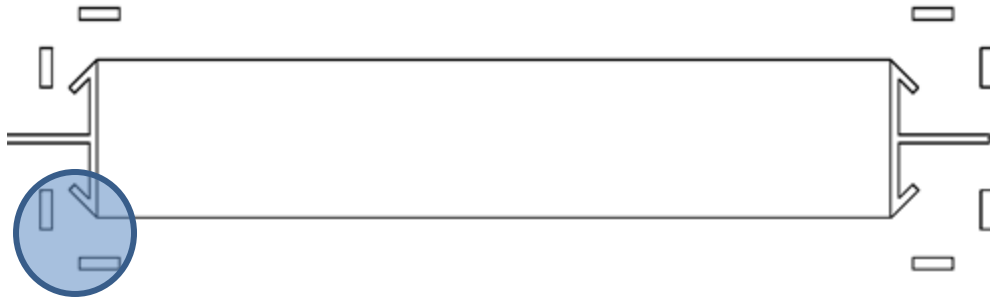


Figura 22 Tercera configuración de imanes propuesta con un disturbio radialmente

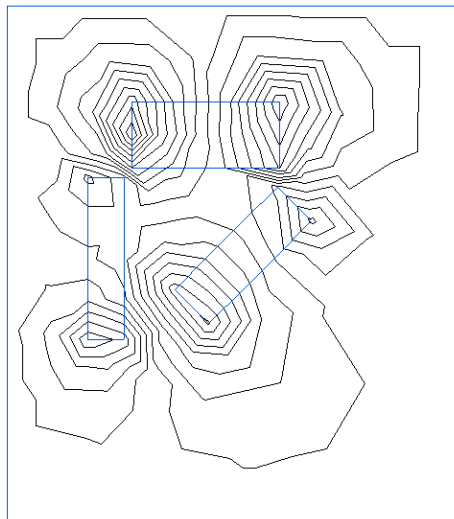


Figura 23. Campo magnético estable de la tercera configuración con un ligero disturbio radial

Un tercer caso de des equilibrio puede presentarse en el que las perturbaciones radial y axial sean mayores. La Figura 24. Campo magnético inestable de la tercera configuración con un disturbio radial y axial nos muestra este ejemplo y se aprecia que las líneas de flujo magnético entre los imanes del rotor y los del estator son mayormente continuas.

En la experimentación con esta configuración se busca trabajar lejos de esta zona para evitar que un disturbio de este tipo haga colapsar el sistema.

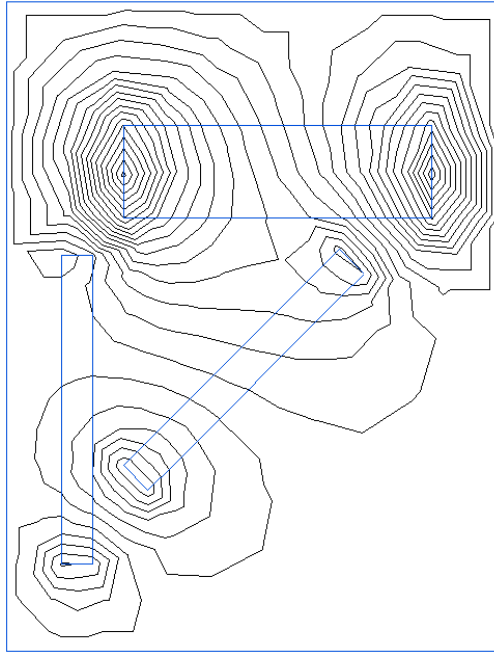


Figura 24. Campo magnético inestable de la tercera configuración con un disturbio radial y axial

Durante la experimentación se presentaron problemas debidos a que se busca contener las fuerzas axiales y radiales con el mismo sistema. La problemática no es contener las fuerzas axiales o las fuerzas radiales, es más bien contrarrestar los momentos que producen que el eje de giro pierda su paralelismo con la dirección ideal de eje.

Este problema nos lleva entonces a buscar controlar las posiciones radial o axial independientemente, por eso se muestra a continuación un modelo diferente en el cual se propone un arreglo magnético con el cual se pueda controlar más independientemente los desbalances axiales y radiales.

Se han colocado los imanes en forma de repulsión directa, un juego en forma de rodamiento axial y otro más en forma de rodamiento radial.

En la figura presentada a la izquierda se aprecia el concepto de la configuración planteada anteriormente, se ve cómo se han dispuesto los imanes que controlaran la posición axial y radial independientemente.

La ventaja de hacerlo de esta forma es que se puede restringir la posición radial y hacer pruebas con el rodamiento magnético axial. De igual forma se puede restringir la posición axial y realizar pruebas con un rodamiento magnético radial

Esta configuración es similar a la presentada en un artículo de la IEEE (Antonino Musolino, 2010), ver Figura 25. Balero magnético para soportar cargas axiales y radiales.

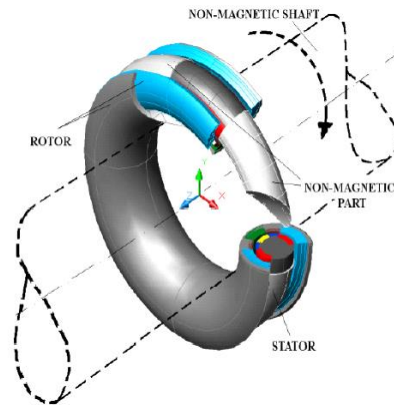


Figura 25. Balero magnético para soportar cargas axiales y radiales



Figura 26. Configuración para contener las fuerzas radiales y axiales independientemente

En la Figura 27. Campo magnético para la cuarta configuración propuesta. se presenta el comportamiento del flujo magnético para la configuración propuesta en la Figura 26. Configuración para contener las fuerzas radiales y axiales independientemente se puede ver que las líneas de flujo son muy densas y no son continuas, esto nos indica que las fuerzas entre el estator el rotor son muy grandes y se presentan en forma repulsiva.

Sin embargo se aprecian una serie de líneas de flujo magnético en donde existe continuidad entre el flujo del rotor y el estator. Esto nos indica que en alguna zona las fuerzas magnéticas entre los imanes del rotor y del estator se vuelven

atractivas. Por tal razón se tiene que tener precaución de no trabajar el sistema en esta zona puesto que resultará en una falla.

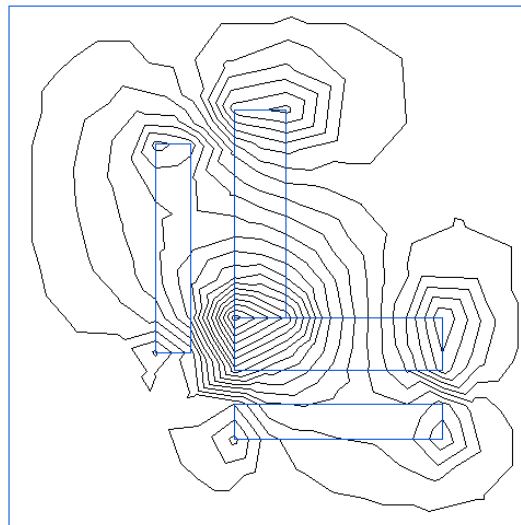


Figura 27. Campo magnético para la cuarta configuración propuesta.

Ahora se muestra el análisis de las posiciones más críticas que puede presentar un rodamiento magnético de acción axial y acción radial. Las simulaciones que se muestran de la Figura 28 a la Figura 32 se realizaron en forma de problema magnético planar con una profundidad de 10mm, el material de simulación de los imanes fue NbFe32 con dimensiones de 3mm por 12mm por 10 de profundidad, excepto para los imanes internos del estator, para estos la dimensión fue de 5mm por 12mm por 10mm de profundidad.

La Figura 28 sirve como referencia para ver los componentes del rodamiento a analizar.

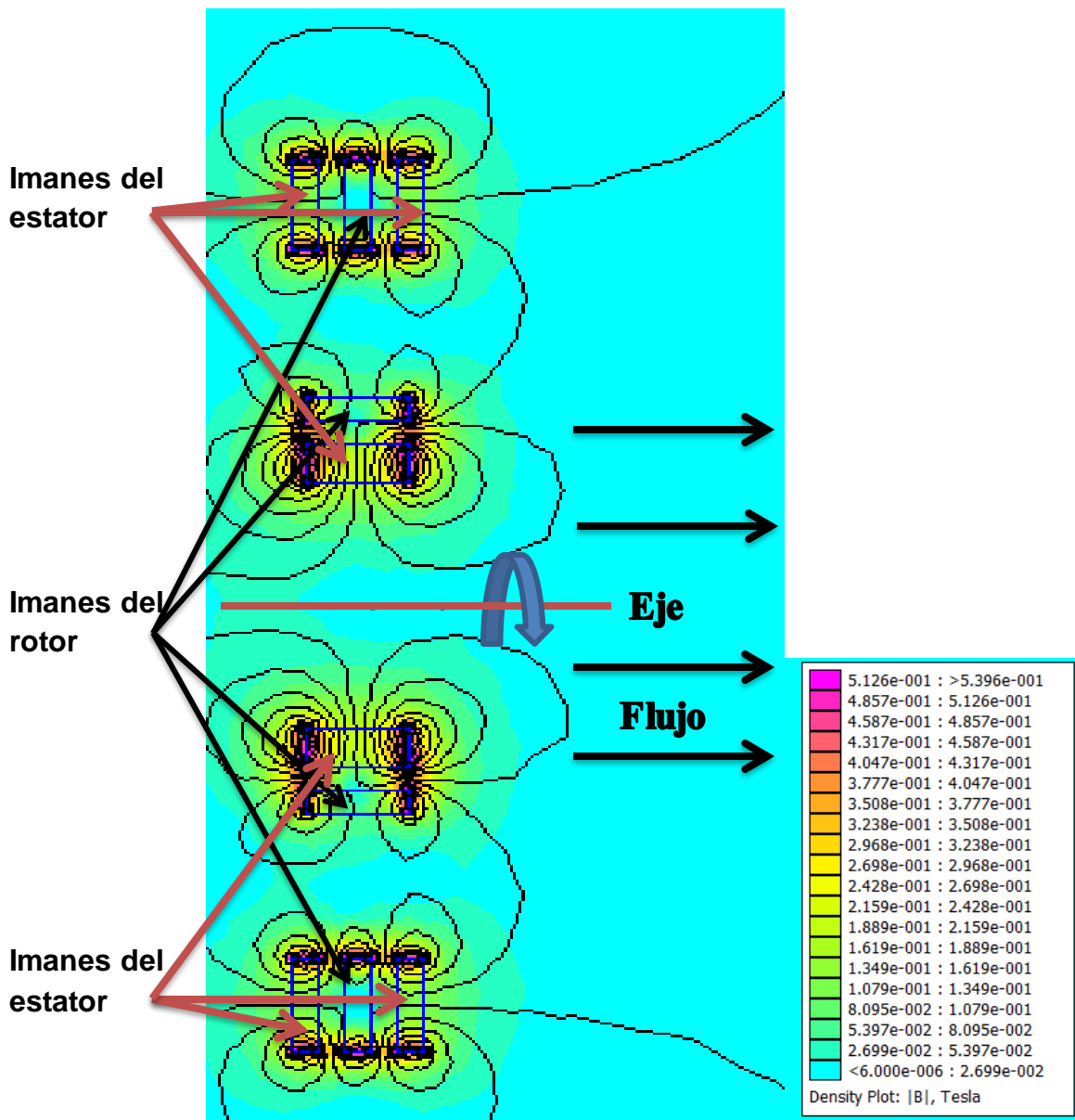


Figura 28 Simulación de un rodamiento de acción axial y radial con un corte lateral.

En la Figura 29 se muestran los efectos en el rodamiento si se tienen un giro del rotor perpendicular al eje del giro y un desplazamiento vertical de 2mm, cabe mencionar que la tolerancia entre el rotor y estator es de 3mm, la fuerza horizontal y vertical fue en X de -3.59N y en Y de 5.5N, lo que, al contrario de lo esperado, nos indica que el rotor quedaría en una posición que lo inhabilitaría para operar debido a que se espera una fuerza de acción en y negativa para poder regresar el rotor a su posición, lo cual no ocurre.

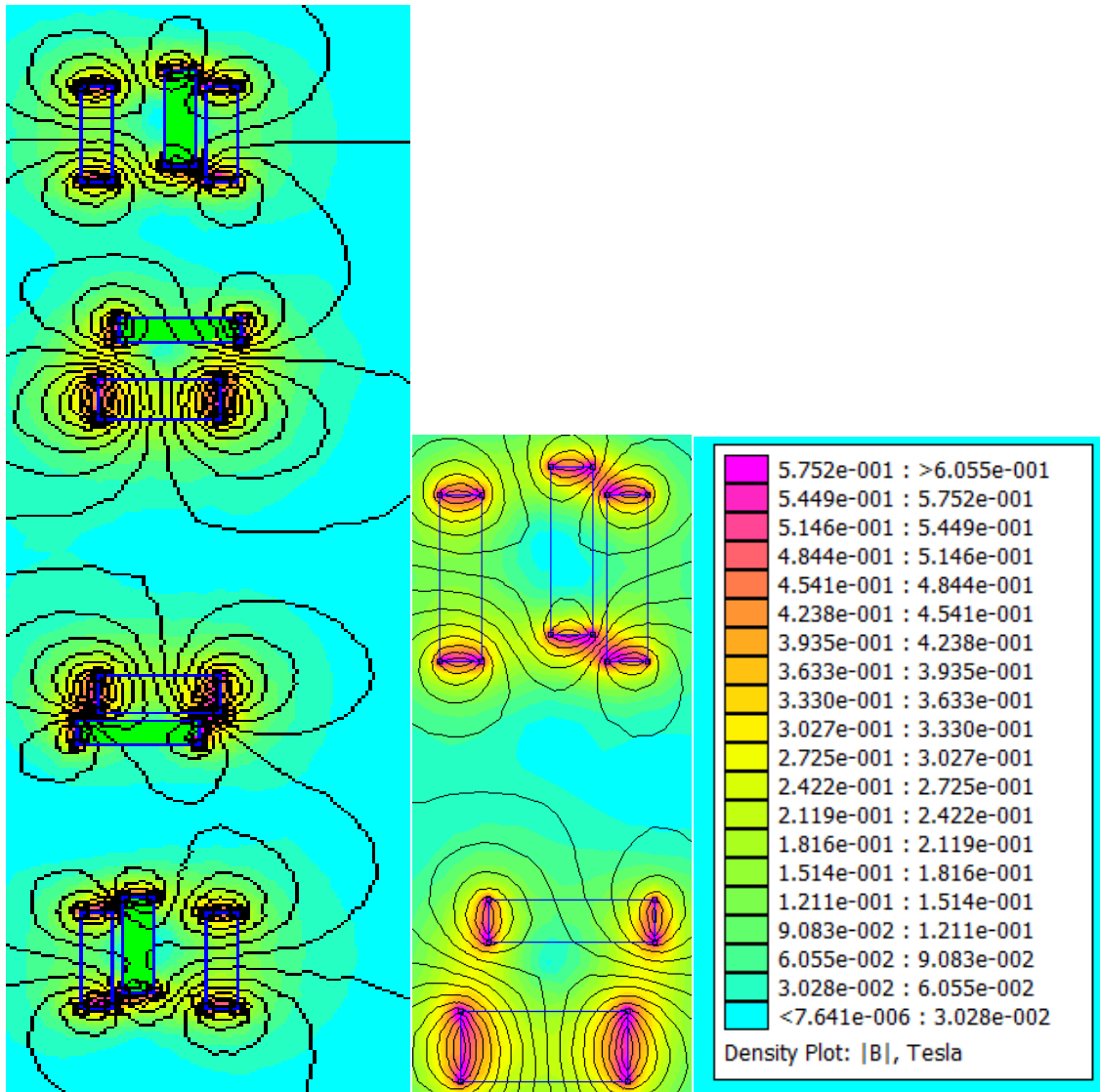


Figura 29 Simulación de un rodamiento de acción axial y radial con un corte lateral girado en sentido horario y desplazado verticalmente 2mm

En la Figura 30 realizamos una simulación con las condiciones presentes en el caso anterior, a diferencia del caso de la Figura 29 la simulación se realizara con una tolerancia entre el estator y rotor de 1mm tanto axial como radialmente, los datos arrojados por la simulación son que la fuerza en X es de -0.359N, disminuyendo respecto al caso anterior, por otro lado la fuerza en Y es de 6.94N, siendo considerablemente mayor a el caso anterior y aguzando el problema de dejar sin poder operar al rotor. Se puede concluir con brevedad que la aplicación de rodamiento magnético axial y radial para este caso de estudio es impráctico.

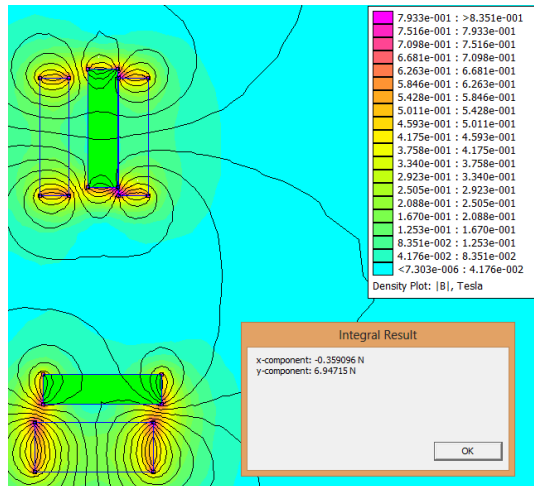


Figura 30 Simulación de un rodamiento de acción axial y radial con un corte lateral desplazado a la derecha 0.9mm y desplazado verticalmente 0.9mm

En la Figura 31 se observa parte de la simulación realizada en la cual se eliminó el rodamiento radial, dejando solo los imanes de acción axial y haciendo la suposición de que existe una restricción radial, en este problema se plantea el desplazamiento del rotor en una forma horizontal de 2mm dentro de una tolerancia de 3mm, llegando al resultado que la fuerza de acción axial es de -9.206N, ejerciendo ésta en la dirección indicada como para regresar el rotor a su posición neutral, por otro lado la cantidad de fuerza radial es de -0.13 casi despreciable respecto a la fuerza en Y, siendo esta sostenida por efecto de la restricción radial.

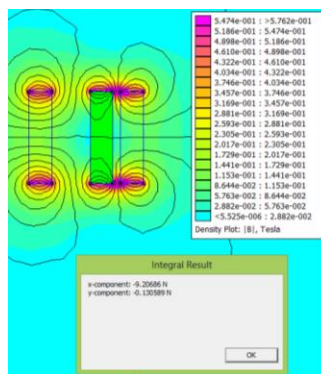


Figura 31 Simulación de un rodamiento de acción axial con un corte lateral desplazado a la derecha 2mm.

En un último caso, en la Figura 32 se presenta la simulación del rodamiento de acción axial que presenta un giro respecto al eje de rotación del balero magnético, en este caso la simulación nos arrojó una fuerza en X de 0.0078N y en Y de 0.068N, aquí hace su participación el efecto que tiene el torque sobre el rotor siendo este de +0.49Nm, recordando que el torque es positivo en sentido

anti horario y considerando una distancia de 104mm entre los imanes del rotor, tenemos que existe un par de fuerzas de 4.71N que actúan para colocar el rotor en su posición neutral.

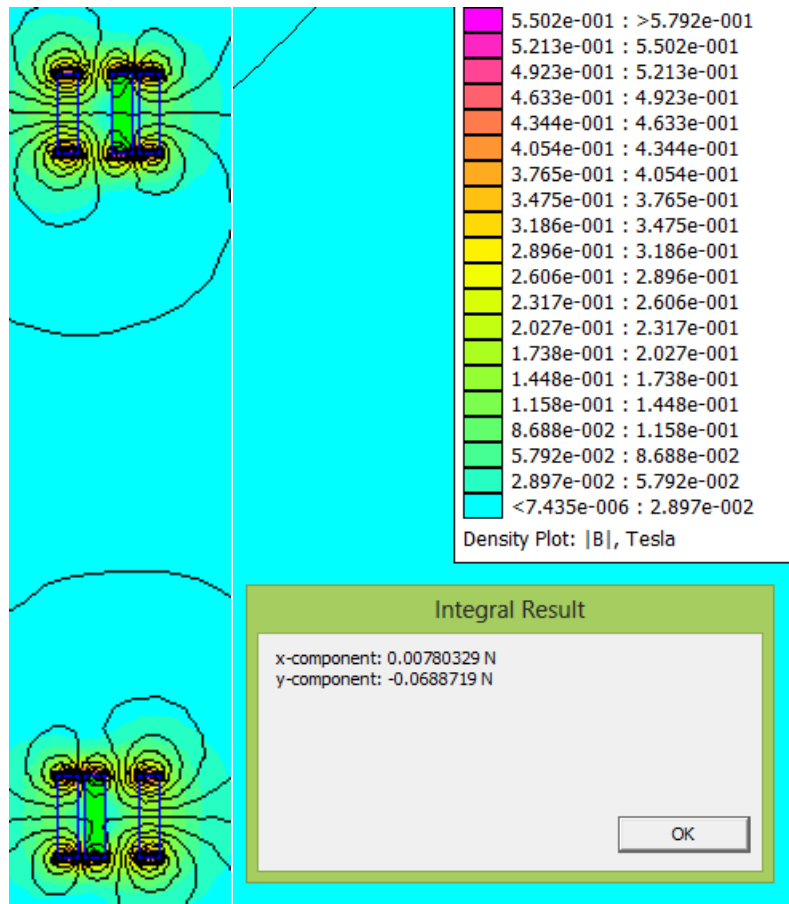


Figura 32 Simulación del rodamiento magnético de acción axial con un corte lateral y un giro en sentido horario del rotor.

8. VALIDACIÓN Y RESULTADOS

Se manufacturó un pequeño prototipo con el fin de demostrar que la sustentación magnética para esta aplicación si es posible.

Para la selección del diseño de álabes que se usarían se corrieron una serie de simulaciones en el software QBlade (Wendler, 2013) para determinar el perfil NACA que ofrece una mayor relación $\frac{C_L}{C_D}$ y que a su vez no tenga picos abruptos en su gráfica $C_L-\alpha$.

Las simulaciones se comenzaron a correr modificando del porcentaje de camber máximo con respecto a la cuerda, iniciando con un perfil NACA 2515 hasta un perfil NACA 9515 incrementando el valor indicado de en 10% para cada simulación.

En la Figura 33. Perfiles NACA 2515 y 9515 se aprecian los perfiles NACA 2515 y 9515.

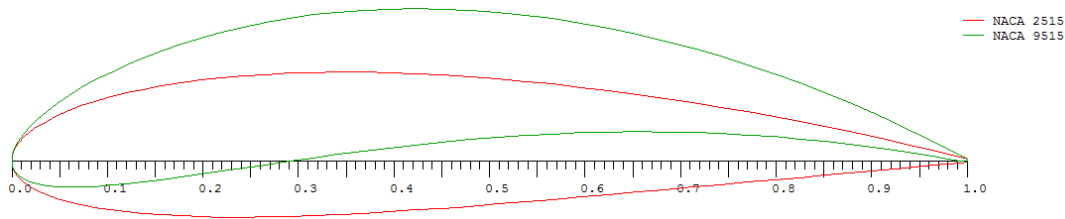


Figura 33. Perfiles NACA 2515 y 9515

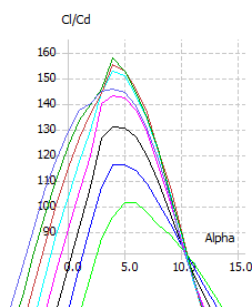


Figura 34. Gráficas Cl/Cd de los perfiles NACA 2515 al 9515

La Figura 34. Gráficas Cl/Cd de los perfiles NACA 2515 al 9515 muestra de una manera gráfica los resultados de la simulación de las gráficas Cl/Cd para los perfiles

alares 2515 al 9515. Los resultados de las relaciones C_l/C_d máximas se muestran en la Tabla 10:

Tabla 10. Relación C_l/C_d máxima para los perfiles NACA 2515 al 9515

Perfil NACA	Relación $\frac{C_l}{C_d}$ Máxima
2515	102
3515	116
4515	131
5515	143
6515	153
7515	155
8515	158
9515	146

Se seleccionó una curvatura máxima del 80% para ser aplicada el perfil NACA. Después se procedió a ajustar la posición del máximo camber realizando simulaciones donde se modificó del 40% al 70% la posición de este respecto a la cuerda.

En la Figura 35 y Figura 33. Perfiles NACA 2515 y 9515 se aprecian los perfiles NACA 8415 y 8715.

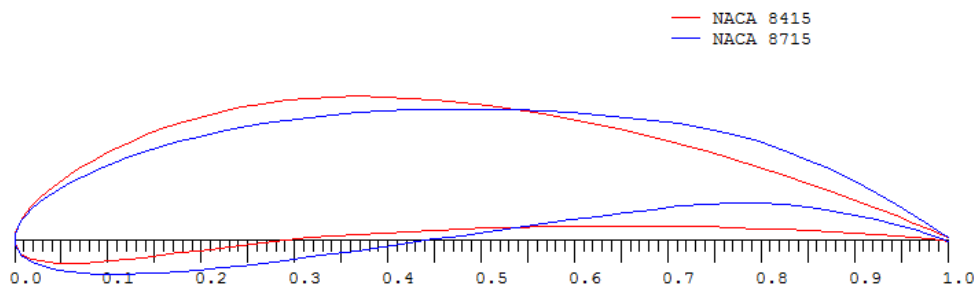


Figura 35. Perfiles NACA 8415 y 8715

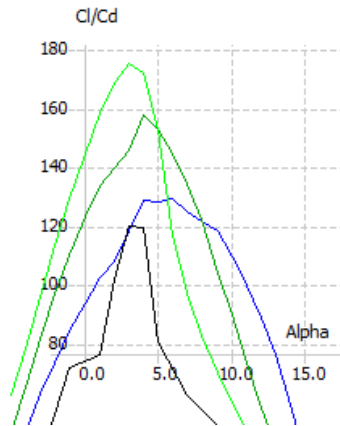


Figura 36. Gráficas Cl/Cd de los perfiles NACA 8415 al 8715

La Figura 36 muestra de una manera gráfica los resultados de la simulación de las gráficas Cl/Cd para los perfiles alares 2515 al 9515. Los resultados de las relaciones Cl/Cd máximas se muestran en la Tabla 11Tabla 10:

Tabla 11. Relación Cl/Cd máxima para los perfiles NACA 8415 al 8715

Perfil NACA	Relación $\frac{C_L}{C_D}$ Máxima
8415	130
8515	158
8615	175
8715	121

Fue seleccionada una posición de camber máximo al 60 de la cuerda al ser la posición en donde surgió la mayor relación $\frac{C_L}{C_D}$. Finalmente se realizaron las simulaciones necesarias para determinar el espesor máximo del perfil, el cual por default se encuentra al 30% de la longitud de la cuerda. Se simularon los espesores del 5% al 25% en donde los resultados se muestran a continuación

En la Figura 37 se aprecian los perfiles NACA 8415 y 8715.

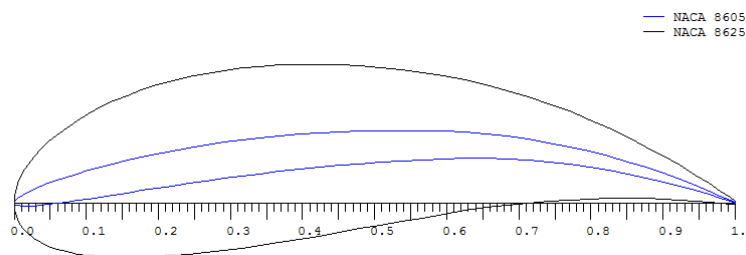


Figura 37. Perfiles NACA 8605 y 8625

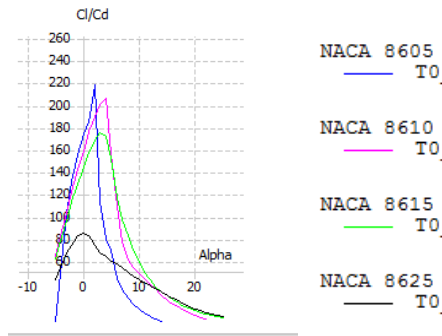


Figura 38. Gráficas Cl/Cd de los perfiles NACA 8605 al 8625

La Figura 38 muestra de una manera gráfica los resultados de la simulación de las gráficas Cl/Cd para los perfiles alares 2515 al 9515. Los resultados de las relaciones Cl/Cd máximas se muestran en la Tabla 12 Tabla 11 Tabla 10:

Tabla 12. Relación Cl/Cd máxima para los perfiles NACA 8605 al 8625

Perfil NACA	Relación $\frac{C_L}{C_D}$ Máxima
8605	220
8610	207
8615	174
8625	88

Cabe decir que las simulaciones para conocer la relación $\frac{C_L}{C_D}$ mayor se puede realizar modificando los parámetros en orden diferente, aún de esta forma los resultados serán muy aproximados entre ellos.

La selección final de entre los perfiles se realizara a partir de la inspección de las curvas $C_L - \alpha$ que nos ofrece cada uno de estos.

En la Figura 39 se presenta se muestran las gráficas $C_L - \alpha$ para los perfiles últimamente analizados.

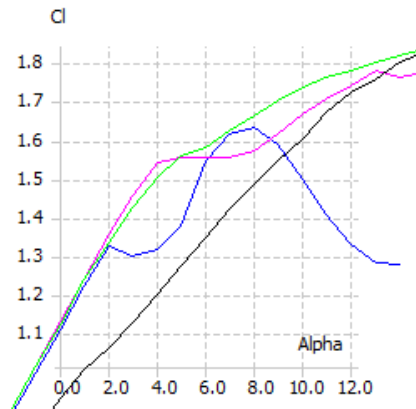


Figura 39. Gráficas Cl vs alpha de los perfiles NACA 8605 al 8625

Apreciando la curva azul que representa los resultados del perfil NACA 8605, se observa que esta tiene cambios en su pendiente muy rápidos, este tipo de cambios generan vibraciones debido las variaciones del viento. La curva rosa representa los resultados para el perfil NACA 8610, el cual tuvo el segundo mejor resultado en la relación $\frac{C_L}{C_D}$, se observa que la curva de su gráfica $C_L - \alpha$ tiene cambios más suaves en su pendiente, por lo tanto se ha seleccionado el perfil NACA 8615 para ser aplicado en el modelo prototipo.

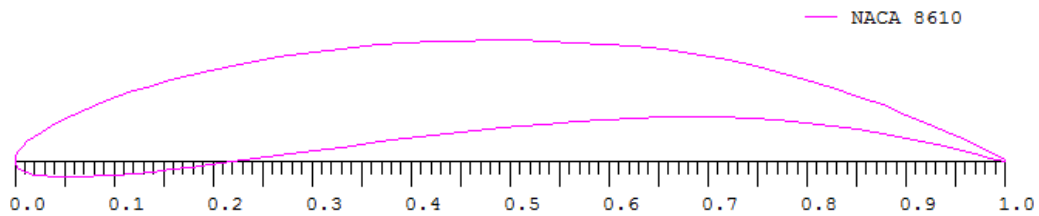


Figura 40. Perfil NACA 8610

La Figura 40 muestra la forma del perfil NACA 8610 seleccionado para ser aplicado en el prototipo de pruebas.

La Figura 41 muestra la curva Cl en contra el ángulo que presenta la línea de cuerda del perfil NACA seleccionado respecto a la dirección relativa el viento.

La curva en color rojo presenta los resultados generales de la magnitud del coeficiente Cl.

La sección de la curva mostrada en verde nos presenta un resultado particular que nos arroja el análisis que se realizó de -5 a 25 grados del ángulo de la línea de curvatura respecto al viento relativo.

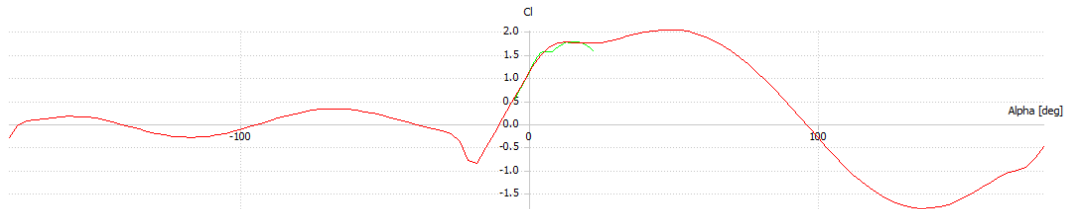


Figura 41. Gráfica Cl del perfil NACA 8610

En la Figura 42 se presentan los resultados del análisis del coeficiente “drag” para el perfil NACA seccionado, al igual que en el caso anterior la curva roja nos presenta los resultados para el análisis hecho de 0 a 360 grados del ángulo de cuerda respecto a la dirección de viento relativo.

La sección de la curva mostrada en verde nos muestra los resultados particulares del análisis hecho de -5 a 25 grados del ángulo de la línea de curvatura respecto a la dirección relativa del viento.

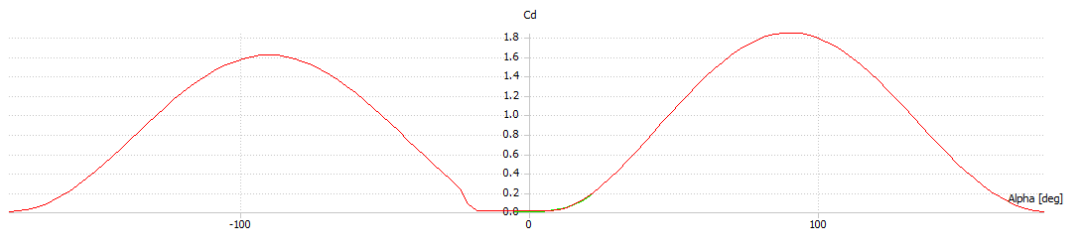


Figura 42. Gráfica Cd del perfil NACA 8610

La Figura 43 es una vista en 3D de la turbina de viento que resulta de los parámetros tomados de la Tabla 13.

Tabla 13. Parámetros del perfil a diseñar.

Pos (m)	Cuerda (m)	Giro (°)	Perfil
0.005	0.04	41	NACA 8610
0.1	0.04	41	NACA 8610

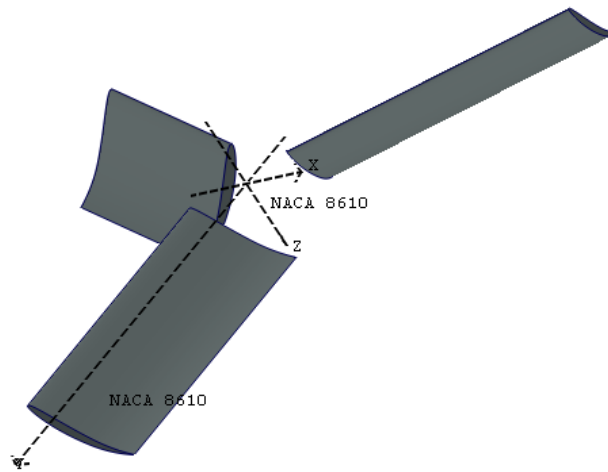


Figura 43. Vista en 3D del al turbina diseñada con Qblade

Las curvas presentadas en la Figura 44 representan la potencia útil extraída del viento respecto a los parámetros de velocidad del viento a diferentes relaciones de velocidad en punta (sup, izq). Potencia útil extraída del viento respecto a la relación de velocidades en punta a diferentes velocidades del viento (sup, der). Relación de velocidad en punta respecto a la velocidad del viento para diferentes velocidades de giro del rotor (inf, izq). Potencia útil extraída del viento respecto al ángulo de ataque para diferentes velocidades de giro del rotor.

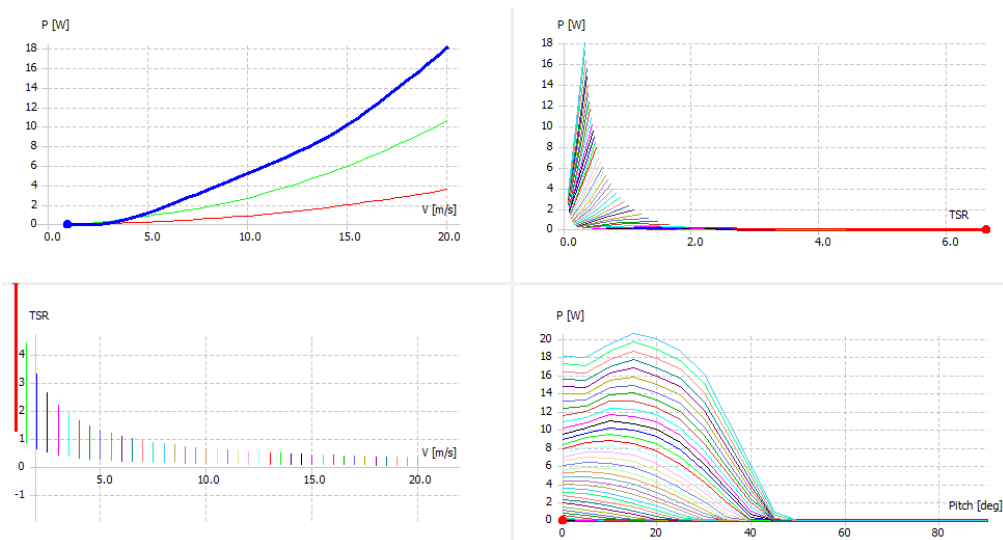


Figura 44. Curvas de potencia de la máquina

Tabla 14. Coordenadas para el diseño del perfil alar.

x	Y _{intrados}	Y _{extrados}
0	0	0
0.05	-0.016	0.042
0.1	-0.014	0.064
0.2	-0.003	0.092
0.3	0.010	0.110
0.4	0.023	0.119
0.5	0.034	0.122
0.6	0.042	0.118
0.7	0.044	0.105
0.8	0.038	0.082
0.9	0.023	0.047
1	0	0

La

Tabla 14 muestra las coordenadas unitarias para diseñar el perfil en un software de diseño, en este caso Inventor. En la Figura 45 se muestran las coordenadas de los puntos trazados con los datos de la

Tabla 14. El procedimiento para unir estos puntos fue la creación de un spline para realizar una curva continua a través de los mismos. Más adelante un proceso de extrusión y arreglo que se muestra en la Figura 46. De igual forma se diseñó el aro que fue colocado alrededor de los alabes mostrado en la Figura 47.

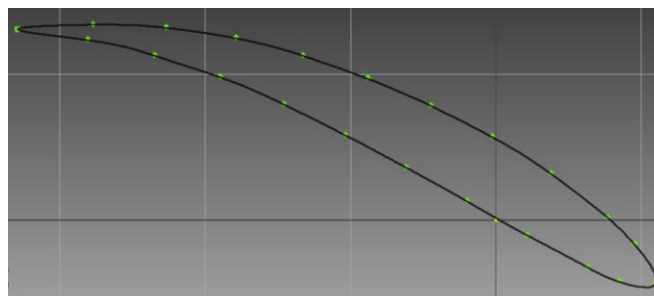


Figura 45. Diseño del perfil NACA 8610 en Inventor

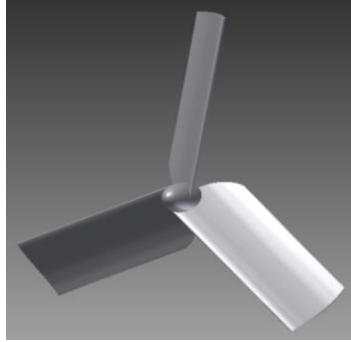


Figura 46. Vista en 3D del diseño de la turbina de viento en Inventor

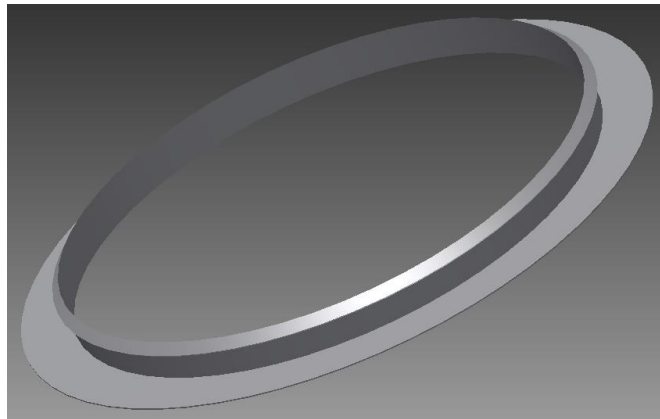


Figura 47. Modelo en Inventor del aro que rodea los álabes



Figura 48 modelo de las aspas y aro impresos en polímero ABS

En la Figura 48 se aprecia el modelo impreso en plástico ABS, en este modelo las aspas tienen un diámetro de 20 cm y un largo de cuerda de 4 cm.

En la Figura 49 se aprecia el aro de magnetos colocado con la finalidad de contener las fuerzas axiales.



Figura 49. Imanes del rodamiento magnético del rotor.

La Figura 50 y la Figura 51 presentan las carcadas generadas en las cuales se colocaron los imanes del campo magnético estático del rodamiento. Las carcadas son de Nylamid, tiene un diámetro exterior de 25 cm, un diámetro interno de 21cm, un espesor de 1.5 cm.

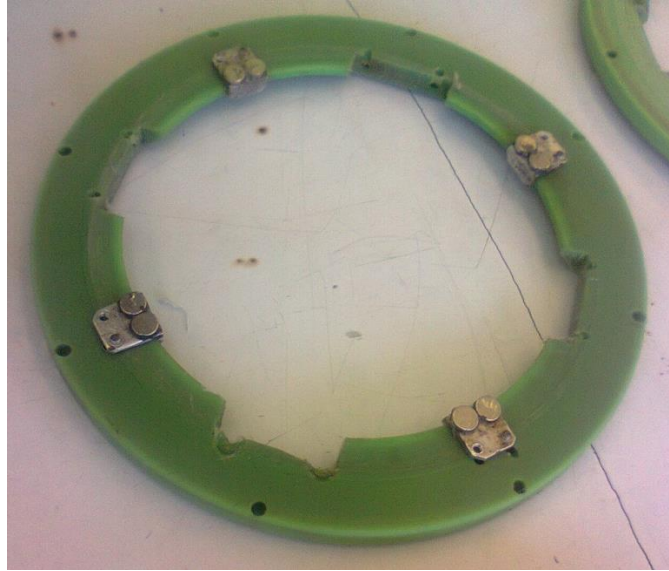


Figura 50. Carcasa en vista superior con imanes del rodamiento magnético del estator

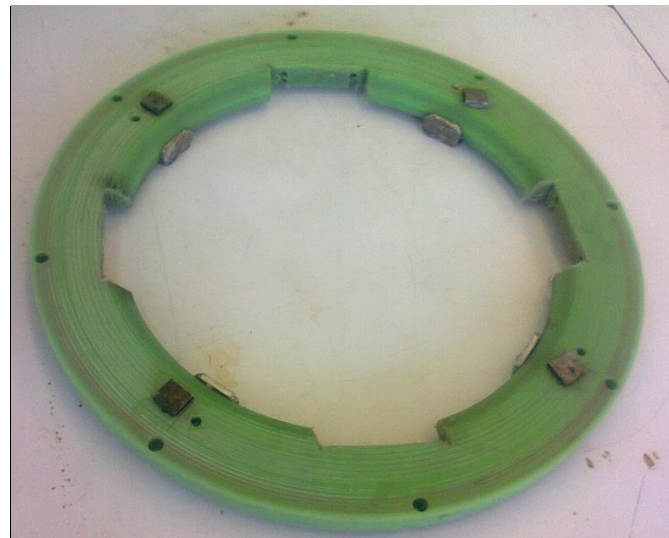


Figura 51. Carcasa en vista inferior

La Figura 52 ofrece una vista más detallada de la forma en que se han colocado los imanes para la parte estática del rodamiento magnético sobre las carcasas. Los imanes fueron pegados sobre una pieza de aluminio, se optó por usar este metal debido a que no es ferromagnético, es decir, los campos magnéticos no tienen efectos sobre él. Se aplicó un barreno, el cual fue machuelado para así poderse sujetar sobre la carcasa.



Figura 52. Vista a detalle de los imanes del estáticos del rodamiento magnético

Debido a la complejidad para soportar las cargas radiales y axiales magnéticamente al mismo tiempo, se ha optado por fabricar un eje que tendrá la función de contener las fuerzas radiales. Para evitar que este tenga efectos indeseables sobre el flujo de aire, la estructura que soportará este eje se ha diseñado con un perfil delgado respecto a la dirección del viento, debido a que las corrientes de aire sufren cambios de dirección a la salida necesitan una mayor área en esta zona, la estructura es colocada en la parte frontal de la máquina. En la Figura 53 se muestra la estructura anteriormente descrita.



Figura 53. Eje y soporte del eje para la restricción radial.

La Figura 54 ofrece una vista lateral del prototipo manufacturado, en el cual, después de una experimentación se determinó aplicar un rodamiento magnético axial, el cual nos ayuda tanto para contener las fuerzas axiales debidas al viento y perturbaciones como los momentos que provocan que el eje de giro de la turbina pierda paralelismo con el eje de giro nominal. Para garantizar que entre el contacto del eje y la turbina no existan muchas pérdidas por fricción existirá solo una delgada zona de contacto entre estos elementos.



Figura 54. Sistema físico ensamblado



Figura 55. Vista a detalle del buje para restringir la posición radial

En la Figura 55 se observa la zona de contacto entre la el eje y la turbina, es importante mencionar que debido a que este es el único punto de contacto el eje se encarga solo de contener el peso mismo de la turbina y las perturbaciones solo del tipo radial, como ya se mencionó el rodamiento magnético axial se encargará de contener los momentos que desalinean el eje de giro.



Figura 56. Vista frontal del modelo físico

El sistema, como con anterioridad de dijo, no contiene elementos que obstruyen el flujo de aire en la salida, la gran ventaja de esto es que se tiene una área mayor de salida y sobre todo no se crean turbulencias inesperadas de hagan decaer en considerable cantidad la eficiencia del sistema.

La Figura 57 es una vista de la parte trasera del sistema en el cual se puede ver que no hay elementos se interpongan a un flujo adecuado del viento, además el perfil de la estructura que soporta el eje fue fabricada de tal forma que ofreciera una resistencia al viento para no generar una turbulencia a la entrada de la turbina.



Figura 57. Vista trasera del modelo físico

El sistema fue probado con un túnel de viento fabricado en la Universidad Autónoma de Querétaro, en la Figura 58 se puede apreciar una vista lateral del túnel de viento que tiene un diámetro de 45 cm, ofrece vientos desde 5m/s hasta 20 m/s aproximadamente. En la Figura 59 se ve el sistema que impulsa el aire, este sistema es movido por poleas con las cuales se puede modificar la velocidad de giro del ventilador lo que en consecuencia ofrece poder variar el la velocidad del viento generada (Navarrete)

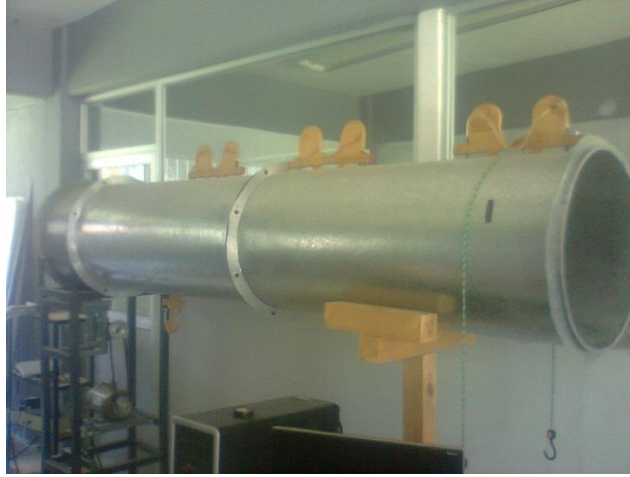


Figura 58. Túnel de viento, vista lateral.



Figura 59. Túnel de viento, vista frontal.

La turbina de viento fabricada fue finalmente puesta a prueba en el túnel de viento, aún a pesar de que el aro magnético alrededor de los álabes no es del todo continuo pues fue fabricado con imanes cuadrados la turbina no tuvo problemas en alcanzar las velocidades nominales de giro en tan solo unos segundos con la aplicación de las velocidades del viento media y alta que proporciona el túnel. Hubo un resultado indeseable, pero esperado con la velocidad del viento más baja, la turbina comenzaba el movimiento, pero una vibración presente no permitió acelerar la turbina a su velocidad nominal de giro para esa velocidad de viento, ver Figura 60.



Figura 60. Modelo puesto a prueba en el túnel de viento

A pesar de que para esta etapa no se consiguió un modelo de turbina de viento sin eje, se consiguió obtener un modelo en el cual se contienen las fuerzas axiales y se alinea el eje de giro con la aplicación de un rodamiento magnético axial,

Este modelo permite experimentar con diferentes distancias entre los imanes situados en el rotor y los del estator, determinar esta distancia óptima conlleva ahora bien la aplicación de un modelo matemático, que puede ser simulado por software y finalmente comprobado experimentalmente con el modelo físico ya fabricado.

A pesar de contener un eje no se requiere la aplicación de un balero de contacto. Y a pesar de haber esta zona de contacto, debido a que el rodamiento axial es el encargado de soportar las fuerzas axiales y desalineación del eje de giro la fricción aquí es muy baja puesto que sobre el eje no hay fuerzas considerablemente fluctuantes.

Para poder aplicar lo un rodamiento que sea capaz de contener las fuerzas axial, radiales y la posición del eje de giro es necesario poder hacer, ya sea el rodamiento axial o el radial muy robustos, casi que por lo menos alguno de los

dos simule ser una restricción en su área de acción para permitir al otro trabajar en una zona mayor de libertad y a su vez el sistema no pierda estabilidad.

Aunque de igual forma no se consiguió la eliminación total de la estructura que se encuentra en la zona del flujo del aire, lo importante fue la eliminación de los elementos a la salida de la turbina, esta es una característica remarcada de este modelo de turbina de viento. Aunque hay elementos a la entrada de la turbina, siendo que el viento aquí entra en una dirección axial al eje de giro, o por lo menos no presenta una gran variación en su dirección estos elementos son muy fáciles de ser llevados a una modelación aerodinámica, sin embargo, en caso de colocar elementos a la salida del flujo de la turbina, aunque estos elementos se modelen aerodinámicos la variación en la dirección del viento causa que se generen turbulencias indeseadas, ocasionando así pérdidas en el sistema inevitables de esta forma.

9. CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS

La levitación magnética tiene muchas aplicaciones, lo interesante de esta en particular es que se reduce la fricción de los elementos lo que trae consigo un mejor desempeño del sistema. Otra característica beneficiosa es que la integración de ciertos elementos descritos anteriormente hace al sistema menos susceptible a fallar. Otro aspecto interesante de un balero magnético aplicado a los aerogeneradores es que no solo se pueden integrar la caja multiplicadora y los rodamientos, sino también los imanes del campo inductor, esto puede lograrse al colocar aros magnéticos continuos para la parte fija del balero magnético e imanes con cierta separación en función de la parte rotatoria del balero magnético, éstos mismos serán aprovechados en función del campo inductor actuando sobre las bobinas.

La eliminación de las fuerzas axiales variables sobre el eje de giro nos otorga sin duda un mayor tiempo de vida de los componentes del sistema, pues estas fuerzas axiales al ser contenidas magnéticamente traen la consecuencia de reducir drásticamente los ciclos de fatiga sobre los elementos mecánicos lo que reduce las posibilidades de falla por este camino.

El sistema a pesar tener una construcción simple y no contener un campo magnético del todo axisimétrico, es decir, contiene marcadas imperfecciones en su construcción por el simple hecho de que el aro magnético fue fabricado con una considerable cantidad de imanes cuadrados, los resultados arrojados fueron, aunque no los ideados del todo, si muy buenos.

Para velocidades del viento moderadas y altas el sistema alcanza rápidamente su velocidad nominal con un bajo nivel de vibraciones. El sistema se comporta muy estable tanto en su posición axial, como en la dirección del eje de giro.

Los problemas encontrados en el sistema se presentaron para bajas velocidades del viento. Aquí los álabes comienzan el movimiento, sin embargo la turbina entra en resonancia, esta vibración impide que el sistema no adquiera aceleración, y aunque no se detiene por efecto del viento, no alcanza su velocidad nominal.

El problema descrito se puede resolver fabricando un aro magnético continuo, con este se eliminan las fluctuaciones magnéticas con lo que la distancia entre los componentes estático y dinámico del rodamiento se pueden reducir, incrementando las fuerzas que contrarrestan los disturbios y consigo las vibraciones que impiden la turbina acelere a bajas velocidades del viento.

10.REFERENCIAS

- Aravind, C. V., Rajparthiban, R., Rajprasad, R., & Wong, Y. V. (2012). A Novel Magnetic Levitation Assisted Vertical Axis Wind Turbine–Design Procedure and Analysis.
- Chen, J., Sun, G., & Xin, J. (2010). Intelligent Aerodynamic Design for Airfoil Based on Artificial Neural Network Method.
- Congxin, Y., Xiaojing, L., Gang, T., & Xiancheng, S. (2011). Aerodynamic optimization design and calculation of a 2MW horizontal axial wind turbine rotor based on blade theory and particle swarm optimization.
- Deng, A. Q., Hong, B. S., & Xiao, F. C. (2009). Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Directly Driven Permanent Magnet Synchronous Wind Generators.
- Díaz Casás, V., Lopez Peña, F., & Duro, R. J. (2006). Automatic Design and Optimization of Wind Turbine Blades.
- Dong, L., Liao, M., Li, Y., Song, X., & Xu, K. (2009). Study on Aerodynamic Design of Horizontal Axis Wind Turbine Generator System.
- Drumheller, D. P., D’Antonio, G. C., Chapman, B. A., Allison, C. P., & Pierrakos, O. (2000). Design of a Micro-Wind Turbine for Implementation in Low Wind Speed Environments.
- He, Q., & Wang, Q. (2011). Design Techniques for Reducing Cogging Torque in Low-speed Permanent Magnet Wind Power Generator.
- Huachun, W., Ziyang, W., & Yefa, H. (2010). Study on Magnetic Levitation Wind Turbine for Vertical Type and Low Wind Speed.
- Islam, J., SvechKarenko, D., Chin, R., Szucs, A., Mantere, J., & Sakki, R. (2012). Cogging torque and vibration analysis of a direct-driven PM wind generator with concentrated and distributed windings.
- Jameson, A., Martinelli, L., Alonso, J. J., Vassberg, J. C., & Reuther, J. (2000). Simulation Based Aerodynamic Design.

- Jia, Z., Lin, H., Fang, S., & Huang, Y. (2015). Cogging Torque Optimization of Novel Transverse Flux Permanent Magnet Generator with Double C-hoop Stator.
- Jiang, J., i Xiao, Z., Zhang, G., & Weng, X. (2011). Aerodynamic Numerical Simulation and Performance Prediction of Wind Turbine Rotor.
- Kolter, J. Z., Jackowski, Z., & Tedrake, R. (2012). Design, Analysis, and Learning Control of a Fully Actuated Micro Wind Turbine.
- Lee, G. C., & Jung, T. U. (2013). Cogging Torque Reduction Design of Dual Stator Radial Flux Permanent Magnet Generator for Small Wind Turbine.
- Lee, G. C., & Kang, S. M. (2013). Permanent Magnet Structure Design of Outer Rotor Radial Flux Permanent Magnet Generator for Reduction Cogging Torque with Design of Experiment.
- Lee, G. C., Kam, S. H., & Jung, T. U. (2014). Design on Permanent Magnet Structure of Radial Flux Permanent Magnet Generator for Cogging Torque Reduction and Low Torque Ripple.
- Liu, P., Zhao, W., & Zhu, J. (2011). Blade Aerodynamic Design and Performance Evaluation of Certain 1.5MW Horizontal.
- Macías González, B., Gómez García, C., Azucena Coyotecatl, H., & Vergara Limón, S. (2010). Characterization of a System Suspended by Permanent Magnets.
- McGowan, R., & Komerathn, N. (2012). Validation of a Prediction Model for Control of Micro Wind Turbines.
- Patel, N., & Uddin, M. N. (2012). Design and performance analysis of a magnetically levitated vertical axis wind turbine based axial flux PM generator.
- Rapin, A., Commet, S., Monroe, A., Hendley, J., & Pourmovahed, A. (2015). Design and testing of horizontal axis wind tirbine blades and components to increase efficiency.

- Sivachandran, P., Venkatesh, P., & Kamaraj, N. (2008). Cogging Torque Reduction in Dual-Rotor Permanent Magnet Generator for Direct Coupled Stand-Alone Wind Energy Systems.
- Stylianidis, N., Macquart, T., & Maheri, A. (2014). Aerodynamic Design of Wind Turbine Blades Considering Manufacturing.
- Tarfaoui, M., Shah, O., Khadimallah, H., & Pradillon, J. Y. (2013). Effect of spars cross-section design on dynamic behavior of composite wind turbine blade: modal analysis.
- Ying, P., Chen, Y., & Xu, Y. (2012). Computational Modelling of Blades for a Novel Wind Turbine System.
- Zhang, H., & Maheri, A. (2014). A Software Tool for Optimising Structural and Material Configurations of Wind Turbine Adaptive Blades.
- Zhang, L., i Zhou, Z., & Lei, Y. (2009). Design and Research of High-Performance Low-Speed Wind Turbine Blades.