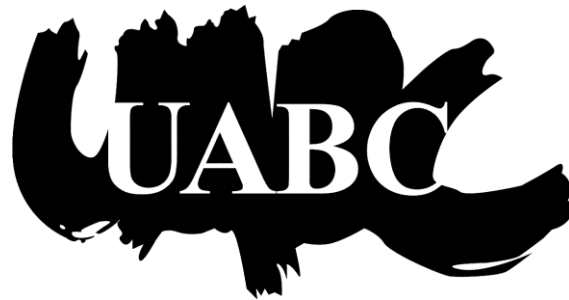


Estudio de un Aerogenerador de Baja Capacidad en Condiciones de Arranque

TESIS PARA LA
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA



Para obtener el grado de
Doctor en Ingeniería

Presentada por
PEDRO F. ROSALES E.
Ing. Eléctrico, UABC.

Dirigida por
Dr. Jesús Cerezo Román

Mexicali 2014

ÍNDICE

Resumen	1
1 Introducción.....	3
1.1 <i>Sistemas Eólicos de Baja Capacidad.....</i>	<i>4</i>
1.2 <i>Antecedentes</i>	<i>5</i>
1.3 <i>Justificación</i>	<i>7</i>
1.4 <i>Objetivo.....</i>	<i>8</i>
1.4.1 <i>Objetivo General.....</i>	<i>8</i>
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	<i>8</i>
1.5 <i>Organización de la Tesis.....</i>	<i>8</i>
2 Descripción de Aerogeneradores de Baja Capacidad.....	10
2.1 <i>Principales Componentes de un Aerogenerador de Baja Capacidad.....</i>	<i>11</i>
2.1.1 <i>Alabes.....</i>	<i>12</i>
2.1.2 <i>Buje</i>	<i>13</i>
2.1.3 <i>Eje</i>	<i>13</i>
2.1.4 <i>Caja Multiplicadora.....</i>	<i>14</i>
2.1.5 <i>Generador Eléctrico</i>	<i>14</i>
2.1.6 <i>Veleta</i>	<i>15</i>
2.1.7 <i>Torre</i>	<i>16</i>
3 Diseño del Aerogenerador	17
3.1 <i>Principios de Aerodinámica.....</i>	<i>18</i>
3.2 <i>Diseño de los Alabes</i>	<i>21</i>
3.2.1 <i>Potencia Requerida del Viento</i>	<i>22</i>
3.2.2 <i>Calculo del Área de Barrido.....</i>	<i>22</i>
3.2.3 <i>Calculo de revoluciones por minuto</i>	<i>24</i>
3.2.4 <i>Selección de Perfil del Alabe</i>	<i>25</i>
3.3 <i>Calculo de Cuerda Promedio</i>	<i>26</i>

3.3.1	Parametrización del Alabe.....	28
4	Principios de Baleros Magnéticos Activos	30
4.1	Introducción.....	30
4.2	Clasificación de Baleros Magnéticos	33
4.3	Selección y Características de un Balero Magnético Activo	39
4.4	Generalidades de Diseño de un Balero Magnético	42
4.4.1	Capacidad de Carga, Flujo Magnético	42
4.4.2	Geometría	42
5	Modelado Matemático del Arranque del Aerogenerador	44
5.1	Descripción del Sistema del Aerogenerador	44
5.2	Momento del Alabe	45
5.3	Arranque del Aerogenerador	46
5.4	Fricción Durante el Arranque	47
5.5	Aerogenerador con Balero Magnéticos.....	51
5.6	Torque de Arranque Magnético.....	53
5.7	Resolución de Algoritmo.....	53
5.8	Resultados.....	55
6	Conclusiones.....	62
6.1	Conclusiones	62
6.2	Recomendaciones.....	63
6.3	Trabajos Futuros	63
	Bibliografía.....	65
	Listado de Figuras	68
	Listado de Tablas	70
	Anexos	71

RESUMEN

Los aerogeneradores de baja capacidad están comenzando a jugar un papel importante en la sociedad actual, sobre todo en los sistemas de energía renovable, ya que pueden ayudar de manera distribuida a disminuir costos de energía y elevar la calidad de vida en zonas rurales. También se ha identificado que los precios siguen siendo elevados, sin embargo con la producción masiva de ellos se puede disminuir su precio. Aún quedan algunos detalles por solucionar, tanto tecnológicos como políticos en materia de regulaciones, donde la reforma energética aprobada en el 2013 obliga a México incrementar su producción de energía eléctrica a través de energías renovables, buscando cumplir para el 2024 con el 35% de la generación nacional en energías renovables (Federal 2014). Lo que hace necesario que en países como México que no cuentan con una tecnología madura, comiencen a adquirir conocimiento más profundo asimilando las lecciones aprendidas por países con más experiencia.

Una de las diferencias notables de los aerogeneradores de gran capacidad es que están generalmente situados en zonas de mucho viento, donde para iniciar a generar el aerogenerador ocupa de un motor que inicie el giro del rotor, por otra parte los aerogeneradores de pequeña capacidad están diseñados para aplicaciones en áreas remotas, donde a menudo operan con velocidades de viento promedios bajas y no son impulsadas por ningún motor para ponerlos en marcha. Así el arranque es puramente dependiente del torque generado aerodinámicamente en los alabes y esto, puede tener un gran efecto sobre la economía de una turbina en un sitio particular, ya que puede ser diseñado para las condiciones geográficas particulares del lugar. Por lo que en este trabajo se presenta un estudio de la una comparación teórica entre un aerogenerador de 500 W con baleros de bolas utilizados convencionalmente y otro con baleros magnéticos, eliminando así la fricción que los primeros aportan, de esta forma mejora con un arranque más rápido y una mayor eficiencia de generación en el sistema.

El objeto principal de esta tesis hace énfasis en el estudio del comportamiento del arranque de un aerogenerador de baja capacidad. El estudio consiste en un modelo matemático en condiciones transitorias durante el arranque del aerogenerador, lo que significa conocer los cambios de aceleración de los alabes desde una posición estática hasta llegar a condiciones nominales y estacionarias. El análisis consistió en el estudio del comportamiento del aerogenerador bajo

distintas velocidades de viento a las cuales se encuentra sometido en la etapa de arranque. Los resultados mostraron que para una velocidades de 8 m/s, indica que hay un incremento del 7.2 % de generación eléctrica en un aerogenerador con baleros magnéticos (592.8 W) a uno convencional (550.3 W). Finalmente, el arranque para ambos aerogeneradores se inicia a una velocidad de 3 m/s. Para una velocidad de 4 m/s se encuentra un tiempo más corto de arranque el aerogenerador de baleros magnéticos con una diferencia de 8.96 s, disminuyendo esta diferencia al incrementar la velocidad del viento.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha existido un incremento en el aprovechamiento de las energías renovables a nivel global, tales como la energía solar a través de sus formas térmica y fotovoltaica, y la energía eólica con el uso de aerogeneradores. Este auge en las energías renovables se ha dado principalmente porque países de primer mundo como Estados Unidos de América y Alemania se han visto envueltos en problemas energéticos, tales como contaminación y escases de recursos fósiles. Al verse envueltos en estos problemas y buscando una solución con el aprovechamiento de las energías renovables, la energía eólica a través del aprovechamiento de aerogeneradores ha resultado ser una tecnología rentable comparada con sus competidoras más cercanas como la energía solar fotovoltaica. Con un incremento anual de capacidad instalada del 20% a nivel mundial, 238 Giga Watts instalados en el año 2011 y generando cerca del 3% del consumo mundial de ese mismo año, se vuelve innegable que existe una penetración en el mercado de esta tecnología, en la Figura 1 se muestra el incremento de potencia de los aerogeneradores desde el año 1980 hasta la actualidad.

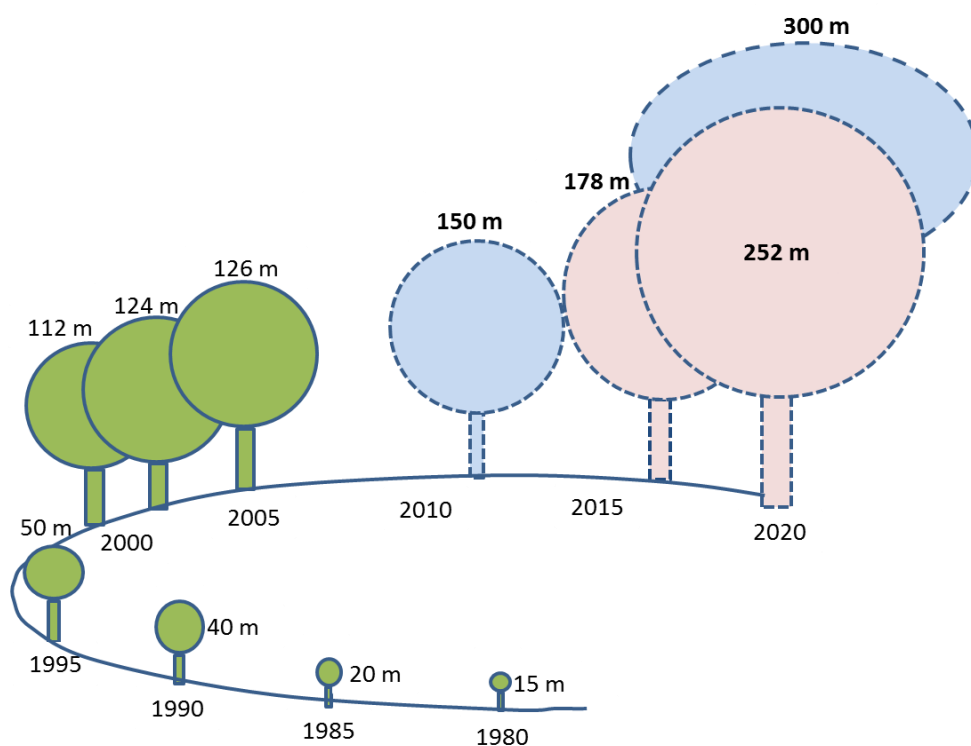


Figura 1 Incremento de potencia de aerogeneradores

1.1 SISTEMAS EÓLICOS DE BAJA CAPACIDAD

La industria moderna de los aerogeneradores de baja capacidad (ABC), nace en la crisis energética de 1970, donde la tecnología retoma los diseños de 1930 para comenzar y desarrollar nuevos proyectos con ideas que satisficieran las necesidades durante esa crisis. Estos desarrollos se dieron en países industrializados como Alemania, Estados Unidos y Dinamarca.

México cuenta con un plan de desarrollo energético, mejor conocido como “Estrategia Nacional de Energía 2013-2027” propuesto para apoyar la reforma energética, que plantea que para el año 2024 la generación de electricidad por fuentes de energías renovables sea de un 35%. Lo cual obliga no únicamente a adquirir e instalar tecnología extranjera en el país para lograr las metas propuestas, si no también generar las tecnologías propias del país, generando conocimiento, industria y comercio en este ámbito. El aprovechamiento de la energía eólica en México se ha dado de formas aisladas, por lo que es difícil encontrar información precisa de los avances realizados en el país. Sin embargo se cuenta ya con programas que pretenden utilizar los ABC para elevar la calidad de vida de zonas rurales del país. Con el presente se pretende establecer como primer paso, criterios para comenzar el desarrollo de un ABC que satisfaga necesidades en el estado de Baja California.

La industria de ABC ofrece una variedad de productos para distintos ambientes y aplicaciones. Las maquinas tienen un rango que oscila desde los 400 W para cargas pequeñas como baterías, a los sistemas de 3-15 kW que se usan en sistemas para casa, hasta aquellos que generan hasta 100 kW de electricidad para cargas como pequeños comercios.

A pesar de que la tecnología sobre ABC ha estado en constante desarrollo desde 1970, aun se necesita mejorar la confiabilidad de los sistemas, eliminar ciertos sonidos molestos, y disminuir costos de fabricación e instalación. Existe aún mucho por hacer en estos aspectos, un ejemplo de esto, es que se estima que si se incrementa el volumen de ventas de los ABC se puede reducir su costo de construcción desde un 15-30%. En la siguiente (Tabla 1) se muestran algunos de los problemas actuales divididos en tres grupos, problemas tecnológicos, de mercado y de regulación, a corto y mediano plazo, todos estos para Estados Unidos de Norteamérica, lo cual no excluye que México tenga las mismas dificultades.

Tabla 1 Resumen de barreras identificadas

Barreras Tecnológicas	Barreras de Mercado	Barreras de Regulación
Corto Plazo	Corto Plazo	Corto Plazo
- Alto Costo de los ABC. - Poca Confiabilidad.	- Falta de normas efectivas de construcción. - Poca visión de la industria. - Ideas falsas sobre el recurso eólico.	- Falta de incentivos federales. - Zonas restringidas. - No existen incentivos en impuestos.
Mediano Plazo	Mediano Plazo	Mediano Plazo
- Productividad Obstaculizada por la electrónica de potencia. - Sonidos altos para zonas residenciales. - Confiabilidad.	- Capital insuficiente. - Impacto financiero complicado.	- Falta de mas incentivos por parte del estado. - Falta de normas para interconexión. - Falta de modelos nacionales para mediciones y reglas para cada zona.

1.2 ANTECEDENTES

El desarrollo de aerogeneradores en México se inició en el año de 1978, por parte de IIE cuya capacidad era de 1.5 kW con rotor horizontal de tres aspas de lámina de aluminio (IIE 2003). Este fue puesto en marcha para realizársele pruebas de caracterización, con lo que se comprobó que las expectativas de diseño fueron alcanzadas. Lamentablemente, estando frenado y con las aspas amarradas a la torre, un remolino lo impacto, teniendo como resultado su destrucción. Este prototipo no fue reconstruido al evidenciarse problemas de suministro de componentes y materiales, así como del control de calidad en los procesos de fabricación.

Seguido a este se realizó un aerogenerador de 2 kW denominado Fénix, el cual tenía las siguientes características: contaba con tres aspas de fibra de vidrio de alta eficiencia aerodinámica, generador trifásico de imanes permanentes y sistema de control a base de timón de cola plegable.

Albatros I constituye el mayor aerogenerador desarrollado en México de 10 kW de potencia eléctrica, utilizo un generador de imanes permanentes de 28 polos y rotor de tres aspas de 11

metros de diámetro, fue concebido para operar como autobomba eléctrica, accionado en régimen de velocidad variable.

Otros modelos en México son, el Albatros II, el Colibrí de 5 kW, el cual ha sido el único aerogenerador fabricado y comercializado en México desde principios de 1980. Por último el Avispa con una capacidad de 300 Watts, construidos por el Instituto de Investigaciones Eléctricas.

En cuanto a los aerogeneradores con baleros magnéticos, se han realizado distintas investigaciones en los últimos 5 años. Huachun Wu y Xiuzhen Wang propusieron el desarrollo de un aerogenerador de baja capacidad con baleros magnéticos activos y pasivos (hibrido) híbridos en el año 2009, donde introducen a la estructura y principios de operación de un balero magnético híbrido. Los datos geométricos del balero son optimizados usando análisis del elemento finito (Huachun, Xiuzhen and Yefa 2009).

También presentó un modelo de un controlador axial y su respectiva simulación. Otra propuesta de aerogeneradores con levitación magnética la da Sanza Kazadi, propuso un sistema de imanes permanentes llamado el eje épsilon (eje-e), para un aerogenerador vertical. en el describe y analiza un balero magnético compuesto de dos imanes permanentes, uno hembra y uno macho, colocados uno frente al otro, haciendo que las polaridades sean similares y exista una fuerza de repulsión entre estos, logrando así la levitación (Sanza, et al. 2008).

En el 2010 Nobuyuki Kurita propuso un balero magnético híbrido de imanes permanentes para un generador eléctrico hidráulico, el cual diseño el estator aplicando el método de análisis del elemento finito para campos magnéticos, donde también analizó el desempeño mecánico del rotor de generador hidráulico, que a pesar de no ser un aerogenerador, los principios aplicados por el autor pueden ser transportados a los aerogeneradores (Kurita, Keisuke and Ishikawa 2010).

Con respecto a las investigaciones realizadas sobre el arranque de un aerogenerador horizontal, se han reportado pocos estudios. Ebert P.R. y Wood D.H en 1997, enfatizaron la importancia del estudio del arranque de los aerogeneradores, mencionando como los coeficientes de sustentación son los únicos que aportan al torque inicial de los alabes en aerogeneradores horizontales, y como este es afectado conforme se incrementa la velocidad de rotación de los alabes. También

hacen notar, que a pesar de que la aerodinámica es complicada debido a los altos ángulos de ataque y bajos números de Reynolds que se presentan, no existen pruebas experimentales al respecto. Continuando con el trabajo de (Ebert and Wood 1997), en 2001, presentaron un trabajo sobre el comportamiento de un aerogenerador de baja capacidad de 5 kW bajo condiciones de arranque con las ecuaciones propuestas.

La importancia de estudiar el comportamiento de arranque de un aerogenerador y su modelo, es que permite conocer su comportamiento dinámico a esperarse bajo distintas condiciones de vientos. Permitiendo un conocimiento más preciso en el aerogenerador y la energía que realmente va ser aprovechada.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El uso de la energía eólica como recurso renovable para la generación de electricidad, se ha incrementado en los últimos 20 años. Esto ha llevado a la producción de aerogeneradores de gran tamaño, los cuales son ubicados en zonas con gran recurso eólico, lejos del consumidor. Esto último, causa que los costos de inversión sean altos. En lo que respecta a los aerogeneradores de baja capacidad, la investigación ha sido escasa, ya que el principal interés era la búsqueda de generación centralizada y de gran capacidad, sin embargo en los últimos años, el desarrollo de nuevos diseños de baja capacidad, han permitido que estos se instalen en áreas metropolitanas, lo que conlleva a un incremento en su demanda comercial, esto se ha debido gracias al concepto de generación distribuida, lo que significa poder instalar equipos que tienen un bajo costo de instalación en zonas rurales, y potenciar el uso en casas habitación en México, interconectados a la red eléctrica.

El uso de baleros magnéticos activos (BMA), se ha visto incrementado en los últimos 5 años, debido a que estos ofrecen un incremento en la eficiencia de diversas maquinas, como pueden ser trenes o máquinas de aire acondicionado. Por ejemplo, la compañía McQuay, presentó un equipo de enfriamiento con levitación magnética que ofrece hasta un 30% de más eficiencia que uno de la misma capacidad sin levitación. Sanza Kazadi et al. (2008) mencionaron que el desarrollo de baleros magnéticos reduce problemas de vibración, ruido, fricción y mantenimiento.

A pesar de que los baleros magnéticos cuentan con más de 25 años de investigación, estos se pueden considerar recientes, ya que aún existen aplicaciones en las que pueden ser usados y no

han sido estudiados. Por ejemplo, actualmente en la literatura de los aerogeneradores, no existen publicaciones de más de 8 años de antigüedad en aerogeneradores con baleros magnéticos. Kumbennuss et al. (2012) analizaron un aerogenerador de eje vertical con baleros magnéticos.

Más allá de esto, todos los documentos revisados están relacionados con propuestas de sistemas de levitación magnética, en los últimos 2 años. Se ha demostrado que los proyectos son factibles de construcción, pero aún hace falta realizar una comparación entre un sistema convencional y uno con levitación magnética. El uso de baleros magnéticos, podría ayudar a incrementar el desempeño de los aerogeneradores de baja capacidad a bajas velocidades de viento. Además, los aerogeneradores dentro de las ciudades, donde existen bajas velocidades de viento podrían ser una opción factible.

1.4 OBJETIVO

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una evaluación de la comparación de un aerogenerador horizontal de baja capacidad con baleros de bolas y magnéticos bajo condiciones de arranque para ser utilizado en lugares de poca disponibilidad de viento..

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Por lo anterior, se requiere cumplir con los siguientes objetivos específicos:

1. Realizar una revisión bibliográfica acerca de aerogeneradores de baja capacidad.
2. Diseñar los alabes, para captar la captación de viento de un aerogenerador de 500 W.
3. Desarrollar un modelo matemático para la simulación del aerogenerador durante su arranque, el cual considere la transformación de energía cinética del viento a mecánica, energía eléctrica durante el arranque del mismo, evaluando el análisis de la eficiencia del mismo.
4. Resolución del algoritmo del matemático mediante el software MATLAB.
5. Comparar la eficiencia entre un aerogenerador convencional y otro con BMA a condiciones de arranque.

1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Esta tesis está integrada por 6 capítulos; El primero presenta el planteamiento del problema y los antecedentes sobre diseño de aerogeneradores enfocados al arranque del aerogenerador en condiciones dinámicas y baleros magnéticos. El segundo capítulo trata sobre generalidades del

funcionamiento de los aerogeneradores, sus principales componentes. El tercer capítulo muestra la metodología utilizada para el diseño del aerogenerador, haciendo énfasis en los alabes. El cuarto capítulo, acentúa la importancia y generalidades de los baleros magnéticos, así como su importancia para un futuro estudio de los mismos. El quinto capítulo trata del modelo matemático utilizado para conocer el comportamiento del aerogenerador durante su arranque. El capítulo sexto concluye el trabajo de la tesis y finalmente se presentan anexos a la tesis, relevante al desarrollo de la misma.

2 DESCRIPCIÓN DE AEROGENERADORES DE BAJA CAPACIDAD

El principio de operación de un aerogenerador consiste en aprovechar la energía cinética del viento y convertirla en energía eléctrica para que esta pueda ser transportada a un punto donde pueda realizar un trabajo.

Los aerogeneradores son clasificados de distintas maneras, principalmente dos de ellas predominan en la literatura; la primera de ellas se debe a la posición que su eje de rotación se encuentra con respecto al suelo, que puede ser horizontales o verticales; la segunda, es por su capacidad de generación, que puede variar desde unos pocos Watts, hasta aerogeneradores MW. La comisión electrotécnica internacional (IEC por sus siglas en ingles), clasifica en la IEC-61400-2 a los aerogeneradores de baja capacidad como aquellos con una potencia de generación menor a 50 kW. Para efectos de esta tesis, esta definición por parte la IEC define al aerogenerador que se propone, el cual presenta las siguientes características, con el cual puede ser asociado a un aerogenerador de baja capacidad:

- Normalmente están ubicados en áreas cercanas donde se requiere la energía
- El generador regularmente tiene un torque resistivo más alto por ser de imanes permanentes, comparado con los generadores síncronos, por lo que se ocupa mayor torque al momento del arranque.
- Los aerogeneradores normalmente tienen un sistema de orientación hacia el viento que consiste en motores que los ajustan, en aerogeneradores de baja capacidad, esto resulta costoso, por lo que únicamente hacen uso de su veleta para orientarse.
- La veleta, vuelve a ser un componente importante en los aerogeneradores de baja capacidad, ya que esta es la que se encarga en muchos casos de frenarlo en caso de un viento que sobrepase sus condiciones de diseño, o que resulte peligroso.

En este capítulo se describen los principales componentes de un aerogenerador y como estos influyen en el aprovechamiento de la energía eólica.

2.1 PRINCIPALES COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR DE BAJA CAPACIDAD

El propósito de un aerogenerador es extraer la mayor cantidad de energía del viento posible y cada componente del aerogenerador debe ser optimizado para lograr esto (Burton, et al. 2001).

Un aerogenerador está compuesto de 3 etapas de conversión de energía, a través de 3 componentes básicos en todo aerogenerador. Las etapas son: 1. Energía Cinética, 2. Mecánica y 3. Eléctrica (ver figura 1). Este proceso de conversión de energía comienza cuando el viento incide a una velocidad mínima sobre los alabes de un aerogenerador para hacer que estos comiencen a girar (Figura 2.A). Al momento de iniciar el giro de los alabes (Figura 2.B), la energía cinética del viento se convierte en energía mecánica, la cual a través de un eje (Figura 2.C) es transportada a la flecha del aerogenerador, ocasionalmente tiene una caja de engranes (Figura 2.D) encargada de multiplicar la rotación de la flecha, la cual esta acoplada con el rotor del generador eléctrico (Figura 2.G), que se encarga de transformar esta energía mecánica a energía eléctrica.

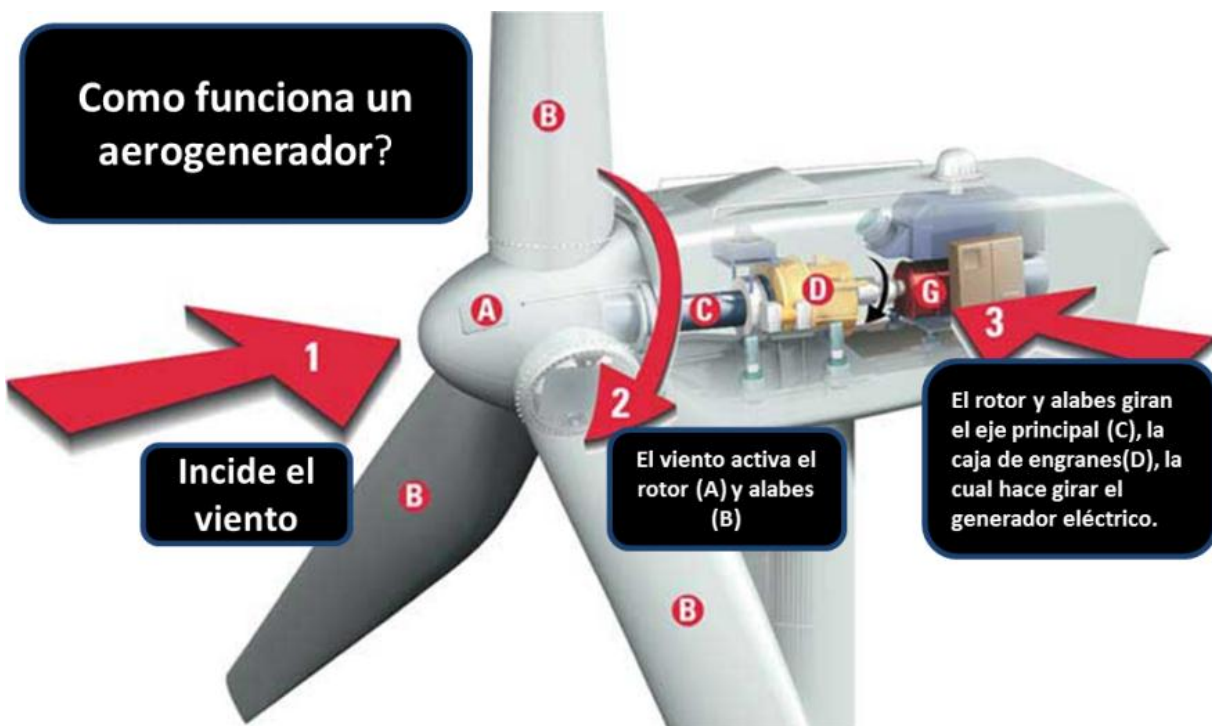


Figura 2 Diagrama esquemático de un aerogenerador (KidWind Project n.d.)

En cuanto a sus componentes principales, en la Figura 3, se presenta una descripción a detalle de la constitución común de un aerogenerador de pequeña capacidad. Iniciando de izquierda a derecha: **La cola o veleta**, encargada de su direccionamiento y frenado por medios aerodinámicos; La **unión de la cola** que se conecta a la **carcasa** de los componentes del aerogenerador; la cual contiene dentro de sí misma, un **balero vertical**, que permite el giro de direccionamiento frente al viento del aerogenerador; **anillos colectores** y **escobillas**, utilizados para evitar nudos de cables eléctricos y transmitir la electricidad; el generador eléctrico, compuesto por un **eje**, un **rotor** y un **estator**; **los alabes**, encargados de aprovechar la energía cinética del viento; **una nariz** en forma de cono; y finalmente **la torre** con su cableado, para posicionarlo a la altura adecuada de captación de viento.

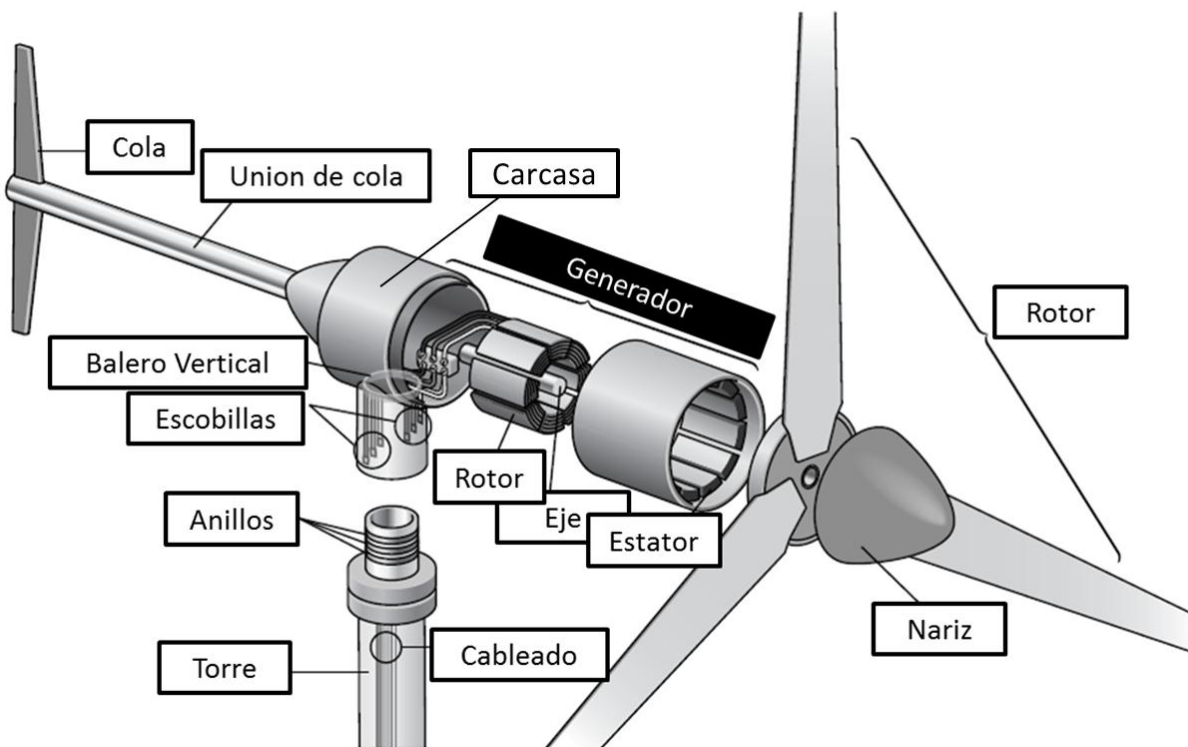


Figura 3 Componentes de un aerogenerador de baja capacidad (Woofenden 2009)

2.1.1 ALABES

El alabe es el dispositivo encargado de captar la energía cinética del viento y convertirla en energía mecánica, esto se logra a través de fuerzas que se generan en su superficie haciéndolos girar sobre su propio eje de rotación. Para comprender el funcionamiento de los alabes es necesario conocer la aerodinámica de los mismos, dentro de estos se tienen conceptos como

fuerzas y coeficientes de arrastre y sustentación, las cuales varían según la geometría misma del alabe, en el capítulo 3 se describe más a detalle. En la Figura 4, se puede observar la imagen de un alabe fabricado en madera de un aerogenerador de baja capacidad.



Figura 4 Alabes para aerogenerador de baja capacidad

2.1.2 BUJE

El buje es el dispositivo encargado del acoplamiento entre los alabes y la flecha del aerogenerador. Normalmente se sujeta a través de tuercas y tornillos. Las formas que puede adquirir el buje varían según el diseñador. Los más típicos son redondos (figura 4) con barrenos para disminuir el calentamiento y vibraciones que se genera por la rotación del mismo, o en forma de estrella, como se observa en la Figura 5, el cual es un buje para un aerogenerador de 5 alabes.



(a)



(b)

Figura 5 Bujes en forma redonda (a) y en forma de estrella (b)

2.1.3 EJE

El eje (o también conocido como flecha) es el dispositivo encargado de transferir la energía mecánica del buje a la caja multiplicadora (CM) o directamente al generador eléctrico. Esta debe

ser capaz de soportar el estrés mecánico del torque de arranque y los esfuerzos cortantes a los que es sometida durante la operación continua del aerogenerador, debido al gran momento que se presenta en ella, por lo que es construida en acero. El diámetro de la misma es determinado por el generador eléctrico al que va ser acoplado el buje y los alabes.

2.1.4 CAJA MULTIPLICADORA

La caja multiplicadora es el dispositivo que se encarga de multiplicar la velocidad angular que tienen los alabes o la flecha a una velocidad apropiada para el funcionamiento correcto del generador eléctrico.

Normalmente estos no se encuentran en los aerogeneradores de baja capacidad, ya que las velocidades de rotación que se presentan son entre los 200 a 600 revoluciones por minuto, las cuales son suficientes para un generador eléctrico especialmente diseñado para aerogeneradores de baja capacidad, sin embargo un tipo de caja multiplicadora típica son las del tipo planetario, como la que se presenta en la Figura 6.



Figura 6 Caja multiplicadora con arreglo planetario

2.1.5 GENERADOR ELÉCTRICO

El generador eléctrico es el componente encargado de transformar la energía mecánica en energía eléctrica. Con los primeros aerogeneradores de baja capacidad desarrollados, se utilizaron generadores eléctricos de corriente directa. Sin embargo, en la actualidad se ha dado preferencia a los generadores trifásicos de corriente alterna (CA) de imanes permanentes. (Wood 2011). En la Figura 7 se muestra un generador eléctrico de imanes permanentes.

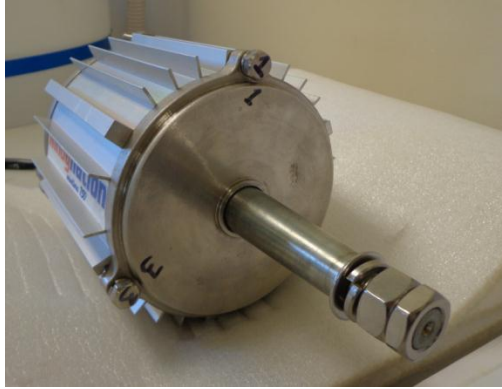


Figura 7 Generador de imanes permanentes

2.1.6 VELETA

Uno de los principales problemas que plantean los aerogeneradores de eje horizontal es la necesidad de su orientación, de forma que el viento incida perpendicularmente al disco de barrido por el rotor, con el fin de obtener la máxima potencia para lograr hacer incidir la mayor cantidad posible de masa de aire en movimiento sobre los alabes, obteniendo la mayor cantidad posible de energía cinética. (Fernandez Diez 2002)

La veleta para los aerogeneradores de baja capacidad también llega a ser empleada como freno aerodinámico, esto cuando llegan a existir vientos excesivos, que pueden llegar a ser devastadores para el aerogenerador. Existen diversos tipos de veletas, dependiendo de la altura, tipo de aerogenerador y condiciones los que será sometido. La Figura 8 muestra dos veletas tipo delta, siendo ambas típicas para aerogeneradores de baja capacidad.



Figura 8 Distintos tipos de veleta para aerogeneradores de baja capacidad

2.1.7 TORRE

Los aerogeneradores por su naturaleza, deben estar ubicados en zonas de vientos constantes y preferentemente cercanos a sus velocidades de diseño (característico de cada aerogenerador). La torre tiene la función de ubicar al aerogenerador en estas zonas donde exista el recurso eólico, habitualmente extendiéndose a alturas desde los 10 metros, variando por las necesidades del aerogenerador y su tamaño, que pueden llegar hasta los 50 metros de altura.

Los tipos de torres que existen, pueden ser clasificadas según su construcción en tipo cónicas o de celosía. Con hilos de guarda o zapatas de acuerdo a su tamaño y esfuerzos a los que será sometida. Al igual que los materiales de los que pueden ser contruidos, desde estructuras metálicas hasta fabricadas en concreto. La Figura 9 muestra (de izquierda a derecha) una torre con hilos de guarda montada en una torre tubular, seguida por una torre de celosía con zapata y finalmente una montada en una torre cónica. (Conrado Moreno 2007)

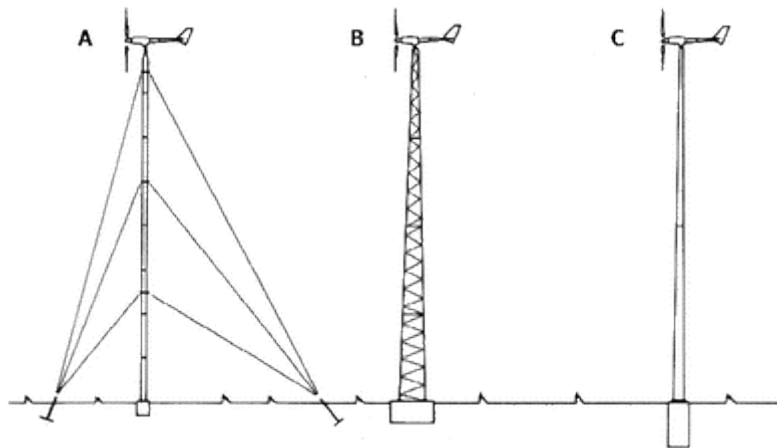


Figura 9 Diferentes tipos de torres para ABC.

- a) Tubular con hilos de guarda, b) Celosia con zapata, c) Conica de metal con zapata

3 DISEÑO DEL AEROGENERADOR

Para el diseño adecuado de un aerogenerador y su evaluación durante el arranque es necesario conocer los principios físicos que lo rigen y evaluar el recurso energético que se utilizará para hacer funcionar estos dispositivos, sin embargo en se enfocara únicamente en el diseño de los alabes.

Se puede considerar que la energía disponible en el viento es la energía cinética de grandes cantidades de aire que se mueven a través del planeta En un aerogenerador el primer elemento en capturar esta energía es el alabe, el cual se encarga de tomar esta energía cinética y transformarla en energía mecánica, para subsecuentemente realizar un trabajo o producir electricidad. La eficiencia depende específicamente de los alabes sobre los cuales nos centramos en este capítulo, puesto que involucran su diseño geométrico, para el cual se necesita conocer el comportamiento aerodinámico del mismo.

Otro componente importante es el diseño de la veleta, la importancia de esta consiste en otorgar la dirección adecuada para captar la energía cinética disponible y el frenado del aerogenerador para condiciones peligrosas que podrían dañar el aerogenerador.

Existen otros factores importantes, como son los materiales a usar, la región geográfica, o el recurso eólico existente en el terreno a emplazar la maquina en cuestión, sin embargo en esta tesis únicamente se enfocaran en la aerodinámica de los alabes y como estos otorgan el torque necesario para el arranque del aerogenerador, ya que estos influyen notablemente en esta etapa del aerogenerador, y sin ellas no sería posible entender el fenómeno que se analizaran en el capítulo 5.

El aerogenerador propuesto es de una potencia equivalente a 500 W, esta capacidad se propone para para cumplir con las especificaciones del generador eléctrico que se propone, considerando que va existir pérdidas desde la colección del recurso eólico, hasta la salida eléctrica.

A continuación se describe de una manera somera algunos conceptos aerodinámicos que influye en los alabes para el aprovechamiento de la energía eólica.

3.1 PRINCIPIOS DE AERODINÁMICA

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia las acciones que aparecen sobre los cuerpos solidos (pudiendo ser un alabe) cuando existe un movimiento relativo entres estos y el fluido que los baña, pudiendo ser este fluido un gas, tal como es el aire.

En la aerogeneración, se considera que el flujo de aire sobre un alabe produce dos fuerzas, una de sustentación que es perpendicular al flujo del aire, y una más llamada de arrastre la cual lleva la misma dirección del flujo de aire, como se muestra en la Figura 10. La existencia de la fuerza de sustentación depende del flujo laminar sobre el perfil aerodinámico (alabe), lo que significa que el aire fluye suavemente sobre ambos lados. Si existe un flujo turbulento en vez de un flujo laminar, habrá poca o ninguna fuerza de sustentación. Estos efectos se deben a que el aire que viaja sobre la parte superior del alabe, al ser mayor la distancia que debe recorrer, ocurre un aumento en la velocidad, lo cual produce un ligero descenso en la presión (explicado por el teorema de Bernoulli). Esta diferencia de presión entre el estrado (parte superior del alabe) y el intradós (parte inferior del alabe) es lo que ocasiona una fuerza de sustentación perpendicular al flujo del aire.

El aire que se mueve sobre la superficie del alabe, también produce una fuerza de arrastre en dirección del flujo de aire. Este es un término de pérdidas y se intenta minimizarlo al máximo, para aumentar el rendimiento de los aerogeneradores de tipo horizontal basados en sustentación.

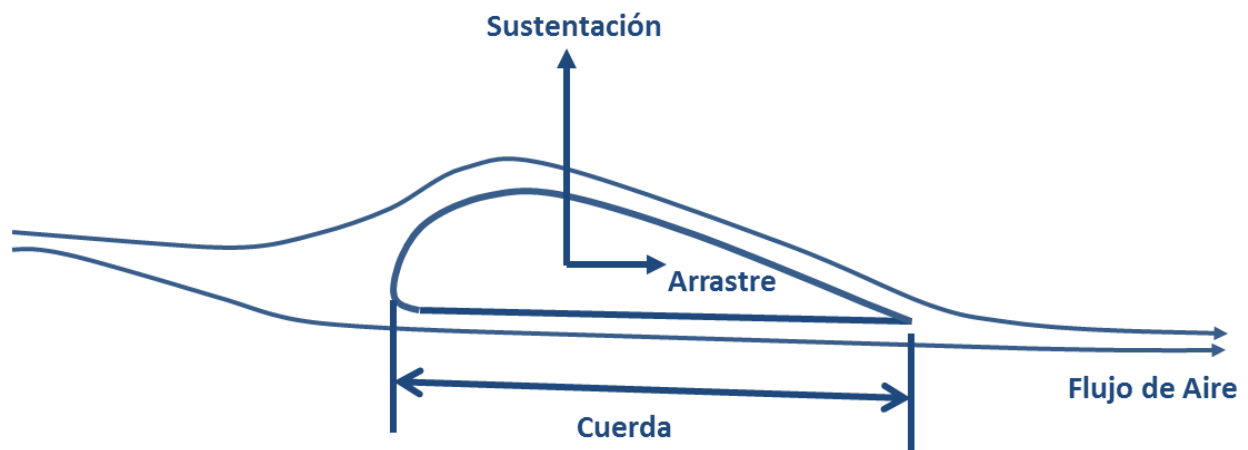


Figura 10 fuerza de arrastre (F_D) y sustentación(F_L) en un alabe estacionario

Ambos, tanto la fuerza de arrastre y sustentación, son proporcionales a la densidad del aire, el área de la superficie del alabe y la velocidad del viento al cuadrado.

En un aerogenerador, el perfil aerodinámico rara vez se encuentra totalmente de frente al viento (como en la Figura 10), por lo que se supone una analogía donde el viento (U) incide sobre un perfil con determinado ángulo. Lo que supone la generación de dos vientos sobre la superficie del perfil, uno que se conoce como viento relativo (U_R) y otro debido al movimiento del alabe llamado viento tangencial (U_T).

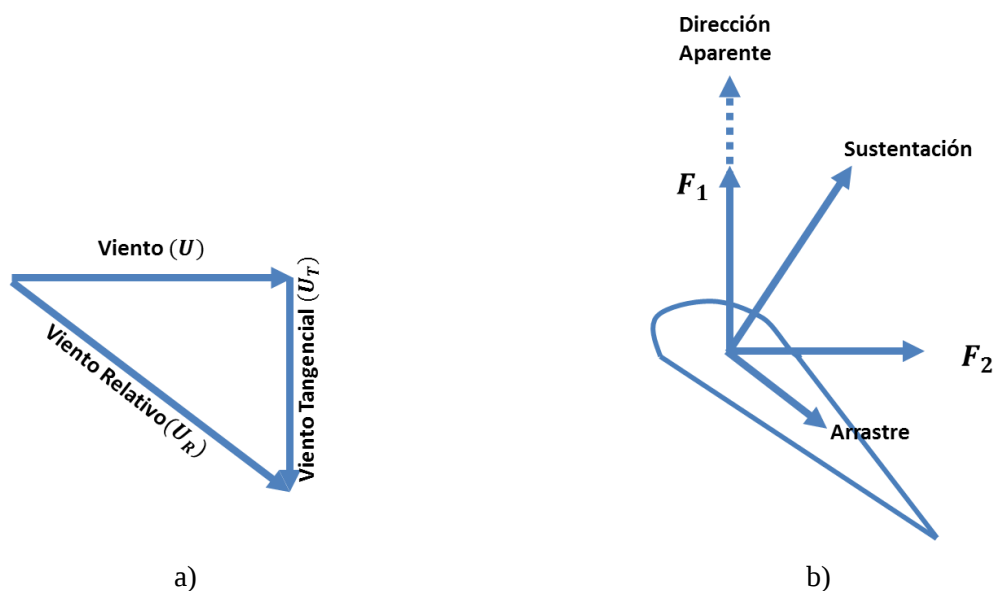


Figura 11 a) Viento incidente sobre el perfil y vientos generados, b) Fuerza de arrastre y sustentación, y componentes de fuerza par y empuje

Con lo anterior explicado (véase la Figura 11), el viento relativo (U_R) genera una fuerza de sustentación y arrastre sobre el perfil. Las fuerzas de arrastre y sustentación pueden ser divididas en dos componentes con respecto al plano de rotación (ver Figura 12), en una fuerza perpendicular (F_1) y otra paralela (F_2) a la dirección viento (U). La fuerza F_1 es la que está disponible para realizar trabajo útil. La fuerza F_2 debe ser utilizada en el diseño de esfuerzos para asegurar la integridad estructural, tanto de los alabes como de la torre. Un uso práctico que de la F_1 es la conexión de los alabes a un centro y permitir que giren alrededor de un eje horizontal, como se muestra en la Figura 12. La fuerza F_1 hace un par sumado por cada alabe conectado.

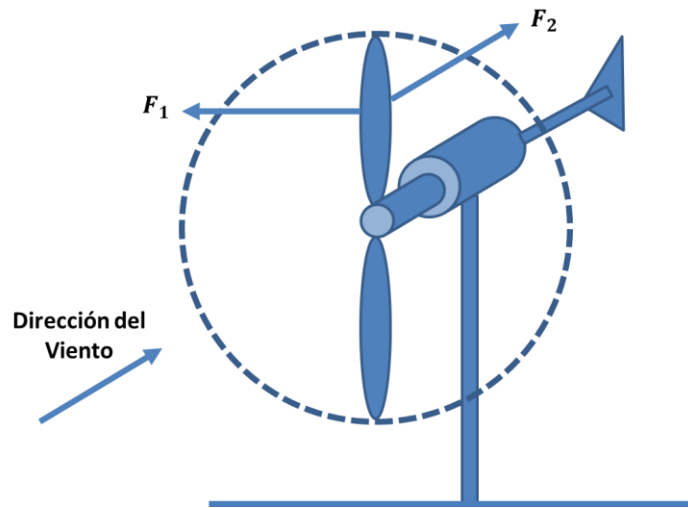


Figura 12 Fuerzas par y de empuje en de un aerogenerador.

La fuerza de sustentación, arrastre y el desempeño de un aerogenerador dependen de la construcción y orientación de los alabes. Existen dos ángulos importantes para entender la aerodinámica de un aerogenerador, uno es el ángulo de calaje (β), el cual un ángulo que se forma entre la línea de cuerda (ver Figura 13) y el plano de rotación. La cuerda es la distancia que une los bordes frontales y posteriores de un perfil aerodinámico (alabe). El plano de rotación es el plano sobre el cual los alabes rotan. Un detalle más del ángulo de calaje, es que mantiene un ángulo estático localmente a lo largo del alabe, que sólo depende de la orientación del alabe cuando no se cuenta con un sistema de control para este.

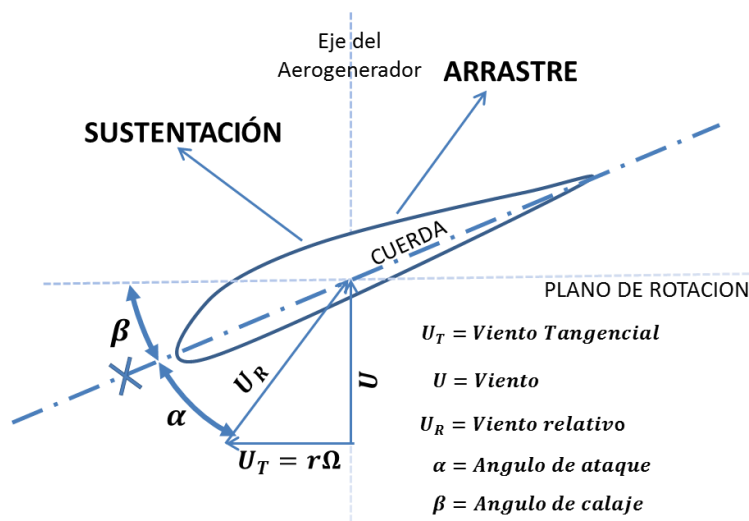


Figura 13 Diagrama esquemático de ángulo de calaje (β), Angulo de Ataque (α) y cuerda (L)

Otro parámetro importante del alabe es el ángulo de ataque (α), que se define como el ángulo que se forma entre la cuerda del alabe y el viento relativo (U_R) (ver Figura 13). Es un ángulo dinámico, el cual depende de dos factores, tanto de la velocidad relativa (U_R) del alabe y la velocidad del viento (U). La velocidad relativa del alabe depende directamente de la velocidad tangencial, la cual se calcula para una determinada longitud del alabe (r) y la velocidad angular (Ω), la cual puede variar con el tiempo por lo que la velocidad tangencial del viento está dada por el producto de $r \Omega$.

Un alabe, físicamente tiene una pequeña torsión ocasionado por la variación de su ángulo de ataque, el cual cambia a lo largo del mismo debido a las distintas velocidades angulares del alabe que se presentan dadas por $r \Omega$. La sustentación y arrastre tendrán valores óptimos para un solo ángulo de ataque, por lo que un alabe sin torsión es menos eficiente que con uno a una torsión adecuada para mantener un ángulo de ataque constante desde el centro hasta la punta. Incluso los antiguos molinos de viento holandeses fueron torcidos para aprovechar esto (Fernandez Diez 2002). En la actualidad se continua haciendo, al menos que esto sea incosteable, ya que un alabe recto es mucho más fácil y barato de construir, lo cual en ciertos casos puede justificar la construcción de los mismos.

Cuando el alabe se tuerce, el ángulo de calaje va a cambiar desde el centro hasta la punta. En esta situación, el ángulo de calaje se recomienda iniciar a tres cuartos de distancia del centro.

3.2 DISEÑO DE LOS ALABES

El prototipo del alabe está diseñado a una velocidad media estimada de 8 m/s con una densidad media del aire de 1.225 kg/m^3 , usando perfiles S822 y S823 recomendados para aerogeneradores de baja capacidad por los laboratorios nacionales de energías renovables (NREL por sus siglas en ingles) de Estados Unidos de América (Somers 2005), para captar 500 W de potencia de viento, una relación de velocidad periférica (λ , ver Ec. 6) de 8, la cual está ubicada en el extremo del alabe, el cual es usual para aerogeneradores de baja capacidad con una eficiencia del 46% (η_{ABC}), considerando la eficiencia de 59% dado por el límite de Betz, y otro 13% por pérdidas mecánicas y eléctricas.

Tabla 2 Valores para diseño del aerogenerador

Característica	Valor
Velocidad Media	8 m/s
ρ_{aire}	1.225 kg/m ³
Perfiles	S822 y S823
Potencia	500 W
λ	8
η_{ABC}	46%

Con los datos de la tabla 2 se inicia el cálculo para el diseño del alabe, generando los datos geométricos para su evaluación.

3.2.1 POTENCIA REQUERIDA DEL VIENTO

Para dar inicio al diseño del alabe se inicia con la especificación de la potencia del viento disponible (P_{viento}) que debe absorber el rotor, considerando las pérdidas en el ABC (η_{ABC}) y la potencia deseada (P_{util}) la cual es 500 W:

$$P_{viento} = \frac{P_{util}}{\eta_{ABC}} \quad \text{Ec. 1}$$

En la Figura 14 se muestra que la potencia del viento disponible, es aquella que ingresa al área de barrido del aerogenerador, definida por la Ec. 2, siendo la potencia útil, aquella que logra ser convertida en energía eléctrica para su posterior uso.

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \rho_{aire} A U^3 \quad \text{Ec. 2}$$

3.2.2 CALCULO DEL ÁREA DE BARRIDO

El área de barrido de un aerogenerador se considera como la zona donde el viento atraviesa los alabes del aerogenerador, en la Figura 14, se observa el área de barrido sombreado, es sobre esta zona donde los alabes absorben la energía cinética del viento.

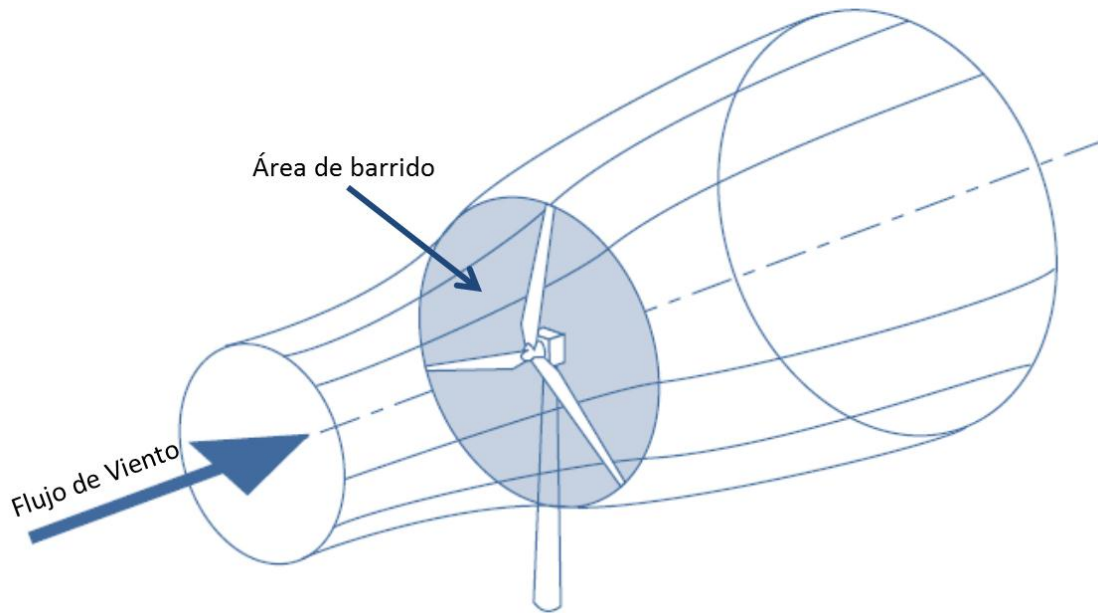


Figura 14 Área de barrido y eficiencias de un aerogenerador

Para el cálculo del área de barrido (A) se utiliza la Ec. 3, la cual está en función del factor por velocidad (F_v), es cual depende de la velocidad de viento, como lo indicada en la Tabla 3. De la misma manera intervienen la corrección por densidad del aire, la cual se basa en los factores de corrección por altura (C_A) y corrección por temperatura (C_T), los valores se observan en la Tabla 4 (Fernandez Diez 2002).

$$A = \frac{93 P_{util}}{\eta_{ABC} F_v C_A C_T} \quad \text{Ec. 3}$$

Tabla 3 Coeficientes de corrección por velocidad

U (m/s)	2.68	3.13	3.58	4.02	4.47	4.92	5.36	5.81	6.26	6.71	7.15	7.60
F_v	1.07	1.78	2.62	3.74	5.13	6.82	8.86	11.3	14.1	17.3	21	25.2
U (m/s)	8.05	8.49	8.94	9.39	9.83	10.28	10.73	11.18	11.62	12.07	12.52	12.96
F_v	29.9	35.2	41	47.5	54.6	62.4	70.9	80.1	90.1	101	113	125

Tabla 4 Factores de Corrección de la densidad del aire

Altitud (m)	C_A	Temperatura (°C)	C_T
0	1	-18	1.13
750	0.898	-6	1.083
1500	0.819	+4	1.04
2250	0.744	+27	1
3000	0.676	+38	0.963
∞			0.929

A partir del área obtenida se puede también obtener el diámetro del rotor (Ec. 4) y el radio del alabe (Ec. 5).

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{Ec. 4}$$

$$\therefore D = \sqrt{\frac{4 A}{\pi}} \quad \text{Ec. 5}$$

3.2.3 CALCULO DE REVOLUCIONES POR MINUTO

Al momento de calcular las revoluciones por minuto (rpm) del aerogenerador se debe tomar en cuenta la λ , la cual está definida en la Ec. 6, donde las tres variables que intervienen son características de los alabes; R es la longitud total del alabe, Ω es la velocidad angular del y U es la velocidad del viento que incide sobre este. Para el caso del aerogenerador a proponerse, se selecciona una $\lambda = 8$. Una consideración adicional es la cantidad de alabes que serán usados para cubrir el área de barrido, en la actualidad la recomendación es de 3 alabes para un aerogenerador de tipo horizontal, ya que con esto se evitan problemas de ruido, vibraciones mecánicas y balanceo en el rotor del mismo. Para el cálculo de las revoluciones por minuto se utiliza la Ec. 7.

$$\lambda = \frac{R \Omega}{U} \quad \text{Ec. 6}$$

$$rpm = \frac{30 U \lambda}{\pi R} \quad \text{Ec. 7}$$

3.2.4 SELECCIÓN DE PERFIL DEL ALABE

Al momento de seleccionar un perfil para el alabe del aerogenerador se deben cuidar aspectos como si será de eje vertical u horizontal, si el mismo aerogenerador será basado en el coeficiente de arrastre para un gran torque o sustentación para mayores rpm, ya que a partir de estas respuestas se puede definir el ángulo de ataque ideal para el alabe. Para este caso en particular se busca tener un coeficiente de sustentación alto (C_L) y un bajo coeficiente de arrastre (C_A). Una recomendación más, es que la relación C_L/C_D debe ser lo más alta posible dentro de un rango de valores de 20 a 100 (Ec. 8). Los coeficientes anteriores son buscados y analizados en graficas polares, como se muestra en la Figura 15 para los perfiles S822 y S823. Una gráfica polar otorga la información necesaria para conocer los coeficientes de sustentación y ataque de un perfil alar, con lo que se puede seleccionar el ángulo de ataque idóneo. En la Figura 15, se puede observar que los ángulos de ataque recomendable para su comportamiento según sea el ángulo de ataque es de aproximadamente de 10 grados, sin embargo, por la relación del C_L y C_D que se recomienda, no se selecciona ese ángulo.

$$\frac{C_L}{C_D} \cong 20:100 \quad \text{Ec. 8}$$

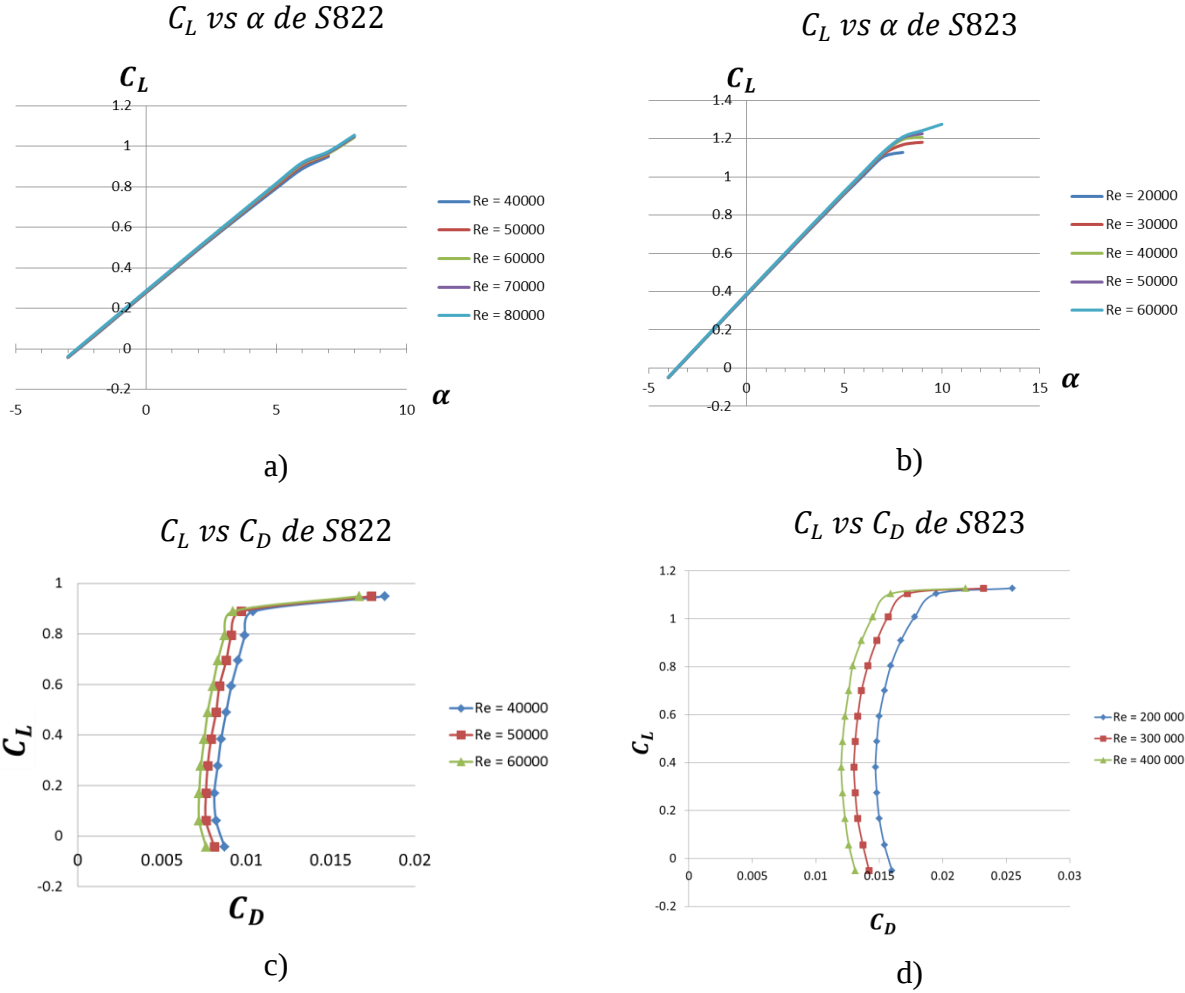


Figura 15 Graficas polares de a) S822 b) S823 (α Vs C_L) y d) S822 e) S823

3.3 CALCULO DE CUERDA PROMEDIO

Para el cálculo de la cuerda promedio, la cual es solamente una guía para los cálculos como la solidez y el área total de los alabes, se necesita obtener un parámetro de forma (PF), que está en función de λ_r , el cual se obtiene a partir de la Figura 16. El valor de la cuerda promedio (L_{prm}) se obtiene con la Ec. 9.

$$L_{prm} = \frac{R \lambda_r}{C_L Z} \quad \text{Ec. 9}$$

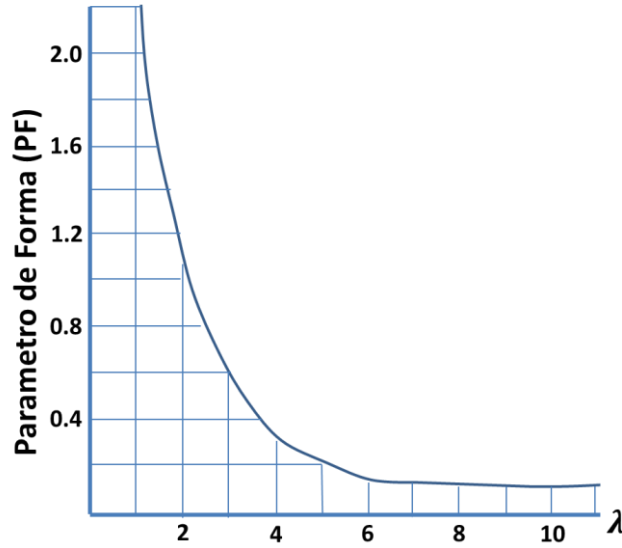


Figura 16 Parámetro de forma (PF) en función de λ

Calculo de solidez y área de alabes

La solidez (γ) es la relación que existe entre el área de barrido (A) y el área total de los alabes propuestos (A_{alb}) a diseñar, este es un parámetro de identificación del aerogenerador. La solidez es calculada con la Ec. 10, donde Z es el número de alabes y S es la proyección de la superficie frontal al viento (U) de cada alabe.

$$\gamma = \frac{A_{alb}}{A} = \frac{Z S}{\pi R^2} = \frac{Z R L_{prm}}{\pi R^2} = \frac{Z L_{prm}}{\pi R} \quad \text{Ec. 10}$$

El cálculo del área total de los alabes (A_{alb}) se deduce con la Ec. 11, donde en la Ec. 12 se obtiene un área por alabe propuesto ($A_{c/u}$).

$$A_{alb} = \gamma A \quad \text{Ec. 11}$$

$$A_{c/u} = \frac{A_{alb}}{Z} \quad \text{Ec. 12}$$

3.3.1 PARAMETRIZACIÓN DEL ALABE

Las corrientes de aire creado por el alabe (U_T , *viento tangencial*): Viene dada por la Ec. 13. El resultado de esta, es usada para calcular viento relativo (U_R) el alabe (ver Ec. 14), ya que este última, es la que se usa para conocer los coeficientes de sustentación y arrastre.

$$U_T = R \frac{\pi \text{ rpm}}{30} \quad \text{Ec. 13}$$

El viento relativo (U_R) sobre el alabe es aquella que se genera sobre la superficie del alabe debido a la velocidad tangencial (U_T) y la velocidad del viento (U). Apoyados en la Figura 13, se observa un triángulo de velocidades, con lo que se puede deducir la Ec. 14, esta debe ser calculada a lo largo del alabe propuesto.

$$U_R = \sqrt{U_T^2 + U^2} \quad \text{Ec. 14}$$

Relación de velocidad local (λ_r): La λ_r es muy similar a λ , la diferencia es que esta se calcula localmente a lo largo del alabe. Este se utiliza para determinar ángulo aparente del viento (θ). Donde r es el distancia local del alabe en una de sus secciones, esto se observa en la Ec. 15.

$$\lambda_r = \frac{\lambda r}{R} \quad \text{Ec. 15}$$

Angulo aparente del viento (θ): El ángulo aparente del viento se forma entre el plano de rotación del alabe con el viento relativo (U_R). Este nos sirve para determinar el ángulo de calaje (β) para el cálculo de la curvatura (también conocido como torsión) que se le dará al alabe. Este viene dado por la Ec. 16, que se muestra a continuación.

$$\theta = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_r} \right) \quad \text{Ec. 16}$$

Angulo de calaje (β): El ángulo de calaje se calcula a partir de la diferencia ángulo de ataque (α) y el ángulo aparente del viento. Este viene dado por la Ec. 17.

$$\beta = \theta - \alpha \quad \text{Ec. 17}$$

Calculo de la Cuerda Real (L): La cuerda es una medida que da las dimensiones de diseño del alabe, basados en los perfiles seleccionados para el cual se realizan las operaciones. A partir de

esta se podrá definir la forma final del alabe bajo las condiciones iniciales dadas (Fernandez Diez 2002).

$$L = \frac{2\pi R^8}{9 Z C_L \lambda^2 \left(\frac{r}{R}\right)} \quad \text{Ec. 18}$$

Finalmente con estos datos calculados se puede realizar el diseño de un alabe, así como utilizar los datos obtenidos para analizar el arranque del aerogenerador. El desarrollo y conocimiento de la aerodinámica del alabe se vuelve necesario, a falta de diseños propuestos en la literatura a detalle.

4 PRINCIPIOS DE BALEROS MAGNÉTICOS ACTIVOS

En capítulo, se muestra el funcionamiento de los baleros magnéticos, los cuales ofrecen una nueva forma de resolver los problemas clásicos de la dinámica del rotor mediante la levitación de una flecha, evitando el desgaste y lubricación, así como el control de su comportamiento dinámico. En un sentido general estos se conocen como balero magnético activo (BMA).

La historia de los BMA se basa en la suspensión electromagnética, la cual utiliza este principio para la levitación de vehículos de transporte como trenes de alta velocidad que tuvo sus inicio en 1937. Existen varias maneras de diseñar las suspensiones magnéticas para un soporte sin contacto, los BMA son sólo uno de ellos. Una clasificación de los diferentes baleros magnéticos es mostrada en este capítulo. Así como sus principales características, ventajas e inconvenientes.

4.1 INTRODUCCIÓN

Un balero magnético activo esta principalmente formado por una combinación de electromagnetos, amplificadores de potencia, sensores de distancia y un sistema de control eléctrico, como se observa en la Figura 17. El sistema de control utiliza una señal de posición que entregan los sensores de distancia para determinar que señal será enviada al amplificador. Los amplificadores, a su vez, entregan una corriente eléctrica a través de la bobina de los electromagnetos, lo cual produce fuerzas magnéticas que ayudan a la suspensión del rotor.

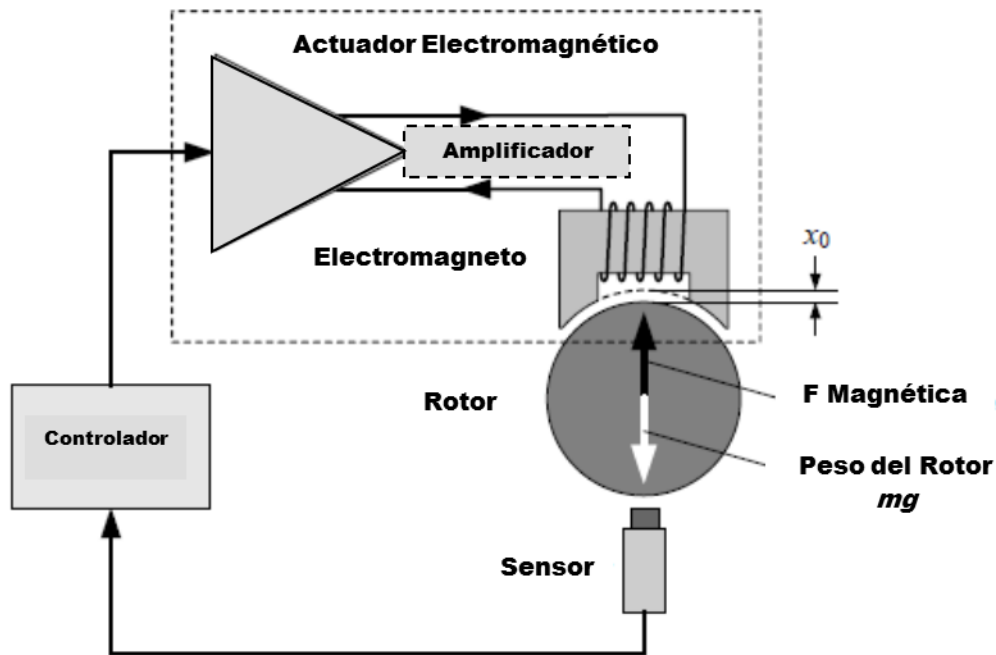


Figura 17 Esquema de balero magnético activo

La levitación es posible debido a que el sistema se divide en un actuador y un control con retroalimentación, el cual es responsable de la estabilidad del rotor, así como la rigidez y el amortiguamiento, funcionando como una suspensión. La rigidez y la amortiguación pueden variar ampliamente dentro de los límites físicos, y se puede ajustar a los requerimientos técnicos necesarios, los cuales pueden ser ajustados durante la operación.

La Figura 18 muestra un modelo de demostración para un rotor de eje vertical, con un grado de libertad de levitación. En este caso el desplazamiento del globo se mide de manera óptica con un fototransistor, en la Figura 19 se muestra un esquema de la levitación visto en un corte transversal.

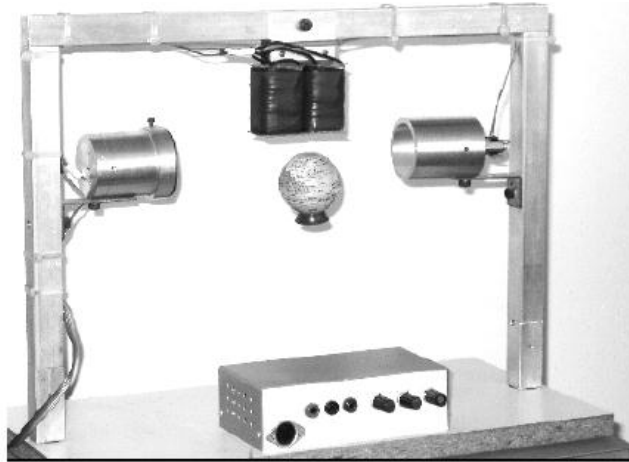


Figura 18 Modelo de prueba de levitación magnética.

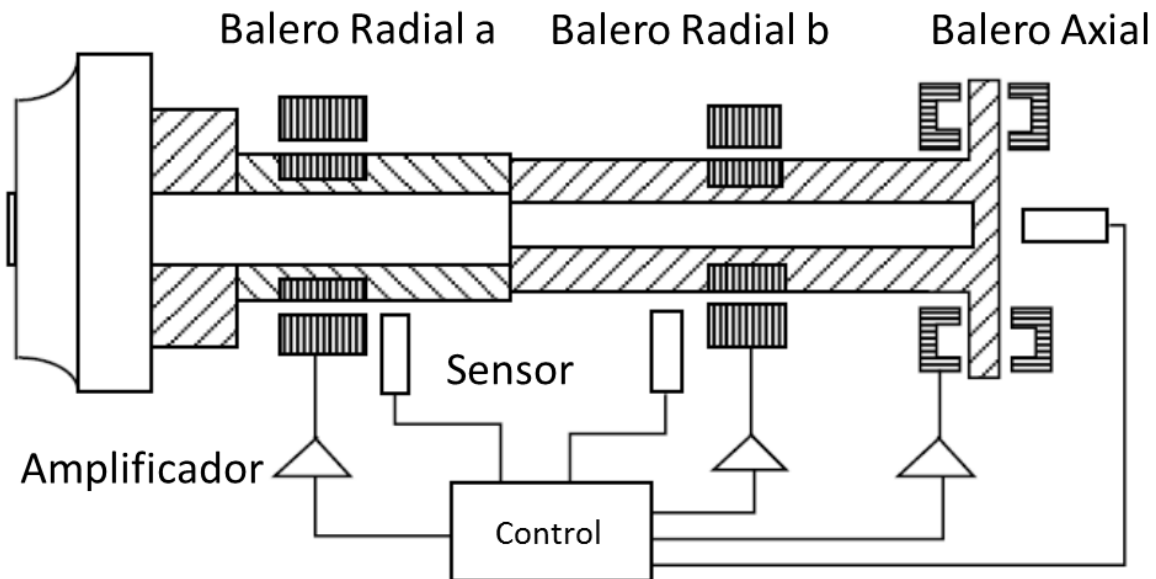


Figura 19 Esquema de la suspensión de un rotor en corte transversal

En la Figura 20 se muestra un modelo de demostración (Traxler 1985). El rotor tiene una longitud aproximada de 0.8 m y un peso de 12 kg. La medición de desplazamiento se realiza a través óptica CCD-array, la cual genera directamente las señales digitales para el controlador del microprocesador. La separación del rotor es de 10 mm, lo cual resulta ser bastante grande para estos equipos.

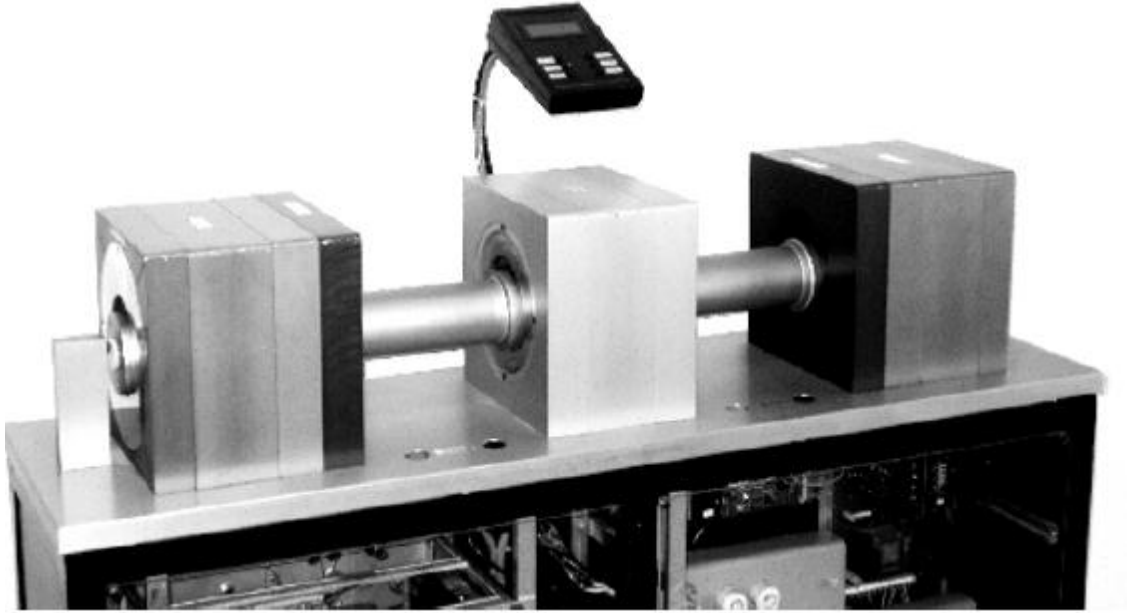


Figura 20 Rotor en una suspensión magnética de la exhibición de Zurich (Traxler 1985)

Los rotores electromagnéticos pertenecen a un grupo de productos que básicamente son similares y son investigados con métodos idénticos. Todos se caracterizan por ser parte de la mecatrónica, en la siguiente sección se mencionan las propiedades comunes de estos dispositivos y su clasificación.

4.2 CLASIFICACIÓN DE BALEROS MAGNÉTICOS

Además de los baleros magnéticos activos, existen otras tecnologías para generar campos de fuerza para apoyar o suspender a un cuerpo sin ningún tipo de contacto físico. Incluso cuando un cuerpo no puede flotar en una forma estable y libre, la Figura 21 presenta una clasificación sobre una posible clasificación de las fuerzas magnéticas y principios magnéticos (Bleuler 1992). Esta clasificación cubre sistemáticamente los tipos conocidos de baleros magnéticos. Se pueden distinguir dos grandes grupos por la forma en que las fuerzas magnéticas pueden ser calculados y representados, distinguiéndose la fuerza a partir de la reluctancia y la fuerza de Lorentz. Los principios físicos que causan el efecto magnético de ambos son las cargas eléctricas en movimiento.

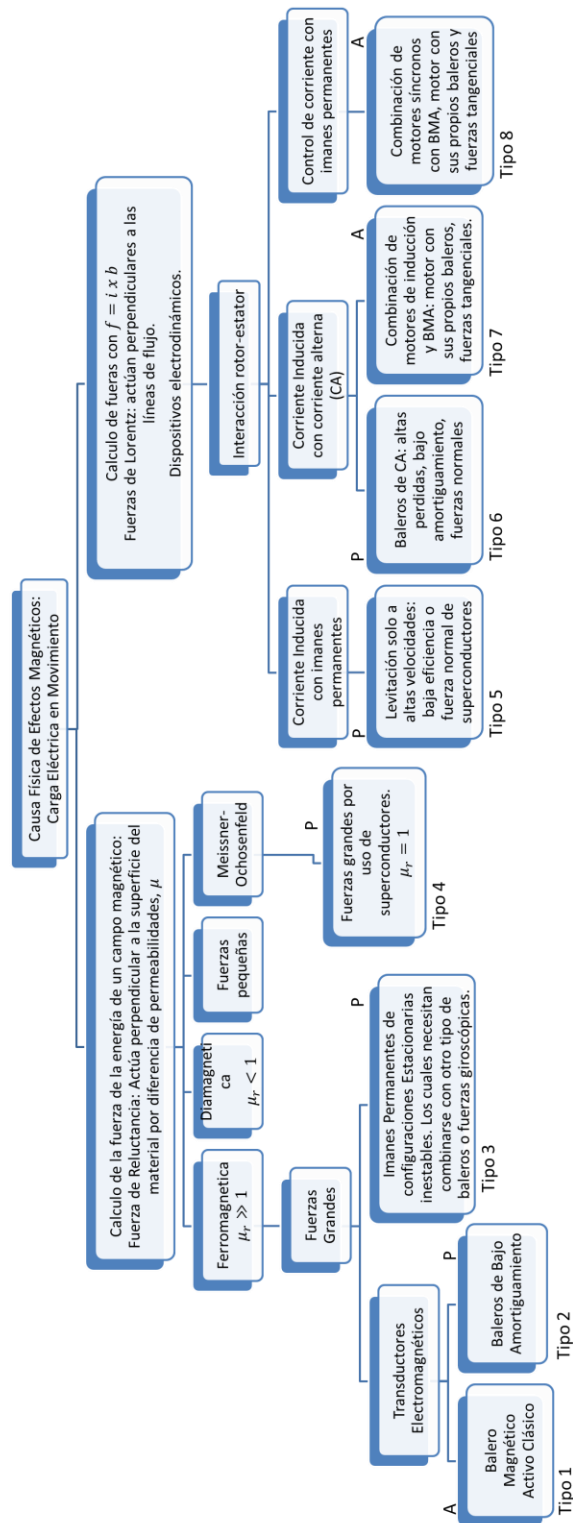


Figura 21 Clasificación de baleros magnéticos y levitación. A: Estables con control activo, P: Pasivos estables sin control. Baleros con fuerzas de Lorentz: normales o tangenciales, se refiere a la dirección de la fuerza con respecto al vacío.

En el primer caso, la fuerza de reluctancia, siempre y cuando no se trate de una escala atómica o subatómica, se ha encontrado en la ingeniería práctica una forma sencilla de tratar con la mecánica cuántica, donde se describe con la *constante de magnetización* $\mu = \mu_r \mu_0$, donde la *permeabilidad relativa* μ_r depende del material. Estos materiales están sujetos a una fuerza llamada fuerza de reluctancia. La cual es opuesta la fuerza de Lorentz que se obtiene en el segundo tipo de sistema. La fuerza de reluctancia se deriva de la energía almacenada en el campo magnético, la cual puede ser convertida en energía mecánica. Por lo tanto la fuerza de reluctancia $\underline{f}$ se obtiene del *principio de trabajo*

$$\underline{f} = \frac{\partial W}{\partial \underline{s}} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde W es el campo de energía y $\partial \underline{s}$ es el desplazamiento del cuerpo flotante. Una fuerza magnética de este tipo siempre surge en la superficie de medios con diferente permeabilidad relativa μ_r , por ejemplo el hierro y el aire. La dirección de esta fuerza es perpendicular a la superficie de los distintos materiales. Entre más grande sea esta diferencia en la permeabilidad, más fuerte será la fuerza. Para materiales ferromagnéticos con $\mu_r \gg 1$ la fuerza pueden ser demasiado grandes. En la literatura de máquinas eléctricas, la resistencia magnética de un arreglo se llama reluctancia. La cual es inversamente proporcional la permeabilidad μ_r . La fuerza actúa de tal manera que tiende a disminuir la reluctancia de un arreglo mecánico. Los equipos eléctricos que hacen uso de esta propiedad se conocen como motores de reluctancia.

Para tener un sistema que funcione es que las fuerzas magnéticas que actúan sobre un cuerpo lo mantengan en una levitación de estado estable. Usualmente, en aplicaciones industriales, es necesario tener medios activos, como un lazo de control, para adaptar continuamente el campo magnético durante el movimiento del cuerpo. Este requerimiento conduce a la categoría de baleros magnéticos activos (BAM). En la Figura 21 este tipo son designados con la letra A. Sin un control, serían un sistema meramente pasivo. Los cuales en la misma figura están designados con la letra P, en general, la posibilidad de estabilizar una suspensión en todos los grados de libertad al mismo tiempo, es limitada y requiere de un enfoque muy específico.

Los baleros de fuerza de reluctancia activos entran en un grupo de los baleros magnéticos de tipo 1. Incluso dentro de este grupo se pueden encontrar otros tipos de baleros, por ejemplo la forma

en cómo se realiza el control activo. Existen maneras en las que el campo magnético, el flujo magnético, la distancia entre el rotor y su estator, o en el caso de baleros de auto-detección, la inductancia es la que se controla.

El *circuito LCR magnético* (tipo 2) logra una rigidez característica estable en un circuito LC ligeramente excitado fuera de resonancia. Este circuito está formado con una inductancia de la bobina electromagnética y un capacitor. El desplazamiento mecánico del rotor cambia la inductancia del electromagneto. Cuando sucede esto, el circuito LC opera cerca de una frecuencia resonante, lo cual ocasiona que el rotor se mueva lejos del electromagneto. Esto se traduce en un aumento de la corriente en CA, por lo tanto regresa al rotor a su posición normal. Las fuerzas y la rigidez no son muy grandes pero son lo suficiente para ciertas aplicaciones de instrumentación. Debido a que este tipo es estable, sin un lazo de control, se le llama pasivo. La fuente de alimentación consiste en una fuente de CA que se encuentre operando a una frecuencia constante. Sin embargo el principal inconveniente es que no hay amortiguamiento, es decir, sin medidas adicionales como un amortiguador mecánico o un sistema activo, por lo que tienden a ser inestables con el paso del tiempo. Se han usado giroscopios (Parente 1969) para solucionar el problema anterior, sin embargo con el avance de la tecnología en controladores se puede realizar a costos relativamente bajos. Por lo que en cierto sentido, están fuera de uso, sin embargo siguen siendo investigados (Higuchi 1991).

Los *imanes permanentes* ($\mu_r \gg 1$, tipo 3) en una configuración fija, no son capaces de estabilizar la levitación de un cuerpo. Para que esto suceda, como se mencionó anteriormente es necesario agregar fuerzas giroscópicas como en el caso del levitron, o un material diamagnético ($\mu_r < 1$) donde se obtiene una ligera estabilidad con pequeñas fuerzas involucradas, o en superconductores ($\mu_r = 0$). Sin embargo, puede ser muy útil el aplicar imanes permanentes para soportar un cuerpo o reducir la carga sobre un cuerpo con un sistema de baleros normales en una dirección. Los imanes permanentes han sido ampliamente utilizados por ejemplo en medidores de consumo eléctrico convencionales. Algunas otras aplicaciones son en combinación con BMA, por ejemplo en bombas turbo moleculares para un alto vacío. Lo que lleva a sistemas híbridos, los cuales tienen la desventaja de tener relativamente un amortiguamiento bajo. En cualquier caso, este tipo de sistemas híbridos están limitados a ciertos casos especiales donde su aplicación resulta muy atractiva (Boden 1988) (Fremerey 1988). Incluso el uso de un control de

desplazamiento mecánico para ajustar la posición del imán permanente ha sido sugerido en vehículos del tipo MAGLEV (Beams, Young and Moore 1946).

Los dispositivos del tipo 4 se basan en una propiedad muy especial de los materiales, donde la $\mu_r = 0$. Solo esta propiedad de los materiales conocidos como *materiales superconductores* lleva a fuerzas fuertes y que se encuentran en un uso técnico bastante interesante. Aunque todavía continúan en desarrollo, las aplicaciones industriales no están muy lejanas. La principal característica de la superconductividad es que a temperaturas muy bajas, la resistencia eléctrica desaparece. Una corriente en una bobina superconductora puede seguir fluyendo aun cuando no hay ya una tensión de conducción. Todo el campo magnético se ve expulsado del superconductor por el efecto llamado Meissner-Ochsenfeld, permitiendo así una levitación estable con los imanes permanentes. Los recientes *materiales superconductores de alta temperatura (SAT, mayores de 77 K)* presentan este comportamiento a la temperatura del nitrógeno líquido, y algunos materiales más exóticos lo presentan a temperaturas más altas. Actualmente están incrementando las aplicaciones de todos estos experimentos. Moon (Moon and Chang 1990) describe experimentos usando altas temperaturas de super-conductores para soportar un rotor que tiene 120 000 rpm, y de hecho en versiones de laboratorio se han construido ya varias baterías inerciales para el almacenamiento de energía en distintos países (Koshizuka and Ishikawa 2003) (Werfel and Floegel-Deolor 2005). También se realiza investigación en sobre motores y generadores SAT. Recientemente, un banco de pruebas para un balero magnético pasivo fue diseñado para un generador síncrono tipo SAT de 4 MVA (capacidad de 500 kg, con una velocidad máxima de 4500 rpm) el cual fue realizado por SIEMENS y NEXAN Superconductor (Kummeth, Nick and Neum 2006). En la gama de temperaturas por debajo de 60 K, la capacidad de carga se mantiene casi constante. Los baleros inicialmente son enfriados a 28 K, donde pueden ser operados cerca de 2 horas sin un sistema de enfriamiento adicional. Es de esperar que en el futuro, el sistema de amortiguamiento del rotor se pueda lograr colocando otro BMA fuera del área enfriada. Cualquier otro sistema de baleros auxiliar puede ser simplemente usado para propósitos de mantenimiento.

La fuerza de Lorentz (f) (Ec. 20) es el término que caracteriza el segundo grupo importante de baleros magnéticos. La fuerza f que actúa sobre una carga eléctrica Q resulta de la ley básica:

$$\underline{f} = Q(\underline{E} + \underline{v} \times \underline{B}) \quad \text{Ec. 20}$$

Donde $\underline{E}$ es el campo eléctrico, y Q moviéndose a una velocidad $\underline{v}$ en el flujo magnético a una densidad dada $\underline{B}$. La densidad de energía del campo eléctrico $\underline{E}$ viable en arreglos macroscópicos suele tener cerca de 100 veces menos que la densidad de energía disponible en un campo magnético. Por lo tanto, el término electrostático (Ec. 21) no se considera para este caso, aunque a microescala puede llegar a ser importante. En la Ec. 21 el producto de la carga y la velocidad ($Q \underline{v}$) se sustituye por la corriente $\underline{i}$, que lleva a un producto cruz.

$$\underline{f} = \underline{i} \times \underline{B} \quad \text{Ec. 21}$$

En este caso, la fuerza es ortogonal a las líneas de flujo, independientemente del vacío que exista y dependiente linealmente de la corriente, asumiendo que el flujo no solo depende de esta corriente. Existen cuatro tipos básicos de fuerzas magnéticas de levitación para Lorentz. Se agrupan de acuerdo a la fuente macroscópica de corriente $\underline{i}$ que tienen. Esta corriente puede ser inducida o controlada de manera activa. Dentro de la inducción existen dos mecanismos posibles: donde en uno hay un campo magnético permanente y un conductor que se mueve, o se produce la interacción entre un conductor y un electroimán funcionando con corriente alterna. Por otro lado, la corriente puede ser controlada de manera activa e interactuar con el campo magnético. Donde existen nuevamente dos posibilidades: el campo magnético es producido por un imán permanente, o existe una interacción entre la corriente controlada y la corriente inducida. Estos dos últimos son los tipos 5 al 8.

Los baleros tipo 6 dependen de la interacción de la corriente alterna y la corriente inducida, lo que lleva a una levitación pasiva como en el caso del tipo 5. Sin embargo, el movimiento relativo se sustituye por un flujo alterno. Donde una vez más, con la conducción normal de la fuerza de levitación es producido por corrientes de Eddy que son relativamente débiles, considerando las pérdidas. Al mismo tiempo, los baleros se conocen como baleros AC, una desventaja de estos es que tienen una mala amortiguación (Nicolajsen 1988).

La interacción entre una corriente alterna y una corriente inducida puede lograrse a través de un sistema activo, lo que lleva los tipos 7 y 8 de baleros magnéticos que usan la fuerza de Lorentz. Los tipo 7 son de alguna manera similares a un motor de inducción. Como sea, en esta versión,

las fuerzas actúan de forma circunferencial para generar un par motor, mientras que en los baleros, las fuerzas actúan en dirección radial para apoyar el rotor. En este caso el estator, por ejemplo, tiene dos diferentes tipos de bobinas. La primera corresponde a las bobinas de una unidad asíncrona, produciendo un par en el rotor, La corriente en la segunda bobina produce una componente con una dirección radial, la cual es controlable con la corriente, usando sensores de distancia para retroalimentación y sincronismo con el campo de flujo rotatorio, la levitación del rotor puede ser estabilizada. Por lo tanto, una combinación de la máquina y la suspensión magnética puede ser alcanzada (Chiba 1991), en la literatura este tipo de sistemas se conocen como *motores auto soportados*. Aun considerando lo complejo del control, este tipo permite algunas soluciones de diseño interesante, por ejemplo para amortiguadores de resonancia magnética o para pequeños arreglos.

Los baleros magnéticos de tipo 8, son muy similares a los anteriores con excepción de que el rotor con corriente inducida se reemplaza con un rotor de tipo imán. Este tipo de baleros magnéticos han sido desarrollados por Bichsel (Bichsel 1991) usando una combinación de motor síncrono/activo.

El principio electrodinámico, donde una fuerza actúa sobre un conductor en un campo magnético, es igualmente valido para arreglos que no tienen hierro. Aunque las fuerzas obtenidas en estos casos sean menores, el principio es de uso frecuente en los casos en que los efectos son perturbadores en materiales ferromagneticos, donde existen remanencias e histéresis, los cuales tienen que ser evitados. El campo magnético constante es producido por imanes permanentes y la corriente que atraviesa una bobina, la cual es colocada en un espacio vacío, siendo controlada por las fuerzas de Lorentz de una manera adecuada hasta lograr la levitación. Estos principios son los usados para los baleros magnéticos para la suspensión de “volantes de inercia” en los satélites (Sindlinger 1976), o para suspensiones libres de vibraciones de una plataforma micro-g para fines de investigación en una nave espacial.

4.3 SELECCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE UN BALERO MAGNÉTICO ACTIVO

Analizados los tipos de baleros magnéticos existentes y desarrollados, los BMA resultan particularmente útiles desde el punto de vista técnico y de desarrollo los baleros tipo 1 ya que

estos son usados en varias aplicaciones actualmente y aún tienen posibilidades de desarrollo para otras más, resumiendo las características con las que cuentan son:

- Son libres de contacto, lo cual evita las lubricaciones y la contaminación que estos conllevan con su desgaste, pueden ser usados en habitaciones esterilizadas donde la limpieza juega un papel importante, o para el transporte muy agresivos, o en lugares con temperaturas muy altas.
- El vacío entre el rotor y los baleros normalmente es de 10 mm, pero para aplicaciones específicas estos pueden incrementarse hasta los 20 mm. En ese caso, por supuesto los baleros son más grandes.
- Permite que el rotor gire a altas velocidades, estas velocidades en realidad son solo limitadas por la fuerza que soporta el material del rotor, ofrece la posibilidad de diseñar nuevas máquinas con la concentración de una potencia superior. Actualmente se alcanzan cerca de los 350 m/s, usando por ejemplo metales amorfos los cuales pueden soportar altas tensiones y al mismo tiempo tienen propiedades magnéticas buenas. Resulta con ventajas de diseño como la ausencia de ellos de lubricación y de la posibilidad de tener un diámetro de rotor mayor. Lo cual hace el rotor más rígido y menos sensible a vibraciones.
- Las pérdidas por estos sistemas, aun operando a altas velocidades son de 5 a 20 veces menores que un sistema convencional de baleros, lo que resulta en bajos costos de operación.
- La capacidad de carga específica de los baleros depende del tipo de material ferromagnéticos y el diseño del imán. El cual puede ser desde 20 N/cm^2 hasta unos 40 N/cm^2 . El área de referencia es la sección transversal del balero. Así la carga máxima que soporta va en relación con su tamaño.
- La dinámica de levitación libre de contacto depende principalmente en el control implementado. Si el control se realiza con un microprocesador, hace un diseño bastante versátil. Por lo tanto, es posible adaptar la rigidez y el amortiguamiento, dentro de los límites físicos, para que el balero haga su función tal como se le solicita. Los términos rigidez y amortiguamiento son incluidos en la estática convencional, conocidos también como la constante de resorte y de amortiguamiento, así como también la parte

dependiente de la frecuencia y la rigidez dinámica. Esto hace posible que se usen los baleros para eliminar vibraciones al pasar velocidades críticas o estabilizar el rotor cuando se encuentra excitado por disturbios no planeados.

- Los baleros de retención son baleros típicos adicionales, que en funcionamiento normal no están en contacto con el rotor. En caso de una sobrecarga o un mal funcionamiento del BMA, estos entran en operación por un periodo corto de tiempo. Mantienen el rotor girando sin perder el control hasta que se detiene o el BMA adquiere el control de nuevo. El diseño de estos depende en gran medida de la aplicación que se tenga, a pesar de tenerse ya una buena gama de soluciones para estos, aun se siguen desarrollando.
- La compensación de desbalance y la rotación libre de fuerzas son las características del control donde las vibraciones debido a un desbalance residual son medidas e identificadas por los BMA. Esta señal se utiliza para generar o contrarrestar las fuerzas y llevar al rotor a un estado normal de giro.
- La precisión es el estado en el que puede ser controlado el rotor, un ejemplo de esto es la precisión de rotación en un eje dado, donde esta principalmente determinado por la calidad de la señal de medición en el lazo de control. Algunos sensores inductivos convencionales, ofrecen una precisión de 1/100 a 1/1000 mm.
- Los diagnósticos se realizan fácilmente, durante su operación normal el rotor es analizado constantemente, esta operación de análisis puede ser utilizada posteriormente para revisar sus condiciones de operación y desempeño.
- Los BMA tienen el potencial de ser un elemento clave para una maquina inteligente. Pueden hacer uso de su información con el fin de optimizar su funcionamiento. Contribuyendo así a un control general de los procesos, la seguridad y la confiabilidad.
- Los bajos costos de mantenimiento y mayor tiempo de vida han sido demostrados en sistemas BMA. En esencia esto se debe a la falta de desgaste mecánico. En la actualidad, esta es la principal razón para el creciente número de aplicaciones en turbomaquinas. Las propiedades de mantenimiento y confiabilidad se han mejorado aun mas mediante el concepto de maquina inteligente.
- La estructura de costos de una BMA es el de un producto típico de mecatrónica. Los costos para el desarrollo de un prototipo, principalmente los de control son los más altos.

Por otro lado, una producción en serie de esto reduce considerablemente los costos debido a la portabilidad de este control.

- El diseño de un BMA para una aplicación específica requiere de conocimientos en mecatrónica, es decir ingeniería mecánica y eléctrica, un buen manejo de información, además de los conocimientos sobre el área de aplicación.

4.4 GENERALIDADES DE DISEÑO DE UN BALERO MAGNÉTICO

El diseño de un balero magnético abarca distintas aéreas que se mencionaran a continuación, sin embargo existen temas que no son mencionados en este reporte, tales como enfriamiento, calibre de conductores, configuraciones estructurales, entre otros. Ya que aunque es necesario mencionarlos, son tema para otro semestre. En este capítulo se verán principalmente el tipo de control que se llevan en los baleros magnéticos y su estructura geométrica.

4.4.1 CAPACIDAD DE CARGA, FLUJO MAGNÉTICO

La capacidad de carga de un balero magnético es la fuerza que se puede obtener con una máxima fuerza magneto motriz permisible NI_{max} .

El obtener la fuerza magneto motriz de NI_{max} , por ejemplo, cuando la corriente es máxima para un determinado número de vueltas, depende del calibre del cable empleado. El largo de la bobina y la capacidad de disipar calor del mismo. La capacidad máxima de disipación de calor depende del tipo y cantidad de enfriamiento con el que se dispone.

Para poder optimizar la geometría de un balero magnético, se debe hacer una distribución del espacio disponible para que los espacios entre el balero magnético, el entrehierro y el cobre sean los óptimos para una capacidad de carga máxima. La optimización puede ser hecha con los comentarios que se harán mención más adelante.

4.4.2 GEOMETRÍA

En la Figura 22 se muestran los parámetros tipos de un balero magnético radial. Donde el espacio entre el balero y el rotor esta incrementado para hacerlo visible. El diagrama ilustra una geometría donde el grosor del inicio de los polos son similares al ancho de la cara de los polos “C”. Si se considera que las bobinas de los polos en este caso tienen una secuencia de

polarización como sigue N-S-N-S-N-S-N-S, entonces el inicio de los polos solamente necesitaría la mitad del ancho que se propone. Si en cambio la secuencia de polarización fuera N-S-S-N-N-S-S-N, entonces el inicio de los polos debería ser igual que la cara que ve el rotor. En estos casos, se debe cuidar que la geometría sea lo suficientemente robusta para evitar una prematura saturación magnética en el material. Esto significa dándole las dimensiones correctas.

d = Diámetro Interior
 c = Ancho del polo
 h = Altura del devanado
 A_n = Área entre devanados
 d_r = Diámetro del Rotor
 d_a = Diámetro Exterior
 d_i = Diámetro de la flecha
 b = Ancho del balero
 l = largo del balero($h + b$)
 S_0 = Distancia de Separación Nominal

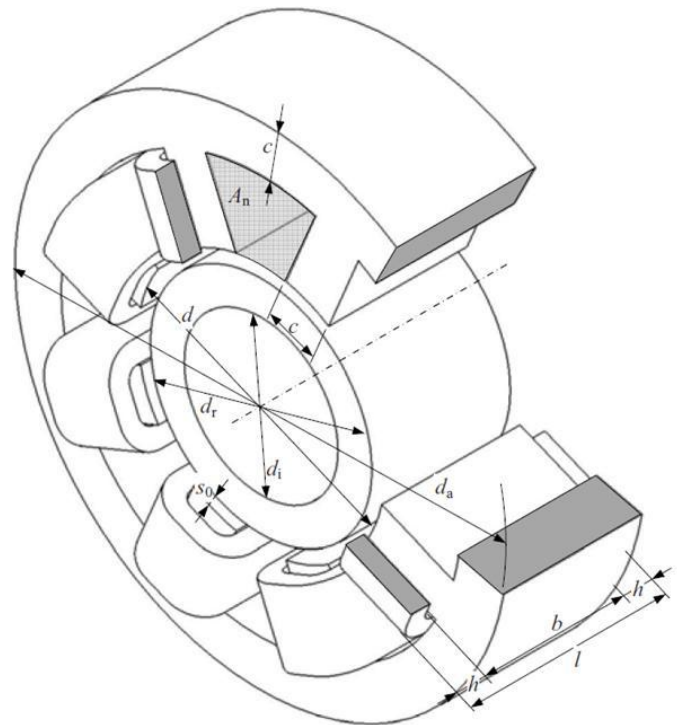


Figura 22 Geometría típica de un balero magnético radial

5 MODELADO MATEMÁTICO DEL ARRANQUE DEL AEROGENERADOR

En este capítulo se estudia y analiza el periodo en el cual inician los alabes desde un posición estática, hasta alcanzar su valor de λ de diseño, definido como arranque. El arranque del aerogenerador propuesto depende de tres factores: El primero es debido a la transformación de la energía cinética a mecánica por parte de los alabes, generando un momento de fuerza. El segundo es debido a las pérdidas mecánicas en los baleros, los cuales soportan la flecha del aerogenerador. Por último es causado por el generador eléctrico, que es encargado de transformar la energía mecánica en eléctrica.

Para el modelado se propone un balero magnético activo (BMA), los cuales han demostrado incrementar la eficiencia de las maquinas en las que han sido usados tal como se menciona en el capítulo 1. Para este caso se propone BMA acoplado en un aerogenerador de baja capacidad, con el propósito de demostrar que la eficiencia en estos se ve incrementada, comparándolo con un aerogenerador que tenga baleros de tipo bola.

Se espera que el uso de BMA, ayude a incrementar el desempeño de los aerogeneradores de baja capacidad a bajas velocidades de viento. Sumado a esto, los aerogeneradores dentro de las ciudades, donde existen bajas velocidades de viento podrían ser una opción.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DEL AEROGENERADOR

Para realizar esta comparación, se tomaron en cuenta los siguientes subsistemas del aerogenerador (ver Figura 23), el primer subsistema a considerar es el momento del alabe y su aerodinámica (1) esta sección del aerogenerador se ve afectada por la capacidad de los alabes a aprovechar el recurso eólico disponible dependiendo del diseño del alabe, calculándose en esta sección la energía de entrada para el sistema completo. El segundo subsistema es la parte mecánica (2), donde se considera la fricción (M_r) generada por los baleros de bola sobre los que se encuentra soportada la flecha del aerogenerador y el último es el sistema eléctrico (3), el cual considera las pérdidas ocasionadas durante el arranque, por el generador de imanes permanentes, la cuales son ocasionadas por un fricción magnética (F_{cog}) que depende de la construcción interna de cada generador eléctrico.

Los principios aerodinámicos del alabe fueron definidos previamente en la sección 3.2. Una consideración mecánica importante es que se tomó en cuenta la fricción mecánica (M_r) generada por baleros ETN9-SKF-6207, los cuales son usados en el eje del aerogenerador. También es considerada una fuerza conocida como fricción de arranque magnético o “cogging” la cual definiremos como F_{cog} , esta fuerza es un torque que se opone al movimiento del rotor por parte del generador eléctrico de imanes permanentes, donde la suma de $M_r + F_{cog} = Q_r$, donde este último se conoce como fricción resistiva de arranque Q_r .

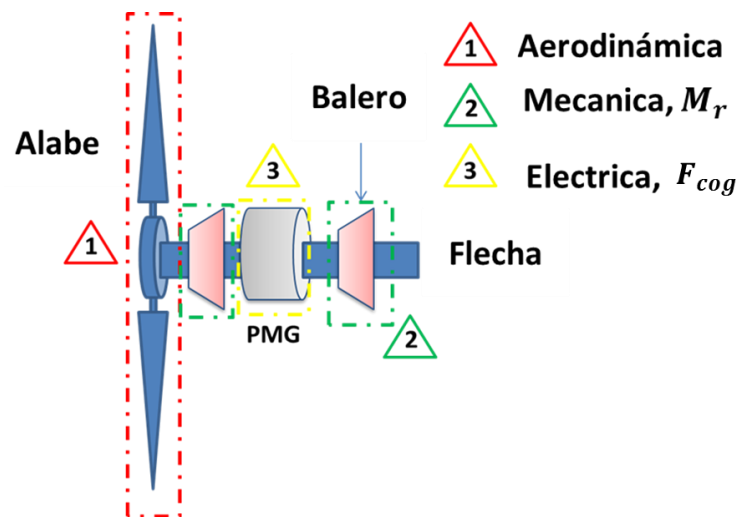


Figura 23 Configuración esquemática del aerogenerador

5.2 MOMENTO DEL ALABE

El momento del alabe o también conocido como par de arranque (T) es la fuerza necesaria para iniciar el movimiento de los alabes. Para estimar el tiempo de arranque del aerogenerador, se utiliza la siguiente metodología: (Wood and Ebert, 1997).

Algunas variables que intervienen en el arranque y deben tomarse en cuenta son la geometría del alabe, la densidad (ρ) del material de los alabes, velocidad del viento que incide sobre el aerogenerador (U), λ nominal de funcionamiento deseada, el número alabes y el ángulo de ataque (α), coeficientes de sustentación (C_L) y arrastre (C_D).

La Ec. 22 es utilizada para el cálculo del momento de inercia (J) de los alabes, donde N es el número de alabes, ρ es la densidad del aire, A_{alb} es el área de la superficie del alabe, R es la

longitud del alabe, L es la longitud de la cuerda local para cada longitud (r) correspondiente del alabe, y β es el ángulo de calaje.

$$J = N \rho A R^5 \left[\int (L r)^2 dr + \frac{A_{alb}}{12} \left(\int L^4 \cos^2 \beta dr + A_{alb}^2 \int L^4 \sin^2 \beta dr \right) \right] \quad \text{Ec. 22}$$

La Ec. 23 se utiliza para el cálculo de la revoluciones por minuto (rpm) a partir de su velocidad angular (Ω), y la Ec. 24 se utiliza para calcular la potencia (P) transmitida a la flecha por los alabes. En este caso, T es el torque sobre la flecha.

$$\text{RPM} = \Omega \frac{30}{\pi} \quad \text{Ec. 23}$$

$$P = \Omega T \quad \text{Ec. 24}$$

5.3 ARRANQUE DEL AEROGENERADOR

El cálculo del tiempo de arranque del aerogenerador, es necesario conocer la λ_r de diseño y la velocidad del viento (U). De la Ec. 25 se puede notar que hay una relación inversa entre las variables.

$$\frac{U}{\Omega r} = \frac{1}{\lambda_r} \quad \text{Ec. 25}$$

La velocidad de viento relativa (U_R) sobre una sección del alabe se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$U_R = \sqrt{U^2 + (r \Omega)^2} \quad \text{Ec. 26}$$

En un aerogenerador sin control de ajuste para el ángulo de ataque (α), es necesario calcular un ángulo de ataque en cada (U_R), el cual es dependiente del tiempo, por lo que su comportamiento viene dado por la siguiente ecuación (Wood 2011):

$$\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt} \quad \text{Ec. 27}$$

La Ec. 28 se utiliza para calcular el ángulo de ataque sobre el alabe, cuando Ω se encuentra acelerando ($\dot{\Omega}$):

$$\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{-rU}{r^2\Omega^2 + U^2} \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{Ec. 28}$$

Por otro lado, para estimar el par de arranque inicial para hacer girar los alabes, se utiliza la siguiente ecuación:

$$T = J\dot{\Omega} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{Ec. 29}$$

Esta expresión tiene la desventaja de que sólo se utiliza en turbinas de viento horizontales y cuando no hay una fuerza de arrastre sobre el alabe. La principal contribución al torque inicial es la fuerza de sustentación. Este efecto puede ser observado en las Ec. 300 y Ec. 31 (Wood 2011), cuando en un tiempo inicial es casi cero el λ_r es despreciable, por lo que C_D podría ser eliminado y sólo existe C_L .

El coeficiente del par de torsión (C_q) se obtiene a partir de la Ec. 300, que requiere las características aerodinámicas del alabe, la velocidad del viento (U), la densidad de viento (ρ), y la longitud total de los alabes (R). También esto calcula a partir de la relación de velocidad (λ_r) en cada sección del alabe con su propio coeficientes de sustentación y arrastre.

$$C_q = \frac{2T}{\rho U^2 \pi R^3} = \frac{N}{\pi} \int_r^1 [1 + \lambda_r^2]^{1/2} [c_l - \lambda_r c_d] L r dr \quad \text{Ec. 30}$$

La ecuación antes mencionada se resuelve cuando el aerogenerador alcanza la relación de velocidad periférica (λ), esto significa que λ_r es igual a λ .

Para conocer el efecto del balero en el arranque del aerogenerador, se utiliza la Ec. 31, esta describe cómo la relación de velocidad periférica (λ) se ve afectada por una fricción resistiva de arranque (Q_r) que se opone al movimiento.

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{R(Q - Q_r)}{JU} \quad \text{Ec. 31}$$

5.4 FRICCIÓN DURANTE EL ARRANQUE

Un balero mecánico para esta tesis, se entiende como un rodamiento de bolas, el cual es un dispositivo encargado de soportar las cargas mecánicas radiales que se generan en la flecha del

aerogenerador y las cargas mecánicas axiales por el propio peso del aerogenerador. El balero tiene dos funciones: la primera de soportar el peso completo del generador eléctrico, flecha, buje y alabes. La segunda permitir un giro de la flecha con la mínima fricción posible.

Para determinar la contribución de la fricción al arranque del balero 6207 SKF ETN9 (véase la figura Figura 24) se utiliza la Ec. 32, para el cálculo de fricción mecánica de arranque (M_r) según sean las especificaciones para distintos baleros.



Figura 24 Interior y sellos de un balero de bolas

La fricción de arranque (M_r) para un balero de bolas está definida como el momento de fricción que debe ser superado para que el balero comience a rotar. En este caso, únicamente la fricción de deslizamiento (M_{dsl}) y la fricción de los sellos (M_{sello}) son consideradas. Para temperaturas ambiente de 20 a 30 °C, la fricción de arranque (M_r) puede ser calculada de la siguiente manera:

$$M_r = M_{dsl} + M_{sello} \quad \text{Ec. 32}$$

La fricción de deslizamiento (M_{dsl}) se calcula a partir de la Ec. 33, donde μ_{dsl} es el coeficiente de fricción de deslizamiento y G_{dsl} es una variable que depende del tipo de balero, el diámetro medio del balero, la carga radial y la carga axial.

$$M_{dsl} = \mu_{dsl} G_{dsl} \quad \text{Ec. 33}$$

El μ_{dsl} es calculada con la Ec. 34, donde ϕ_{bl} es el factor de peso de la fricción de deslizamiento (ver la Figura 25), el cual está definido en la Ec. 35. μ_{bl} es el coeficiente que depende del lubricante que se utilice, generalmente tiene un valor aproximado de 0.15. En cuanto a μ_{EHL} es un coeficiente que depende del tipo de balero y su lubricante, los cuales se muestran en la Tabla 5.

$$\mu_{dsl} = \phi_{bl} \mu_{bl} + (1 - \phi_{bl}) \mu_{EHL} \quad \text{Ec. 34}$$

$$\phi_{dsl} = \frac{1}{e^{2.6 \times 10^{-8} (n v)^{1.4} d_m}} \quad \text{Ec. 35}$$

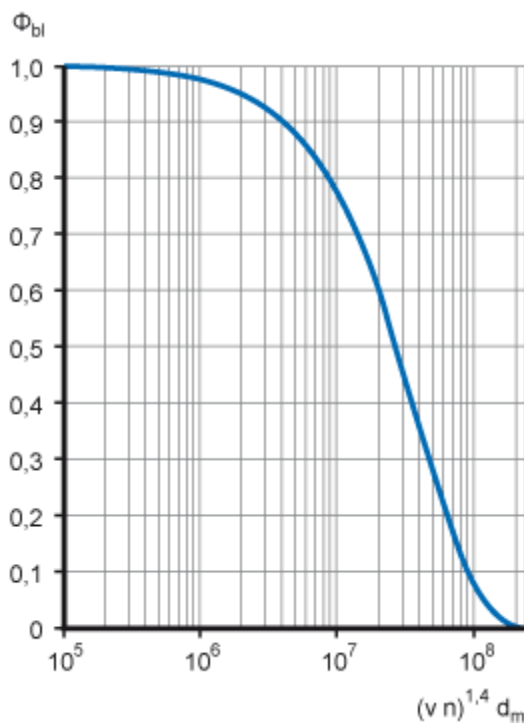


Tabla 5 Coeficientes de μ_{EHL}

Tipo	Valor
Baleros cilíndricos	0.02
Baleros Cónicos	0.002
Otro Baleros	
Lubricación	
Aceites minerales	0.05
Aceites sintéticos	0.04
Fluidos para transmisión	0.1

Figura 25 Factor de peso ϕ_{bl} para μ_{dsl}

Donde para la Ec. 35, se enlista la siguiente tabla de nomenclatura (SKF Bearings n.d.):

Tabla 6 Nomenclatura para ϕ_{bl} (únicamente Ec. 35)

e	Logaritmo de base natural ≈ 2.718
n	Revoluciones por minuto
v	Viscosidad cinemática operando a temperatura de diseño (mm^2/s)
d_m	Diámetro medio del balero (mm)

Cuando los baleros están equipados con sellos, las perdidas por fricción en los sellos, pueden llegar a ser mayores incluso a los generados por los baleros. La fricción del sello es calculada con la siguiente ecuación:

$$M_{sello} = K_{s1}d_s^{\beta} + K_{s2} \quad \text{Ec. 36}$$

K_{s1} es una constante que depende de la clase de balero, k_{s2} es una segunda constante que depende del tipo de sello, tamaño y tipo de balero, d_s es el diámetro de contacto entre la junta y la superficie, β es un número exponencial determinada por el tipo de rodamiento y el sello, los cuales se pueden especificar con la Tabla 7.

Tabla 7 Fricción por el sello: exponentes y constantes

Tipo de Sello Tipo de Balero	Diámetro exterior del balero [mm]		Exponentes y constantes			Diámetro de contacto entre el sello y superficie
	D Sobre	incl.	β	K _{S1}	K _{S2}	d _s
Sello RSL						
Balero rígido de bolas	–	25	0	0	0	d ₂
	25	52	2.25	0.0018	0	d ₂
Sello RZ						
Balero rígido de bolas	–	175	0	0	0	d1
Sello RSH						
Balero rígido de bolas	–	52	2.25	0.028	2	d ₂
Sello RS1						
Balero rígido de bolas	–	62	2.25	0.023	2	d ₁ , d ₂
	62	80	2.25	0.018	20	d ₁ , d ₂
	80	100	2.25	0.018	15	d ₁ , d ₂
	100		2.25	0.018	0	d1, d2
Balero de contacto angular	30	120	2	0.014	10	d1
Balero de rotula	30	125	2	0.014	10	d2
Sello LS						

Balero de agujas	42	360	2	0.032	50	E
Sellos CS, CS2 and CS5						
Rodamientos de rodillos	62	300	2	0.057	50	d ₂
Baleros CARB	42	340	2	0.057	50	d ₂

Este valor fue calculado a partir de los datos especificados por el fabricante.

5.5 AEROGENERADOR CON BALERO MAGNÉTICOS

Los baleros magnéticos son capaces de suspender un objeto sobre una superficie, sin que exista contacto físico entre la superficie y el objeto. Esta configuración se muestra en la Figura 26, aplicada para un aerogenerador utilizando baleros magnéticos activos (BMA), el cual consiste en un generador de imanes permanentes (PMG, por sus siglas en inglés), dos BMA radiales y un BMA axial, sensores de distancia y un control, el cual se encarga de recibir la lectura de los sensores de distancia para conocer la posición de la flecha del aerogenerador y así poder ajustar la fuerza magnética necesaria en el BMA para reajustar la posición del rotor.

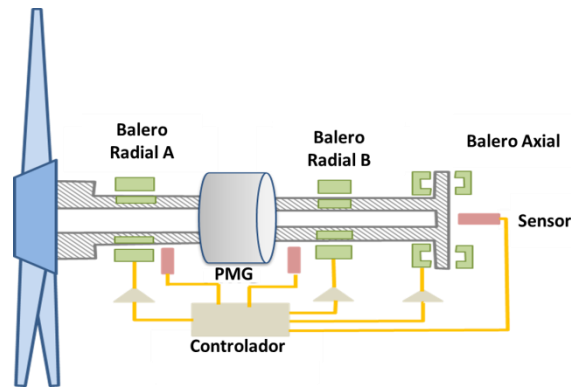


Figura 26 Configuración esquemática de un aerogenerador horizontal con levitación magnética

Utilizando la ley de Ampere y asumiendo que existe una alta permeabilidad en el hierro, la densidad de flujo magnético (B) en el vacío se determina por la siguiente ecuación, con lo que se calcula las fuerzas que actúan sobre el eje para hacerlo levitar:

$$B = \frac{\mu_0 N_w I}{2 z_0} \quad \text{Ec. 37}$$

Donde z_0 es una posición óptima de detección para el sensor, N_w es el número de vueltas de uno de los devanados del balero magnético, I es la corriente eléctrica aplicada, μ_0 es la permeabilidad del aire.

En la Ec. 38 se calcula la fuerza para desplazar el eje en una sola dirección, z es el desplazamiento vertical de la flecha en relación con la posición recomendable de la misma, aplicado únicamente para un grado de libertad es decir, en un solo eje. De igual manera, esto aplica en cada eje del sistema (x , y , z), dependiendo de los grados de libertad según se requiera, i_c es la corriente de control, I_o es la corriente necesaria para mantener levitando el eje, siempre y cuando no existan factores externos que desplacen el eje de rotación, k es la ganancia que debe ser calculada para mantener el sistema en equilibrio pudiendo ser una ganancia proporcional o integral (Ec. 39).

$$F_z = \frac{\partial W}{\partial z} = k \frac{(I_o - i_c)^2}{(z_0 - z)^2} \quad \text{Ec. 38}$$

$$k = \frac{\mu_0 N_w^2 A_b}{4} \quad \text{Ec. 39}$$

Donde, A_b es el área de un polo del núcleo del balero, μ_0 es la permeabilidad del aire, N_w es el número de vueltas de uno de los devanados del balero magnético, (Schweitzer and Maslen H. 2009).

En cuanto al control, un modelo típico es el que menciona Huachun Wu (Huachun, Xiuzhen and Yefa 2009), el cual se muestra en la Figura 27. El cual es un algoritmo de control PID, esto para prevenir que el balero magnético haga levitar la flecha súbitamente al inicio, en caso de finalizar el control, este tenga un desplazamiento lento al momento de finalizar su operación.

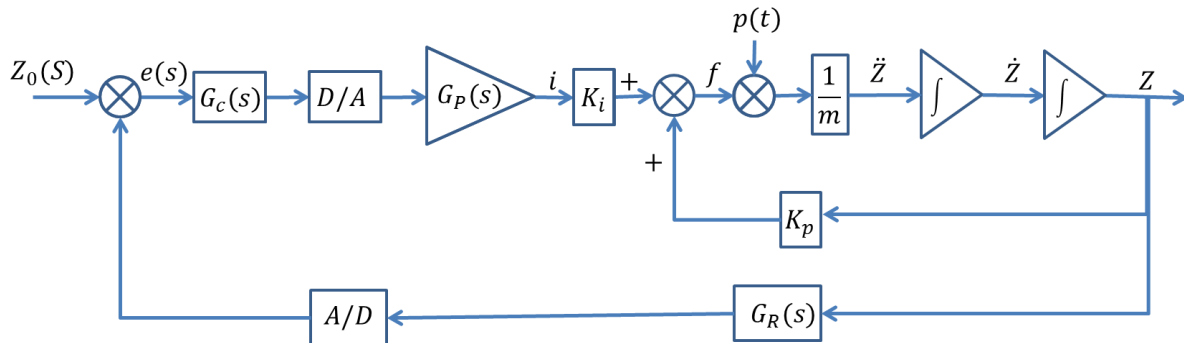


Figura 27 Diagrama esquemático de control para un balero magnético axial

5.6 TORQUE DE ARRANQUE MAGNÉTICO

El efecto del torque de arranque magnético (F_{cog}) (Luo, et al. 2009), es producido por la atracción magnética entre el rotor con imanes permanentes y su estator, este tiende a detener el giro del eje en movimiento durante su arranque. La fuerza tiene un componente circunferencial de fuerzas atractivas que procuran mantener el alineamiento entre los dientes del estator y los imanes permanentes. El espectro de esta fuerza, depende únicamente de la geometría del núcleo y el número de espacios en el estator. Lo que significa que el modelo analítico del torque de arranque magnético (F_{cog}) va cambiando según la construcción.

Un modelo típico para el cálculo del torque de arranque magnético es una señal sinusoidal como se muestra en la Ec. 40, que depende de la amplitud de la fuerza magnética (A_m) a la que se ve sometido el generador de imanes permanentes, entre su estator y rotor, la frecuencia del este (ω), el desplazamiento lineal entre rotor y estator (x) y el ángulo de desfase (ψ) entre el imán permanente y los polos del estator.

$$F_{cog} = A_m \sin(\omega x + \psi) \quad \text{Ec. 40}$$

5.7 RESOLUCIÓN DE ALGORITMO

Para la solución del arranque de ambos sistemas de aerogeneradores se propone un aerogenerador de 500 W de potencia (P_{wt}) con un λ de 8, utilizando los perfiles de la NREL S822 y S823. Los parámetros de diseño del aerogenerador, se muestran en la Tabla 8. Una consideración mecánica importante es que se tomó en cuenta la fricción mecánica (M_r) ofrecida por los baleros ETN9-SKF-6207, los cuales son usados en el eje del aerogenerador. También se consideró el par de arranque magnético (cogging, F_{cog}), esta fuerza es formada por el generador eléctrico de imanes permanentes (PMG).

Tabla 8 Parámetros de diseño para el Aerogenerador

Característica	Valor
Potencia	500 W
Perfiles	S822 y S823
λ	8
No. de Costillas	12
Balero	ETN9

El alabe fue diseñado en 12 costillas a partir de las ecuaciones en el capítulo 3, con un determinado ángulo de calaje (β), una longitud total (R), como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9 Alabe diseñado de los perfiles S822 y S823

Costilla	r/R	R (m)	β	Cuerda (m)	Perfil
1	0.01	0.01	49.89	0.10	S823
2	0.10	0.08	29.40	0.15	S823
3	0.19	0.16	17.49	0.15	S823
4	0.24	0.21	10.95	0.10	S823
5	0.37	0.31	7.03	0.07	S823
6	0.46	0.39	5.86	0.06	S823
7	0.55	0.47	4.69	0.06	S822
8	0.64	0.55	3.38	0.06	S822
9	0.7	0.62	2.37	0.05	S822
10	0.82	0.70	1.58	0.04	S822
11	0.91	0.78	0.94	0.04	S822
12	1.00	0.85	0.42	0.03	S822

Los parámetros del estudio para calcular la potencia del aerogenerador es la densidad y el número de alabes, un F_{cog} de 0.5 Nm, una M_r de 0.8 Nm, la suma del F_{cog} y la M_r ofrece el torque resistivo de arranque (Q_r), que es de 1.3 Nm, el momento de inercia del alabe es de 1.6 Nm. Estos datos se resumen en la Tabla 10, que se muestra a continuación.

Tabla 10 Características del Aerogenerador

Parámetros	Cantidad
No. de Alabes	3
Densidad del Alabe (kg/m^3)	550
Momento de Fricción (Nm)	1.3
Momento de Inercia (Nm)	1.6

5.8 RESULTADOS

El análisis consiste en la evaluación del aerogenerador con baleros de bolas y magnéticos a 3 velocidades de viento diferentes; 4, 6 y 8 m/s con 2 diferentes Q_r , uno para el aerogenerador con baleros mecánicos y otro con baleros magnéticos, siendo 1.3 y 0.5 Nm, respectivamente, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11 Velocidades de Evaluación y Q_r de cada aerogenerador

	Q_r (Nm)	Velocidades Evaluadas (m/s)
Aerogenerador con baleros mecánicos	1.3 Nm	4, 6 y 8
Aerogenerador con baleros magnéticos	0.5 Nm	4, 6 y 8

Las figuras **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestran los resultados para el tiempo de arranque y su resultado analítico para lograr un λ del aerogenerador dada en un tiempo determinado. En todos los casos, el λ nominal es 8, por lo que se considera que el tiempo de final del arranque del aerogenerador es cuando alcanza ese valor.

Arranque con λ

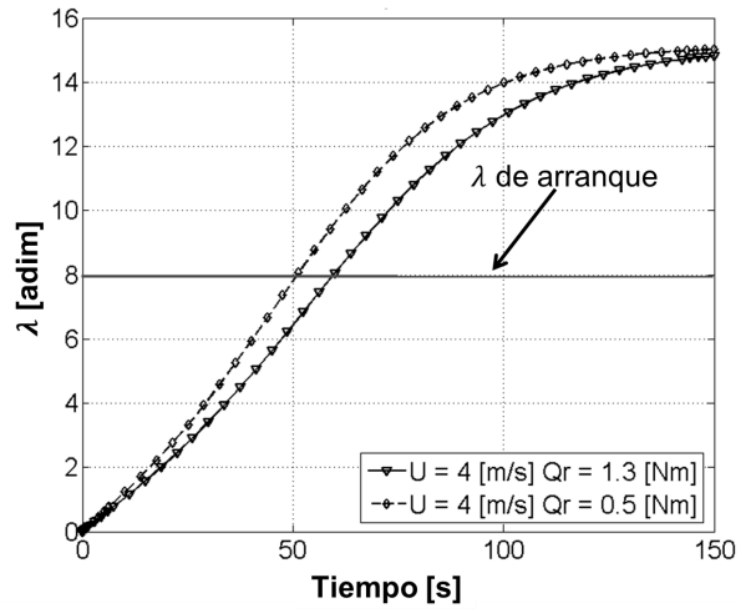


Figura 28 Velocidad de arranque para viento de 4 m/s

Arranque con λ

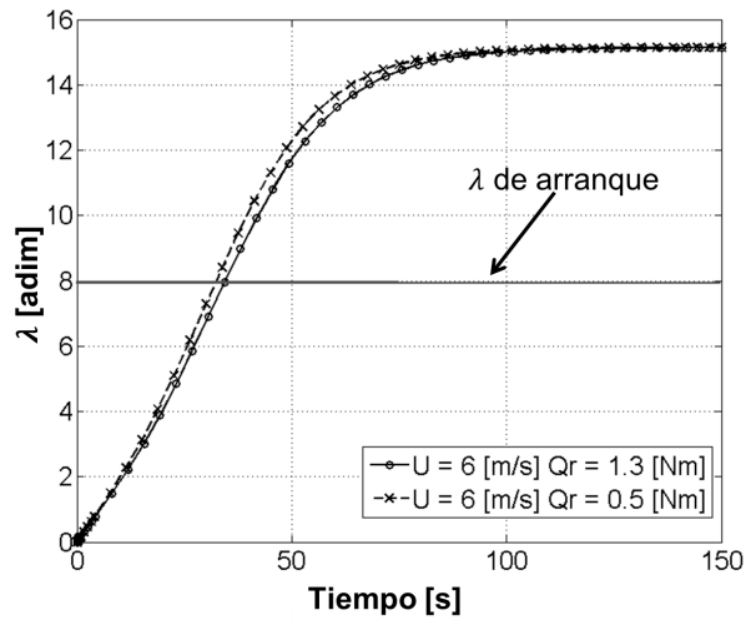


Figura 29 Velocidad de arranque para viento de 6 m/s

Arranque con λ

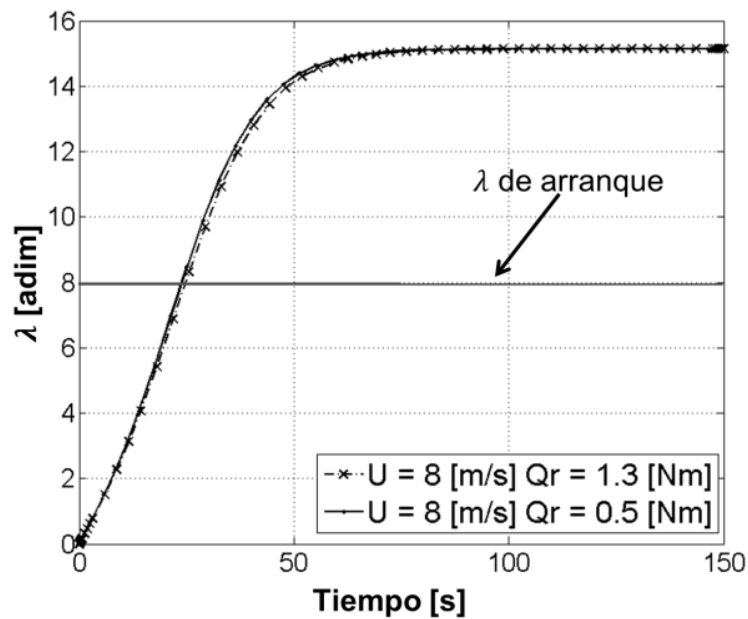


Figura 30 Velocidad de arranque para viento de 8 m/s

Las figuras **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestran el tiempo que tarda el aerogenerador en alcanzar sus rpm de arranque para cada uno de los aerogeneradores a las velocidades en las que es evaluado. La diferencia en el tiempo de inicio para la velocidad de 4 m/s comparando los dos aerogeneradores es de 8.96 s, para 6 m/s es de 1.93 s y por último para 8 m/s es de 0.84 s.

De acuerdo con los resultados analíticos para el modelo de aerogenerador con baleros magnéticos, el cual se considera con un $Q_r = 0.5$ Nm, el tiempo para alcanzar las RPM de diseño es menor en este aerogenerador que el que cuenta con $Q_r = 1.3$ Nm. En **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es importante darse cuenta de que a los 8 m/s, las rpm se vuelven estables a 950 rpm, esto sucede debido a que el modelo considera sólo la fuerza de sustentación durante este periodo de tiempo (el arranque), y no se considera la fuerza de arrastre. Los resultados se listan en la Tabla 12.

Arranque con RPM

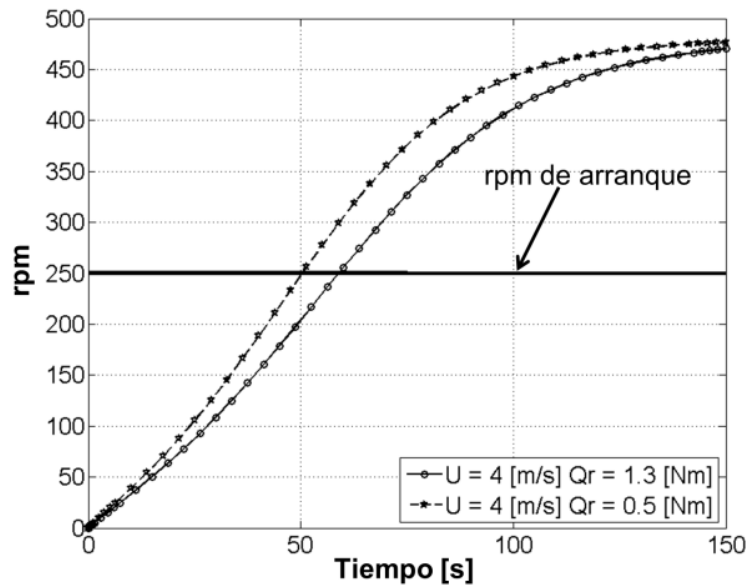


Figura 31 rpm de arranque para velocidad de viento de 4 m/s

Arranque con RPM

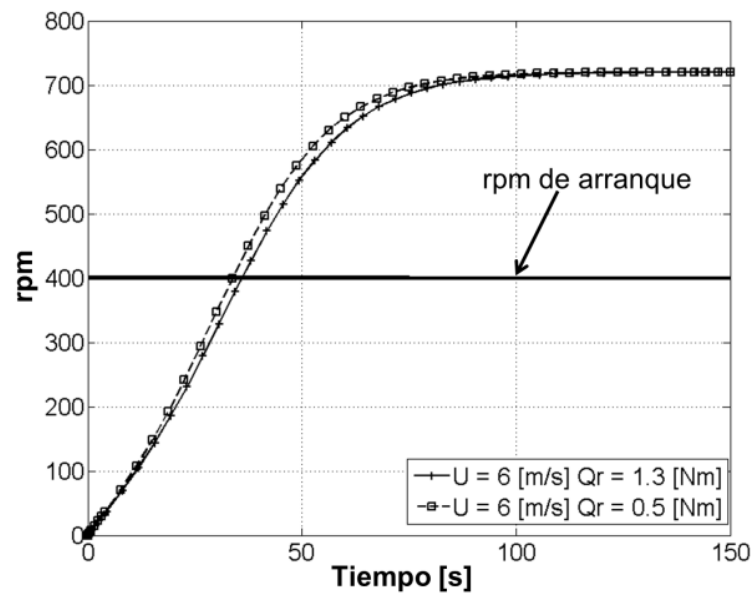


Figura 32 rpm de arranque para velocidad de viento de 6 m/s

Arranque con RPM

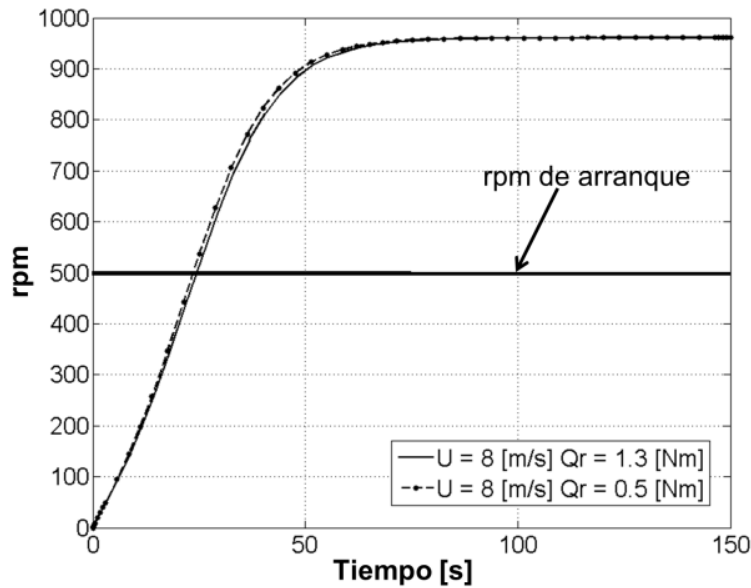


Figura 33 rpm de arranque para velocidad de viento de 8 m/

Tabla 12 Velocidad de arranque para distintas velocidades de viento y RPM para torques resistivos

Velocidad de Viento (m/s)	RPM	Torque Resistivo (Q_r)		Diferencia de Tiempos (s)
		0.5 Nm	1.3 Nm	
8.00	507.51	23.92 s	24.76 s	0.84
6.00	380.63	32.42 s	34.35 s	1.93
4.00	253.75	51.06 s	60.02 s	8.96

En la Figura 34, se muestra la velocidad de arranque para distintas velocidades de viento. La velocidad mínima de arranque se determina a una velocidad del viento de 3 m/s para ambas turbinas de viento. Por otra parte, de acuerdo con los resultados analíticos, velocidades por debajo de 6 m/s tiene una diferencia de tiempo mayor de 3 s, para velocidades mayores a los 6 m/s el tiempo de arranque entre ambos aerogeneradores, se vuelven insignificantes.

Velocidades de arranque con $Q_r = 0.5$ and $Q_r = 1.3$ [Nm]

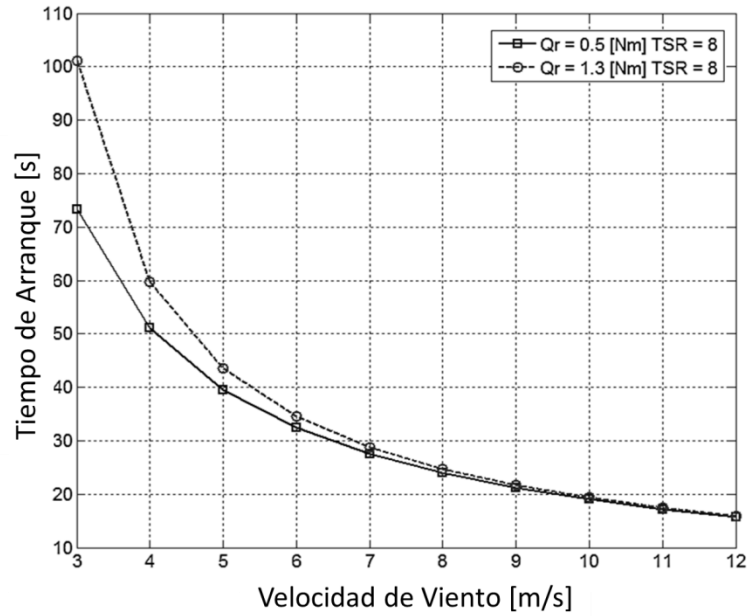


Figura 34 Velocidad de arranque para distintas velocidades de viento

La Figura 35 representa que a medida que aumenta λ , hay una diferencia de potencia generada por el aerogenerador, donde el aerogenerador con baleros magnéticos genera 592.8 W , generando el aerogenerador con baleros mecánicos genera 550.3 W con una velocidad de 8 m/s . A una velocidad de 4 m/s el primer modelo otorga 63.94 W, mientras que el segundo solamente entrega 42.68 W con lo que se calcula un incremento del 33.2% de eficiencia. El exceso de energía que comienza a una λ de 5 es debido a las mismas aerodinámica de la palas que se aceleran presentar diferentes ángulos de ataque, con distintos coeficientes de sustentación (C_L) y arrastre (C_D). Por otro lado, en una λ de 6.5 para todos los casos se presenta un fenómeno de estancamiento, donde los coeficientes de sustentación y resistencia muestran una disminución en la potencia y el par debido a la aceleración del propio alabe, la generación para las velocidades más significantes se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13 Potencia generada para velocidades de 8 y 4 m/s

	Potencias Generadas (W)	
	U = 8 m/s	U = 4 m/s
Aerogenerador con Baleros Mecánicos	550.3	42.68
Aerogenerador con Baleros Magnéticos	592.8	63.94
Incremento de Eficiencia (%)	7.2%	33.2%

Generación de potencia con $Q_r = 0.5$ and 1.3 [Nm]

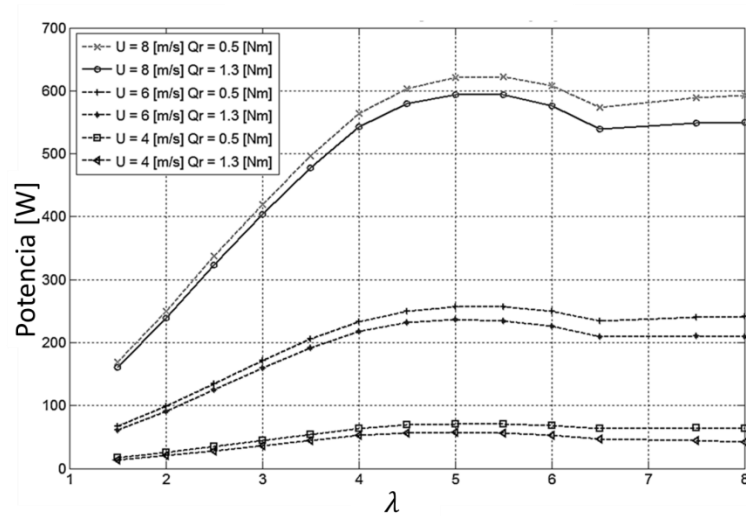


Figura 35 Generación de potencia a distintas λ

6 CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES

Las características operativas de un aerogenerador de baja capacidad con levitación magnética aportan importantes ventajas para su utilización en la generación de energía eléctrica y a la maquina misma en cuanto a su comportamiento mecánico.

La evaluación realizada a la propuesta tecnológica de un aerogenerador de baja capacidad con baleros magnéticos durante su arranque muestra diversas ventajas como un arranque con menores velocidades de viento y en un menor tiempo, comparado con los sistemas de generación eólica convencionales. Con lo que concluye que el acoplamiento de baleros magnéticos y un aerogenerador de baja capacidad en estado transitorio, llegan a ser satisfactorio como propuesta de construcción. Basados en los resultados de comparación y análisis de dos sistemas de aerogeneradores, donde el primero es un aerogenerador con baleros magnéticos y el segundo con baleros normales, basados en los siguientes puntos.

1. Para velocidades de viento de 8 m/s, con una λ de 8 de la diferencia en tiempo de arranque para ambos sistemas es de 0.84 s, que es un tiempo no es significativa. Sin embargo, la potencia generada por el aerogenerador con un menor Q_r , es significativa, ya que genera más que el segundo sistema, el cual aporta 592.8 W, lo que significa que aumenta la eficiencia de 7.2 % disminuyendo el torque resistivo.
2. Para velocidades de viento de 4 m/s, con una λ de 8 de la diferencia en tiempo de arranque para ambos sistemas es 8.96 s, que se convierte en un tiempo importante, si se tiene en cuenta los intervalos cortos de las ráfagas de viento. La energía generada por el segundo sistema el cual es de 42.68 W y el primer sistema genera 63.94 W que da una eficiencia del 33.2 %.
3. Se analizaron diferentes condiciones de velocidad del viento. En los tres casos, el aerogenerador con baleros magnético alcanzó en menos tiempo el λ de diseño comparado con el de baleros de bolas. Esto es debido a la disminución fricción resistiva de arranque. Los tiempos de arranque fueron de 23.92, 32.42 y 51.06 s para 8, 6 y 4 m / s, respectivamente con baleros magnéticos.

Para el estudio del arranque en aerogeneradores se realizó un programa en el software MATLAB® capaz de analizar la captación de energía cinética en el viento hacia los alabes del aerogenerador. Así como otros programas, para la elaboración de alabes, los cuales pueden ser utilizados para fines de diseño y optimización.

6.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda dividir este trabajo en tres secciones para futuras evaluaciones, en dos líneas de investigación una en aerogeneración y baleros magnéticos activos, para ser integrados en un futuro:

Con respecto a la aerogeneración, realizar una evaluación en el diseño de alabes con las herramientas desarrolladas considerando la utilización de distintos materiales como maderas, materiales compuestos y metales ligeros para su construcción, realizando el respectivo análisis de esfuerzos para cada evaluación.

En el diseño actual del aerogenerador simulado el efecto de estancamiento indica que el diseño del alabe puede mejorarse, variando el ángulo de ataque o el λ de diseño o realizando un control para el ángulo de calaje del aerogenerador.

Actualizar las herramientas actuales de diseño y evaluación del arranque hacia una interfaz gráfica, así como su respectiva validación con pruebas experimentales controladas.

En cuanto a baleros magnéticos activos, realizar un diseño control basado en PID con micro controlador, desarrollándose las ecuaciones dinámicas del rotor de un aerogenerador expuesto a los esfuerzos generados por los alabes al contacto con ráfagas de viento. Diseñar el actuador del balero magnético activo a partir de las necesidades del controlador así como la selección de los dispositivos para su ensamblado y validación experimental.

Finalmente es necesario realizar estudios más detallados del sistema en conjunto de manera experimental, sin dejar de lado las evaluaciones técnico/económicas.

6.3 TRABAJOS FUTUROS

Para completar el trabajo realizado en esta tesis, se propone la finalización del aerogenerador propuesto en esta tesis, con alabes, generador, buje, veleta, base y demás accesorios necesarios ensamblados tal como se muestra en la figura XX.



Figura 36 1er Ensamble del aerogenerador, con generador eléctrico expuesto.

Esto con la finalidad de validar las simulaciones tanto del diseño del aerogenerador en un túnel de viento. El cual al momento de finalizar esta tesis, se encuentra en proceso de instalación para futuras pruebas a distintos aerogeneradores, tal como se muestra en la figura XX.



Figura 37 Vista lateral del túnel de viento rehabilitado para pruebas.

Esto con el afán de evaluar de manera más precisa el sistema propuesto de aerogeneración con levitación magnética y continuar con otros sistemas futuros.

BIBLIOGRAFÍA

- Beams, J.W., J.L. Young, and J.W. Moore. "The production of high centrifugal fields." *Journal on Applied Physics*, 1946: 397-399.
- Bichsel, J. "The bearingless electrical machine." *Proc. International Symp. On Magnetic Suspension Technology NASA*. Hampton: NASA, 1991.
- Bleuler, H. "A survey of magnetic levitation and magnetic bearing types." *JSME International Journal Series* 35, no. 3 (Septiembre 1992).
- Boden, K. "Wide-gap, electro-permanent magnetic bearing system with radial transmission of radial and axial forces." *Magnetic Bearings First International Symposium on Magnetic Bearings* (Springer-Verlag), 1988.
- Burton, Tony, David Sharpe, Nick Jenkins, and Ervin Bossanyi. *Handbook of wind energy*. New York, New York: Wiley, 2001.
- Chiba, A. "Radial forces in a bearing less reluctance motor." *IEEE Trans. On Magnetics* 27, no. 2 (1991): 786-791.
- Conrado Moreno, Figueredo. «Análisis de las partes que componen los pequeños aerogeneradores y sus particularidades.» Editado por Echeverría Alejandro. (Cuba Solar), nº 39 (Julio-Septiembre 2007).
- Ebert, P. R., and David H. Wood. "Observation of the Starting Behaviour of a Small Horizontal-Axis Wind Turbine." *Renewable Energy* (Elsevier-Pergamon) 12, no. 3 (1997): 245-257.
- Fernandez Diez, Pedro. *Energía Eólica*. Universidad de Cantabria, 2002.
- Fremerey, J.K. "Radial Shear Force Permanent Magnetic Bearing System with zeropower axial control and passive radial damping." *Magnetic Bearings First International Symposium on Magnetic Bearings* (Springer-Verlag), 1988.
- Higuchi, T. "Realization of non contact ac magnet suspension." *Japan Joint Automatic Conference*, no. Procedure 34 (Noviembre 1991).

- Huachun, Wu, Wang Xiuzhen, and Hu Yefa. "Development of Small Wind Generator Based on Hybrid Magnetic Bearing." *Power and Energy Engineering Conference (APPEC 2009)* 1, no. 4 (Marzo 2009): 27-31.
- Koshizuka, N., and F. Ishikawa. "Progress of superconducting bearing technologies for flywheel energy storage system." *Physica*, 2003: 444-450.
- Kummeth, P., W. Nick, and H.W. Neum. "Development of superconducting bearings for industrial application." *Proc. 10th Internat. Symp. Magnetic Bearings*, Agosto 2006.
- Kurita, Nobuyuki, Ohshio Keisuke , and Takeo Ishikawa. "Basic analysis and design of the permanent magnet hybrid type magnetic bearing for small-sized hydraulic generator." *Power Electronics Conference* 1506, no. 1511 (Junio 2010): 21-24.
- Luo, Ying, YangQuan Chen, Hyo Sung Ahn, and Youguo Pi. "Fractional Order Periodic Adaptive Learning Compensation for Cogging Effect in PMSM Position Servo System." *American Control Conference*. Riverfront, St, Louis: IEEE, 2009. 937-942.
- Moon, F.C., and P.Z. Chang. "High speed rotation of magnets on high Tc superconducting bearings." *Journal on Applied Physics* 56 (1990): 397-399.
- Navales, Ana Patricia Talayero. *Energia Eolica*. Zaragoza, España: Prensas Universitarias, 2008.
- Nicolajsen, J.L. "Experimental investigation of an eddy current bearing." *Magnetic Bearing First International Symposium on Magnetic Bearings*. Berlin: Springer-Verlag, 1988.
- Parente, R.B. "Stability of a magnetic suspension device." *IEEE Transaction on aerospace and electronic system* (IEEE), Mayo 1969: 474-485.
- Sanza, Kazadi, Koh Chan-Hee, Kim Kevin, Jung Kyle, Kim Brian, and Wang Hubert. "The e-axle and its application to a floating windmill." *Advance in Electrical and Electronics Engineering* (IEEE Computer Society), 2008: 175-181.
- Schweitzer, Gerhard, and Eric Maslen H. *Magnetic Bearings*. Heidelberg: Springer, 2009.

Sindlinger. "Magnetic bearing momentum wheels with vernier gimballing capability for 3 axis active attitude control and energy storage." *Proc. VII-IFAC Symp. on Auto Control in Space*. Rottach-Egern, 1976.

SKF Bearings. *Momentos de Fricción*. n.d.
http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=es&newlink=1_0_37 (accessed 2011).

Somers, D.M. *The S822 and S823 Airfoils*. Airfoil, Inc., College State, Pennsylvania, Colorado: NREL, 2005.

Traxler, A. *Properties and interpretation over electromagnetic bearings*. Zurich: Springer, 1985.

Werfel, F.W., and U. Floegel-Deolor. "Flywheel energy storage system with HTS magnetic bearings." *Proc. 8th. International Symnp. Magnetic Suspension Technology (ISMST)*, Septiembre 2005: 256-260.

Wood, David. *Small Wind Turbines*. Calgary, AB: Springer Link, 2011.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Incremento de potencia de aerogeneradores	3
Figura 2 Diagrama esquemático de un aerogenerador	11
Figura 3 Componente de un aerogenerador de baja capacidad	12
Figura 4 Alabes para aerogenerador de baja capacidad	13
Figura 5 Buje en forma redonda (a) y en forma de estrella (b)	13
Figura 6 Caja multiplicadora con arreglo planetario	14
Figura 7 Generador de imanes permanentes	15
Figura 8 Distintos tipos de veleta para aerogeneradores de baja capacidad	15
Figura 9 Diferentes tipos de torres para ABC.	16
Figura 10 fuerza de arrastre (FD) y sustentación(FL) en un alabe estacionario	18
Figura 11 arrastre y sustentación en un alabe con movimiento	19
Figura 12 Fuerzas par y de empuje en de un aerogenerador.	20
Figura 13 Diagrama esquemático de ángulo de calaje (β), Angulo de Ataque (α)y cuerda (L)	20
Figura 14 Area de barrido y eficiencias de un aerogenerador	23
Figura 15 Graficas polares de a) S822 b) S823 (α Vs C_L)	26
Figura 16 Parámetro de forma (PF) en función de λ	27
Figura 17 Esquema de balero magnético activo	31
Figura 18 Modelo de prueba de levitación magnética.	32
Figura 19 Esquema de la suspensión de un rotor en corte transversal	32
Figura 20 Rotor en una suspensión magnética de la exhibición de Zurich (Traxler 1985)	33
Figura 21 Clasificación de baleros magnéticos y levitación. A: Estables con control activo, P: Pasivos estables sin control. Baleros con fuerzas de Lorentz: normales o tangenciales, se refiere a la dirección de la fuerza con respecto al vacío.	34
Figura 22 Geometría típica de un balero magnético radial	43
Figura 23 Configuración esquemática del aerogenerador	45
Figura 24 Factor de peso ϕ_{bl} para μ_{dsl}	49
Figura 25 Configuración esquemática de un aerogenerador horizontal con levitación magnética	51
Figura 26 Diagrama esquemático de control para un balero magnético axial	52
Figura 27 Velocidad de arranque para viento de 4 m/s	¡Error! Marcador no definido.
Figura 28 Velocidad de arranque para viento de 6 m/s	¡Error! Marcador no definido.
Figura 29 Velocidad de arranque para viento de 8 m/s	¡Error! Marcador no definido.
Figura 30 rpm de arranque para velocidad de viento de 4 m/s	¡Error! Marcador no definido.
Figura 31 rpm de arranque para velocidad de viento de 6 m/s	¡Error! Marcador no definido.
Figura 32 rpm de arranque para velocidad de viento de 8 m/s	¡Error! Marcador no definido.
Figura 33 Velocidad de arranque para distintas velocidades de viento	60

<i>Figura 34 Generación de potencia a distintas λ</i>	61
<i>Figura 35 1er Ensamble del aerogenerador, con generador eléctrico expuesto.</i>	64
<i>Figura 36 Vista lateral del túnel de viento rehabilitado para pruebas.</i>	64
<i>Figura 37 Diagrama de flujo para cálculo del tiempo de arranque</i>	80
<i>Figura 38 Diagrama de flujo para cálculo del tiempo de arranque</i>	80

LISTADO DE TABLAS

<i>Tabla 1 Resumen de barreras identificadas</i>	5
<i>Tabla 2 Valores para diseño del aerogenerador</i>	22
<i>Tabla 3 Coeficientes de corrección por velocidad</i>	23
<i>Tabla 4 Factores de Corrección de la densidad del aire</i>	24
<i>Tabla 5 Coeficientes de μ_{EHL}</i>	49
<i>Tabla 6 Nomenclatura para ϕ_{bl} (únicamente Ec. 35)</i>	49
<i>Tabla 7 Fricción por el sello: exponentes y constantes</i>	50
<i>Tabla 8 Parámetros de diseño para el Aerogenerador</i>	54
<i>Tabla 9 Alabe diseñado de los perfiles S822 y S823</i>	54
<i>Tabla 10 Características del Aerogenerador</i>	55
<i>Tabla 11 Velocidades de Evaluación y Q_r de cada aerogenerador</i>	55
<i>Tabla 12 Velocidad de arranque para distintas velocidades de viento y RPM para torques resistivos</i>	59
<i>Tabla 13 Potencia generada para velocidades de 8 y 4 m/s</i>	61

Código de Programas

Dimensionamiento del alabe

Función Alabe.m Programa principal

```
%El script del alabe
%Definicion de Variabes de Entrada
%pow = potencia en [watts=J/s=(kg*m^2/s^2)/s]
%vel = velocidad del viento para el diseño [m/s]
%tsr = tip speed ratio [adimensional]
%num = numero de alabes [adimensional]
function [Rib,Rad,Chord,Twist]=alabe()
rho=1.225; %Densidad del aire [kg/m^3]
clc
clear all

% pow=input('ingresa la potencia que deseas en watts ');
% vel=input('cual es la velocidad de viento que deseas? ');
% ef1=input('Cual es la eficiencia de conversion de la aerodinamica ');
% ef2=input('Cual es la eficiencia de conversion de la mecanica ');
% ef3=input('Cues es la eficiencia de conversion de lo electrico ');

pow=1500;
vel=12.5;
ef1=0.6;
ef2=0.95;
ef3=0.95;
%Calculo del Area(A) [m^2] y Radio (R) [m]
[A,R]=sizeala(pow,vel,ef1,ef2,ef3);
R

%Calculco del TSR
% tsr=input('cual es el TSR que deseas? ');
tsr=5;
rpm=(tsr*30*vel)/(pi*R)

%Obtencion de los mejores coeficientes de Arrastre y Sustentacion
%Desarrollar un programa que haga esto...
%CL=input('ingresa el valor del Coeficiente de Sustentacion ');
%CD=input('ingresa el valor del Coeficiente de Arrastre ');

%Valores para S823
% alpha=7;
% CL = 1.13;
% CD = 0.142;

% %Valores para S822
alpha = 5;
CL = 0.817;
```

```

CD = 0.0081;

%Calculo de la cuerda promedio [metros]
z=input('ingresa el numero de alabes ');
%z=3;
[cprm]=cuerdaprom(R,CL,z);

%Calculo de la solidez [porcentual] y area del alabe (Ala) [m^2]
[omega,Aalb,Aind]=solidez(z,R,cprm,A);

%Parametrizacion del alabe
cv=input('define el numero de costillas que desees '); %Vol. Control
%cv=12
dr=(R-0.01)/(cv-1); %Distancia entre posiciones
r=0.01:dr:R; %Creacion de las posiciones de las costillas

%Calculo de la velocidades del alabe
[u,c,sr]=velocidades_alabe(r,rpm,vel,tsr);

%Calculo de los Angulos de Diseño
[theta,beta,cuerda]=angulos_alabe(sr,tsr,R,r,alpha,z,CL);
theta
beta
r
c

end

```

Subfunción sizeala.m de Alabe.m Programa principal

```

function [A,R]=sizeala(pow,vel,ef1,ef2,ef3)
%[Rib,Rad,Chord,Twist]=alabe(pow,vel,tsr,num)
rho=1.225; %Densidad del aire [kg/m^3]
%Considerando las perdidas de eficiencia
pow1=pow/ef1;
pow2=pow1/ef2;
powf=pow2/ef3;
A=(2*powf)/(rho*vel^3); %Area de Barrido Total
R=sqrt(A/pi); %Radio
fprintf('El area es %1.2f y el radio es de %1.2f \n',A,R)
end

```

Subfunción sizeala.m de Alabe.m Programa principal

```

function [cprm]=cuerdaprom(R,CL,z)
%SP - crear programa para encontrarlo
SP=0.16;
cprm=(R*SP)/(CL*z); %Tamaño de cuerda promedio [m]
end

```

Subfunción solidez.m de Alabe.m Programa principal

```

function [omega,Aalb,Aind]=solidez(z,R,cprm,A)
omega=(z*cprm)/(pi*R);
Aalb=omega*A;
Aind=Aalb/z;
end

```

Subfunción velocidades_alabe.m de Alabe.m Programa principal

```

function [u,c,sr]=velocidades_alabe(r,rpm,vel,tsr)
% Definicion de Variables
% u - Velocidad que genera el alabe al girar
% c - Velocidad que se genera sobre el alabe
u=pi*r*rpm/30;
c=sqrt(u.^2+vel);
sr=tsr*r./max(r)
end

```

Subfunción angulos_alabe.m de Alabe.m Programa principal

```

function [theta,beta,cuerda]=angulos_alabe(sr,tsr,R,r,alpha,z,CL)
theta=(2/3)*atand(1./sr);
beta=theta-alpha;
cuerda=(2*pi*R*8)./(z*9*CL*tsr^2*(r./R))
end

```

Fuerzas en el alabe

Función Fuerzas_Alabe_Final.m Programa principal

```
%Calculo de fuerzas sobre el alabe

clc
clear all

%Perfil S823
alpha=7;
CL = 1.13;
CD = 0.142;

%Perfil S822
%alpha = 5;
%CL = 0.817;
%CD = 0.0081;

R = 0.8585; %R = Largo del Alabe
Z = 3 %Numero de Alabes
div = 12; %Divisiones del alabe
TSR = 5 %Tip Speed Ratio
Rov = 1.225 %Densidad del Fluido (Aire)
rpm = 695.1812 %Revoluciones por minuto a las que esta funcionando el alabe

r = [0.01,0.0871,0.1643,0.214,0.3186,0.3957,0.4728,.055,0.6271,...
    0.7042,0.7814,.8585] %Posiciones de los perfiles a lo largo del alabe
%Angulo Pitch en grados
beta = [49.8925,29.4045,17.4962,10.9546,7.0381,5.8661,4.6942,3.381,...
    2.3779,1.5861,0.9469,0.4201]

Tta=beta+alpha

%Velocidades a lo largo del alabe cuando es S822
C = [3.6097,7.2623,12.4709,17.9270,23.4585,29.0223,34.6029,40.1933,...
    45.7898,51.3905,56.9941,62.599]

%Datos de la Cuerda
L = [0.1027,0.1509,0.1509,0.1027,0.0778,0.0626,0.0624,0.0623,...
    0.0547,0.0487,0.0439,0.0399]

%Calculo de fuerza de arrastre a lo largo del alabe

n=length(L);
i=1;
j=1;
%Calculando Lfza para dS
while i<n
    Lfza(i)=(abs(L(i)+L(i+1)))/2;
    i=i+1;
end
Lfza(i)=(abs(L(n)+Lfza(i-1)))/2;
```

```

%Calculando rfza
k=1
while k<n
    rfza(k)=(abs(r(k)+r(k+1)))/2;
    k=k+1;
end
rfza(k)=(abs(R+rfza(k-1)))/2;

%Calculando dr para dS
while j<n
    dr(j)=abs(r(j)-r(j+1));
    j=j+1;
end
dr(j)=abs(R-r(j));

%Calculando el area dS
dS=Lfza.*dr;

%Calculo de las fuerzas de sust y de arrastre por seccion de perfil
%Fuerza de Sustentacion por seccion del alabe
dFL=CL*(1/2)*Rov.*C.^2.*Lfza.*dr

%Fuerza de Arrastre por seccion del alabe
dFD=CD*(1/2)*Rov.*C.^2.*Lfza.*dr

%Fuerza Normal al Plano de Rotacion (Fuerza Axial)
dFN=dFL.*cosd(Tta)+dFD.*sind(Tta)

%Fuerza Torque al plano de Rotacion) (Fuerza Par)
dFT=dFL.*sind(Tta)-dFD.*cosd(Tta)

%Torque Total con separacion de r (Par Motor)
dQ=Z.*rfza.*dFT

%Calculando la Velocidad Angular a 500 RPM
Vang=(rpm/60)*2*pi

%Calculando la potencia entregada al eje
Peje=dQ.*Vang

Peje_t = sum(Peje)
Faxi_y = sum(dFN)

%%Esto ya es un agregado final!!! no cuenta dentro del programa principal
%Alabe Combinado de ambos sistemas

dFNf = [0.0574,0.374,0.6526,2.0789,2.0627,2.8173,15.4116,26.8061,...
    4.153,4.698,5.2283,0]

dFTf = [0.0678,0.2094,0.2037,0.3963,0.2487,0.2814,2.4758,3.6782,0.4959,...
    0.4953,0.4923,0]

%Torque Total con separacion de r (Par Motor)
dQf = Z.*rfza.*dFTf

```

```
%Calculando la Velocidad Angular a 500 RPM
Vang = (rpm/60)*2*pi

%Calculando la potencia entregada al eje
Pejef = dQf.*Vang

Peje_tf = sum(Peje)
Faxi_yf = sum(dFN)
```

Calculo del arranque en el aerogenerador

Función arranque_calc2.m Programa principal

```
function arranque_calc2(Numb, U_start, rho_blade, lambda_start,Qr)
% Sirve para encontrar el tiempo de arranque de un rotor usando
% el metodo de Runge-Kutta con la funcion ode45

%Numb - Numero de alabes
%U_start - Velocidad del viento de arranque (m/s)
%r_total - longitud total del alabe (m)
%rho_alabe - densidad del alabe (kgm^(-3))
%lambda_start - TSR de diseño
%in = load('rad_ch_tw.dat'); % lee los datos de un alabe en radio, cuerda y
%calaje
in = load('prueba12.dat');

%Lectura de datos
rad=in(:,1); % Radio para los elemetos del alabe
rad(1) = []; % Remueve el primer valor de la columna (es texto)
chord=in(:,2); % Cuerda de los elementos del alabe
r_tip= chord(1); % Longitud total del alabe
chord(1) = [];
twist=in(:,3); % Calaje del alabe
twist(1) = [];
delr=rad(2)-rad(1); % Determina el ancho del alabe
%Qr=0.5; %Torque Resistivo para el arranque

% determina constantes c1 y c2 para derivada de lamda con respecto al tiempo
% d(lambda)/dt
c1 = (1.2*Numb*U_start^2*r_tip^3*delr) - Qr;
% Calcudo de momento de inercia J
Area = 0.1219; % Area del perfil seleccionado, este es un valor de prueba
A2 = Area^2;
J0 = sum(chord.^2);
J1 = sum((chord.*rad).^2);
J2 = sum((cosd(twist).^2) .* (chord.^4)) + ...
    A2*sum((sind(twist).^2) .* (chord.^4));
% Convert to dimensioned inertia
J = Numb*delr*rho_blade*Area*r_tip^5*(J1 + J2/12);
c2 = r_tip/(J*U_start);
tmax=150; %tiempo maximo para finalizar
[t, lambda]=ode45(@(t, lambda) deriv( t, lambda,c1, c2,chord,...
    twist, rad),[0 tmax],0.0);

istart=find(lambda>lambda_start,1);

time_to_startRK=t(istart-1)+(t(istart)-t(istart-1))*(lambda_start-...
    lambda(istart-1))/(lambda(istart)-lambda(istart-1));
fprintf(' Time to start from RK = %5.3f seconds\n', time_to_startRK)

%Agregado alCodigo para Plot de las Imagenes
figure(1)
plam = plot(t,lambda,'--','linewidth',2,'color',[1 0 .5]);
title('Starting time TSR')
```

```

ylabel('Lambda [TSR]')
xlabel('Time [S]')
%text(time_to_startRK,lambda_start,'\leftarrow Posicion Nominal
U0=4','horizontalalignment','left')
grid on
hold on
%RPM=((lambda)/r_tip)*(30/pi); %[Revoluciones por Minuto]
RPM = (30/pi)*((lambda*U_start)/r_tip);
figure(2)
prpm = plot(t,RPM,'--','linewidth',2,'color',[1 0 .5]);
%prpm = plot(t,RPM,'--r','linewidth',2,'color',[0 1 0]);
title('Starting Time on RPM')
ylabel('RPM')
xlabel('Time [S]')
RPM_start = ((lambda_start*U_start)/r_tip)*(30/pi)
grid on
hold on

end %start_calc

%encontrando la derivada de lamda (TSR) con respecto al tiempo

function dlamdt = deriv(t, lambda, c1,c2,chord, twist, rad)
lamr = lambda.*rad;
lamr2=lamr.*lamr;
tmp = sqrt(1 + lamr2).*sind(twist).*(cosd(twist) - lamr.*sind(twist)).*...
      chord.*rad;
dlamdt=c1*c2*sum(tmp);
end % deriv

```

Función velocidades de tiempo de arranque Vs Velocidad de Viento Programa principal

```

%Grafica de Tiempo de arranque Vs Velocidad de Viento
in = load('v_ts.in'); %Velocidades de aerogenerador con #1
in2 = load('v_ts_qr.in'); %Velocidades de aerogenerador #2

v = in(:,1);
ts = in(:,2);
vq = in2(:,1);
tsq = in2(:,2);

% figure(1)
pts = plot(v,ts,'b--x',vq,tsq,'r--+')
set(pts,'linewidth',2)
grid on

```

Función de lectura de parámetros de un alabe Programa principal

en angulo de ataque, coeficiente de sustentación y coeficiente de arrastre

```

function Lectura_alabe
global num_Re num_aoa Re_array aoa_array Cl_array Cd_array

% Funcion para leer los coeficientes de sustentacion y arrastre de
% de un perfil alar cuando la informacion esta disponible en un
% archivo de texto, el arreglo debe ser como sigue:

```

```

% aoa Cl Cd para su reynold.

% num_Re    valores de reynolds en el archivo de datos
% num_alpha valor del angulo de ataque para cada reynold
% Re_array  matriz cada arreglo de reynolds
% Re_log    valor de reynolds
% alpha_array  matriz de los angulos de ataque
% Cl_array, Cd_array  matrices de los valores de sustentacion y arrastre

num_Re = 4; %Cantidad de Reynolds disponibles
num_aoa = [19 19 19 19]; %varia segun la informacion dada
max_num_aoa=max(num_aoa);
Re_array = [25000 50000 75000 100000]; %Reynolds disponibles
in = load('alabe_evaluar.in'); % archivo externo que se manda llamar

aoa_in=in(:,1);% Angulo de ataque - primer columna
Cl_in=in(:,2); % Coef. de Sustentacion - segunda columna
Cd_in=in(:,3); % Coef. de Arrastre - Tercerl columna
k=1;
aoa_array=zeros(num_Re, max_num_aoa);
Cl_array=zeros(num_Re, max_num_aoa);
Cd_array=zeros(num_Re, max_num_aoa);
for i = 1: num_Re
    for j = 1: num_aoa(i)
        aoa_array(i, j) = aoa_in(k);
        Cl_array(i, j) = Cl_in(k);
        Cd_array(i, j) = Cd_in(k);
        k = k+1;
    end
end
aoa_array
Cl_array
Cd_array
return
end

```

Diagramas de Flujo

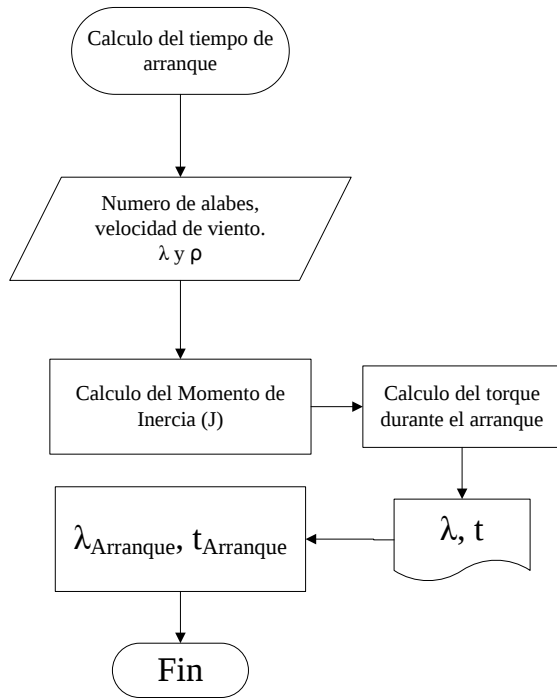


Figura 38 Diagrama de flujo para cálculo del tiempo de arranque

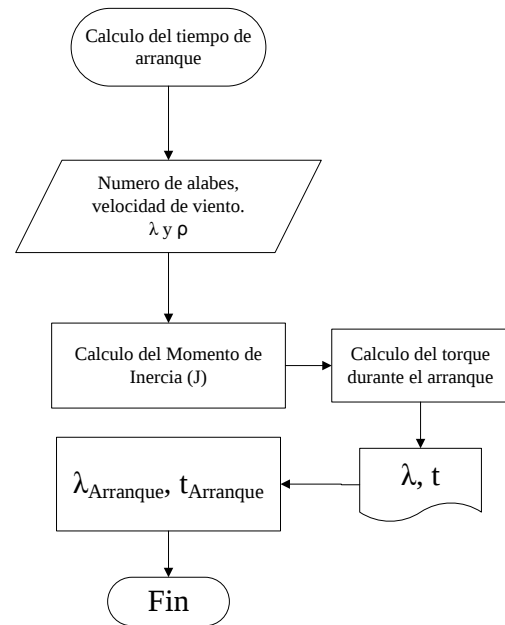


Figura 39 Diagrama de flujo para cálculo del tiempo de arranque

Comparative Assessment of a Horizontal Small Wind Turbine with Ball and Magnetic Bearings on the Starting

Pedro Rosales^{*,a}, Jesus Cerezo^a, Gisela Montero^a, Alejandro Lambert^b

^aInstituto de Ingenieria, Universidad Autonoma de Baja California, Blvd. Benito Juarez y calle de la Normal S/N, Col. Insurgentes Este, 21280, Mexicali Baja California, Mexico.

^bFacultad de Ingenieria, Universidad Autonoma de Baja California, Blvd. Benito Juarez y calle de la Normal S/N, Col. Insurgentes Este, 21280, Mexicali Baja California, Mexico.
prosales@uabc.edu.mx

This article describes a mathematical model of a horizontal wind turbine of 500 W with a NACA 2418 airfoil type during the start-up condition for two proposed systems. The first one considers a wind turbine system where the friction moment is given by ball bearings. The second one proposes the replacement of the ball bearings by magnetic bearings called maglev wind turbine. The latter is a technology based on electromagnetic field to levitate a shaft. The magnetic bearing has the features of non-mechanical contact, non-mechanical friction, minimizing the damping in the wind turbine. The results under a wind speed of 8 m/s show that there is an increase in power by 7.2 % generated by a wind turbine with magnetic bearings, besides under a condition of 4 m/s the start-run time is 8.96 s quicker for the maglev wind turbine. Finally, it also confirms that the maglev wind turbine can operate with a speed similar at 3 m/s.

1. Introduction

The use of wind energy as a renewable source of energy for electricity production has been increasing over the past 20 years. This has created huge machines and forced investors to look for areas with high wind availability, commonly found in remote areas, far away from the consumer. This also causes high investments in construction machinery. The study of low-capacity wind turbines had been scarce, but in recent years, the development of new designs of low capacity, allowed to settle in metropolitan areas, which has increased their commercial demand. This is due to the concept of distributed generation, which represents a low installation cost of this equipment for rural zones, and it has a potential usage in urban homes in Mexico by the concept of grid interfacing.

The use of magnetic bearings (MB) has been increasing over the past five years, (Schweitzer, 2009 and Chiba, 2005) because the efficiency has increased, due to the magnetism applied in different machines such as trains and air conditioned machines. The McQuay Company presents a MagLev Chiller with a 30 % efficiency greater compared capacity machines without maglev technology. Sanza Kazadi et al. (2008) mentioned that the development of magnetic bearings has sought to increase the efficiency of the machines, reducing problems of vibration, noise, friction and maintenance. Even though, the magnetic bearing has been researched for 25 y, it can be considered recent, and there are many applications that are not studied yet. For example, currently in the literature of wind turbines are no more than two years old, publications regarding maglev wind turbines. Kumbennuss et al. (2012) describes a vertical axis wind turbine with magnetic bearing. So far, all revised paper are about developed or proposed levitation systems in the last 2 y. Projects have proven to be feasible, but there is still a need to compare the typical systems with the magnetic ones. The use of magnetic bearings could help to increase the performance of the wind turbines at low wind speed. Then, the wind turbines could be used in the cities, where the wind speed is low. This paper compares the theoretical performance of a wind turbine with ball bearings to one with magnetic bearings.

Please cite this article as: Rosales P., Cerezo J., Montero G., Lambert A., 2013, Comparative assessment of a horizontal small wind turbine with ball and magnetic bearings on the starting, Chemical Engineering Transactions, 34, 55-60 DOI:10.3303/CET1334010

2. Wind turbine system description

The comparative study between the ball bearing and magnetic ones takes into account three subsystems (see Figure 1). The first is the aerodynamic subsystem on the blade; the second one is the mechanical, and the last one is the electrical. For the blade aerodynamic a previously established methodology to blade design (see Figure 2) was used, which is described in detail by Rosales and Cerezo (2010). The features for the design are a wind turbine of 500 W (P_{wt}) with a TSR (λ) of 8 for an airfoil NACA 2418. The main data obtained from these parameters of design is the radius (r), that is it divided in 15 ribs, the pitch angle (Θ_p) and a total radius (R). As important mechanical considerations were taken into account a friction bearing (M_r) ETN9 SKF-6207, which can be used on the wind turbine shaft. Also the force called cogging (F_{cog}) was considered, this force is created by a permanent magnet generator (PMG), the sum of the latter two (M_r , F_{cog}) will be known as resistive torque (Q_r). Effects like the weight of the generator (PMG), and the shaft seals are not considered in the model.

2.1 Blade aerodynamic

For the starting time of the wind turbine it was considered the methodology proposed by Ebert and Wood in 1997. The input variables of the solution algorithm are the data entry of the blade geometry, density (ρ) of blades, wind speed (U), desired nominal operating λ , number of blades and polar graphs where the desired profile shows the angle of attack (α) and lift and drag coefficients, resistive torque (Q_r) that is the turbine torque necessary to start spinning that is generated by the cogging of the permanent magnet generator, and the ball bearing friction.

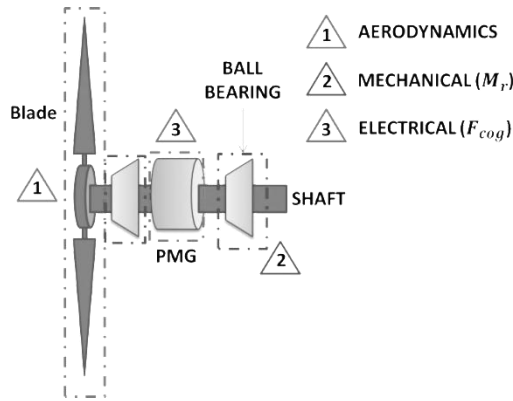


Figure 1: Schematic configuration of a wind turbine

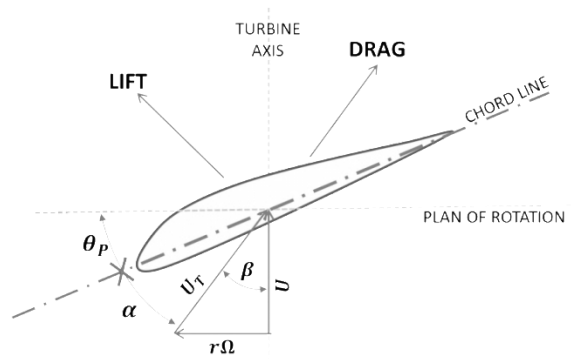


Figure 2: Blade element, velocities and forces

The parameters of study to calculate the power for the wind turbine are the number of blades that are 3, the density of blade with 550 kg/m^3 , a cogging with 0.5 Nm , the mechanical friction 0.8 Nm , the sum of cogging and mechanical friction offer the total starting torque (Q_r), that is 1.3 Nm , the inertia moment of the blade is 1.6 Nm , the profile used for the blade of the wind turbine is the NACA 2418.

Equation 1 was used for calculating the moment of inertia (J) of the blades, where N is the number of blades, ρ_b is the air density, A is the area of the surface of the blade, R is the total radius of the blade, c is the length of the chord per section divided in r , and Θ_p is the pitch angle.

Equation 2 was used for calculation of revolution per minute (RPM) from its angular velocity (Ω), and the Equation 3 was used to calculate the power (P) transmitted to the shaft from the blades. In this case T is the torque over the shaft.

$$J = N\rho_b AR^5 \left[\int (cr)^2 dr + \frac{A}{12} \left(\int c^4 \cos^2 \theta_p dr + A^2 \int c^4 \sin^2 \theta_p dr \right) \right] \quad (1)$$

$$\Omega = RPM \left(\frac{\pi}{30} \right) \quad (2)$$

$$P = \Omega T \quad (3)$$

2.2 Wind turbine starting time

In this paper *starting* means the time period beginning when the blades are stationary and finishing when the wind turbine reach their λ of design.

To calculate the starting time of the wind turbine, it is necessary to calculate the λ_r of design. Also, a wind speed (U) should be supposed. From Equation 4 can be noticed that there is an inverse relationship between variables.

$$\frac{U}{\Omega r} = \frac{1}{\lambda_r} \quad (4)$$

The wind speed (U) on a blade element (U_T) is calculated from the following expression:

$$U_T = \sqrt{U^2 + (r\Omega)^2} = U\sqrt{1 + \lambda_r^2} \quad (5)$$

In a wind turbine without pitch control to adjust the angle of attack (α), it is necessary to calculate an angle of attack on every (U_T), dependent of time is given by the next correlation:

$$k_\alpha = \frac{|\dot{\alpha}|}{2U_T} \quad (6)$$

Where:

$$\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt} \quad (7)$$

Besides, the Equation 8 is used to calculate $\dot{\alpha}$ over the blade, when the Ω is accelerating ($\dot{\Omega}$):

$$\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{-rU}{r^2\Omega^2 + U^2} \frac{d\Omega}{dt} \quad (8)$$

On the other hand, to estimate the initial torque to spin the blades, the next equation is used:

$$T = J\dot{\Omega} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (9)$$

This expression has the disadvantage that is used only on horizontal wind turbines and when there is not a dragging force on the blade. The main contribution to the torque is the lift force. This effect could be noticed in Equation 10 when in a time equal to zero the λ_r is also zero, because the C_d could be eliminated and only the C_l exists in a first instant.

The coefficient of torque is obtained from Equation 10, requiring the blade and wind features, like wind velocity (U), wind density (ρ), and radius on the tip of the blade (R). Also this could be calculated from the speed ratio (λ_r) in each section of the blade with their own lift and drag coefficients.

$$C_q = \frac{2T}{\rho U^2 \pi R^3} = \frac{N}{\pi} \int_{r_h}^1 [1 + \lambda_r^2]^{1/2} [c_l - \lambda_r c_d] c_r dr \quad (10)$$

Equation 10 is solved when the wind turbine reaches the tip speed ratio, the system has already started, this means that λ is equal to λ_r . To know how the ball bearing affect the starting of the wind turbine, the Equation 11 is used, this describes how the speed ratio is affected by a resistive torque (Q_r) that decreases the starting.

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{R(Q - Q_r)}{JU} \quad (11)$$

2.3 Magnetic bearing

This technology consists of a set of electromagnet able to levitate the rotor for the wind turbine at a certain distance from a surface. This system commonly uses the configuration showed on Figure 3 applied for a wind turbine. This magnetic bearing system (MBS) consist of two radial MB, one axial MB, a gap sensor and a controller, which receives the position of the shaft and adjusts the magnetic force on the MB to readjust the shaft location.

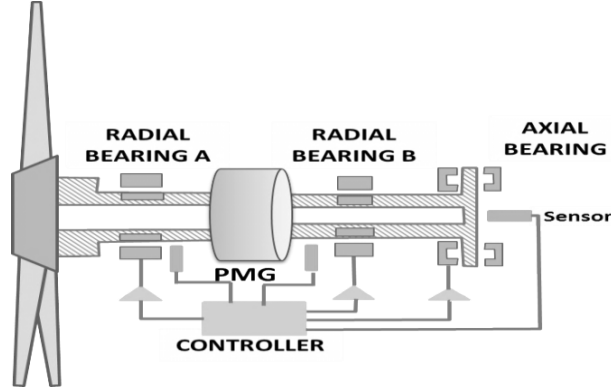


Figure 3: Schematic configuration of a horizontal magnetic bearing system

2.4 Friction on starting

To determine the contribution to the resistive torque of the mechanical bearing SKF-6207 ETN9 (see Figure 1), the expression 12 is used. The resistive force (M_r) is the necessary torque to roll a bearing, and it is calculated as follows:

$$M_r = M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag} \quad (12)$$

Where M_{rr} , M_{sl} , M_{seal} and M_{drag} are the rolling, sliding, seals and drag friction, respectively.

The rolling friction is the resistance generated by the bearing roll and it is calculated with:

$$M_{rr} = G_{rr} (vn)^{0.6} \quad (13)$$

Where G_{rr} is a constant that depends on the kind of bearing, average diameter of bearing, axial and radial load, cinematic viscosity (v), and n is the spin velocity.

The sliding friction is calculated from Equation 14, where μ_{sl} is the friction coefficient dependent of the lubrication used, and the G_{sl} that depends on the kind of bearing, average diameter of bearing, axial and radial load.

$$M_{sl} = \mu_{sl} G_{sl} \quad (14)$$

Seal Friction is calculated with the following expression:

$$M_{seal} = K_{s1} d_s^\beta + K_{s2} \quad (15)$$

K_{s1} is a second constant that depends on the kind of bearing, K_{s2} is a second constant that depends on the kind of seal, d_s is the diameter of contact between the seal and the surface, β is an exponential number determined by the kind of bearing and seal.

Drag friction is calculated by the friction offered by a fluid, the kind of lubricant and bearing, in this case a ball bearing. The variables that are involved on drag friction are the level of lubricating (V_m), a constant related with the bearing (K_{ball}), the average diameter (d_m) and the spin speed (n). Drag friction is showed in the following expression:

$$M_{drag} = V_m K_{ball} d_m^5 n^2 \quad (16)$$

3. Results

The Figure 4 shows the model for the starting time and its analytical result to achieve a given wind turbine λ in a determined time. In all cases, the λ design is 8, so it is considered that the starting time is when the wind turbine reaches that value. The simulation compares 3 different wind speeds (4, 6 and 8 m/s) with 2

different Q_r , one for the maglev wind turbine with 0.5 Nm and the ball bearing wind turbine with 1.3 Nm, for each speed. The difference on starting time for a wind velocity of 4 m/s, is 8.96 s for the difference between a $Q_r = 0.5$ and $Q_r = 1.3$ Nm, and 0.84 s for a wind velocity of 8 m/s as is shown in Table 1. Figure 5 is the result of the RPM acquired for both wind turbines. According to the analytical results with magnetic bearings, the time for reaching the design RPM is less in the maglev wind turbine than in the ball bearing wind turbine. In Figure 5 it is important to notice that at 8 m/s the RPM are stable at 950 RPM, this happens because the model considers only the lift force during this time period, and the drag force is not considered. Results are listed in Table 1. In the table, RPM are revolution per minute; Resistive Torque is 0.5 Nm for maglev wind turbine and 1.3 Nm for ball bearing wind turbine, the time difference is always better for the maglev wind turbine.

Table 1: Starting time for different wind velocity and RPM for resistive torques

Wind velocity (m/s)	RPM	Resistive Torque (Q_r)		Time Difference (s)
		0.5 Nm	1.3 Nm	
8.00	507.51	23.92 s	24.76 s	0.84
6.00	380.63	32.42 s	34.35 s	1.93
4.00	253.75	51.06 s	60.02 s	8.96

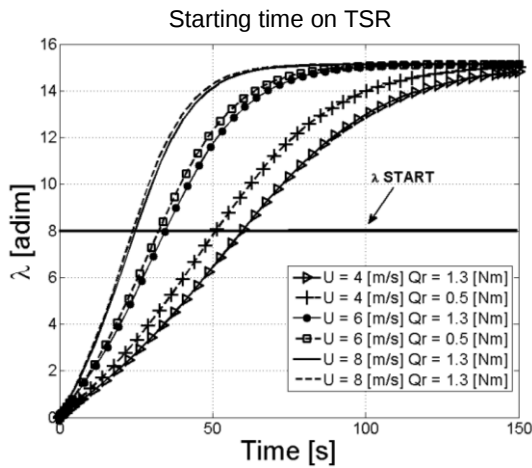


Figure 4: Starting time from different wind speed

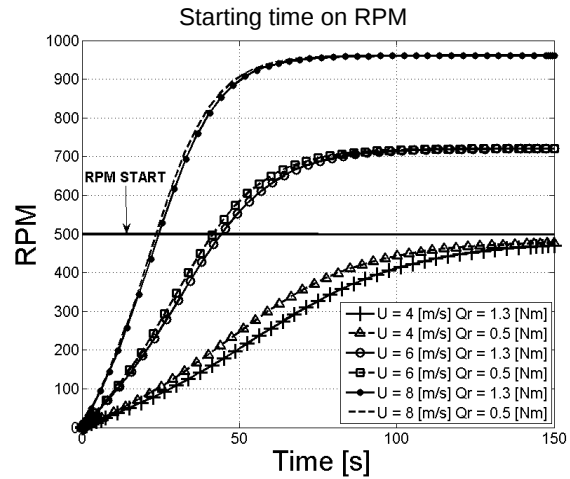


Figure 5: Starting time from different wind speed for a 500 W wind turbine

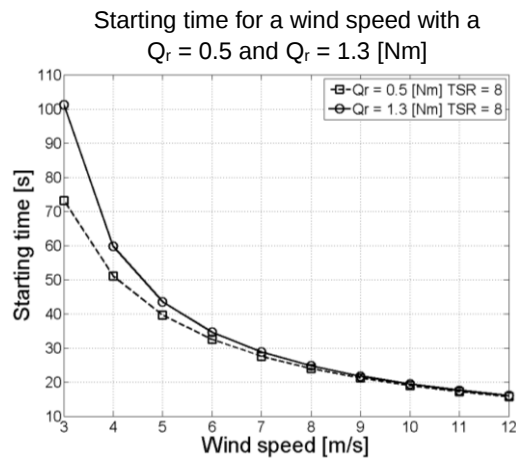


Figure 6: Starting time to different wind velocities

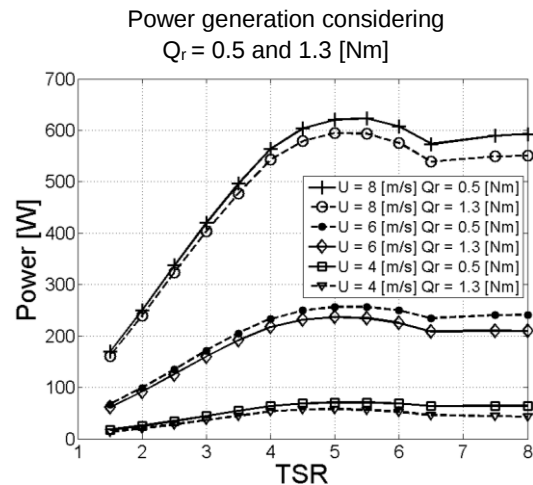


Figure 7: Power generation at different λ

Figure 6, is the analytical result of different starting times, where different conditions of constant wind was simulated. The minimum starting speed is ascertained at a wind velocity of 3 m/s for both wind turbines. Moreover, according to the analytical results, speeds below 6 m/s has a time difference greater than 3 s., until we have a difference of up to 8.96 s at 4 m/s to boot, which is important for urban zones where the wind resource viability is limited.

Figure 7 depicts that as λ increases, there is a power difference generated by the traditional wind turbine (ball bearing) and the maglev turbine (magnetic bearing), where the maglev generates 592.8 W, and the typical turbine 550.3 W with a velocity of 8 m/s. At a velocity of 4 m/s the wind turbine with magnetic bearing gives 63.94 W and the wind turbine with ball bearing indicates 42.68 W. Excess power that starts at a λ of 5 is due to the same aerodynamics of the blade that will be accelerating to present different angles of attack, so different coefficients of lift (C_l) and drag (C_d). On the other hand, in a λ of 6.5 for all cases is assumed that a phenomenon called "stall" is presented, where the lift and drag coefficients show a decrease in power and torque due to acceleration of the blade itself.

4. Conclusion

It was compared and analysed two systems where the first is a wind turbine with ball bearings that provides a resistive torque (Q_r) of 1.3 Nm and the second with magnetic bearings considering that $Q_r = 0.5$ Nm.

1. For wind speeds of 8 m/s, with a λ of 8 the difference of seconds in starting time for both systems is 0.84 s, which is a non-significant time. However, the power generated by the wind turbine with magnetic bearing is 592.8 W, when with a ball bearing is 550.3 W, which means the efficiency increases to 7.2 % by adding the magnetic bearings.
2. For wind speeds of 4 m/s, with a λ of 8 the difference in starting time for both systems is 8.96 s, which becomes a significant time, if we consider the intervals of time that take gusts of wind. Unlike the time, the power generated for ball bearing is 42.68 W and the magnetic bearing is 63.94 W which gives an efficiency of 33.2 %.
3. Several wind speed conditions were analysed. In all three cases, the wind turbine with magnetic bearing reached first the design λ than ball bearings. This was due to the decrease in the resistive torque. The time for starting was 23.92, 32.42 and 51.06 s for 8, 6 and 4 m/s with magnetic bearing.
4. The stall effect indicates that the blade design could be improved, changing the angle of attack or the design TSR, or adding a pitch control to the wind turbine.

References

- Schweitzer, G., Maslen, E. 2009, Magnetic Bearings, theory, design and application to rotating machinery, Ed. Springer, Berlin, Germany.
- Chiba, A., Ichikawa, O., Oshima, M., Takemoto M., Dorrell, D.G., 2005, Magnetic bearings and bearingless drives, Ed. Newnes-Elsevier. London. UK.
- Sanza K., Chan-Hee K., Jung K.. 2008, The ϵ -axle and its application to a floating windmill, World congress on engineering and computer science IEEE, Alhambra, CA. 175-181.
- Kumbnuss J., Jian C., Wang J., 2012, A novel magnetic levitated bearing system for vertical axis wind turbines (VAWT), Applied Energy, 90(1), 148-153.
- Rosales, P., Cerezo J., 2010, Blade Design for a 1 kW Wind Turbine (In Spanish), 2do Congreso Nacional de Estudiantes de Posgrado del Instituto de Ingeniería, 22-26 November, Mexicali, México, 1-11, ISBN: 978-607-7753-33-9.
- Ebert P.R., Wood D., 1997. Observation of the starting behavior of a small horizontal-axis wind turbine, Renewable Energy, 12(3), 245-257.
- Wood, D., 2001, Small Wind Turbines, Analysis, Design and Application, Ed. Springer, London, UK.
- Wu H., Xiao Linjing, Wang Baoren, Li Guili, Li Peng., 2010, Digital platform design for magnetically suspended bearings equipped for wind turbine based on DSP28335+FPGA, Mechatronics and embedded systems and application (MESA), Ed. IEEE/ASME International Conference, 15-17 July, Qingdao, ShanDong, 283-287, DOI: 10.1109/MESA.2010.5552053.
- Kurita N., Ohshio K., Ishikawa T., 2010, Basic analysis and design of the permanent magnet hybrid type magnetic bearing for small-sized hydraulic generator, International Power Electronics Conference, 21-24 June, Sapporo, 1506-1511, DOI: 10.1109/IPEC.2010.5544514.



Datos Personales

Nombre **ROSALES ESCOBEDO PEDRO FRANCISCO**
Dirección Av. Republica de Perú, Río Culiacán y Río Mocorito #836 Fraccionamiento Sonora, Mexicali, Baja California C.P. 21210
Teléfonos Casa 1 (686) 565 22 15 Celular: (686) 196 03 60
E-mail prosales@uabc.edu.mx gaudi_q@hotmail.com
CURP **ROEP851030HBCSSD03**
CEDULA PROFESIONAL **5728223**
Lugar de Nacimiento Ensenada Baja California
Fecha de Nacimiento 30/10/1985
Estado Civil Soltero

Escolaridad

Período 2003-2007
Título Ingeniero Eléctrico
Escuela Universidad Autónoma de Baja California
Promedio de Calificaciones 83.35

Conferencias

Nombre Transitorios Electromagnéticos en Sistemas Eléctricos de Potencia
Fecha 15 de Junio de 2007
Lugar Mexicali Baja California

Nombre Modelos de la Calidad Comisión Federal de Electricidad
Fecha 08 de Junio de 2007
Lugar Mexicali, Baja California

Nombre Curso de Software de Iluminación LUXICON de Cooper Lighting
Fecha 22 de Agosto de 2008
Lugar Mexicali, Baja California

Nombre Congreso Nacional de Estudiantes de Posgrado del Instituto de Ingeniería, UABC
Fecha 25 a 27 de Noviembre de 2009
Lugar Mexicali, B.C.

Nombre Semana Nacional de Energía Solar 2010
 Fecha Octubre de 2010
 Lugar Guanajuato, Guanajuato

Nombre Modelo Endorreversible para Energía Eólica
 Fecha 7 de Diciembre de 2010
 Lugar Mexicali B.C.

Nombre Tendencias Tecnológicas y Aplicaciones de la Energía Eólica para la Generación Eléctrica
 Fecha Noviembre 2010
 Lugar Mexicali, Baja California

Nombre 7th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems
 Fecha Julio 1 - 7 2012
 Lugar Ohrid, Macedonia

Informática Manejo de paquetería:
 Office (Excel, Word, Power Point); Dibujo de planos (Autocad); Programas para resolución de modelos matemáticos (MatLab); programación de PLC (directsoft, trilogy, Easytouch); lenguajes de programación (C), simulación de sistemas eléctricos (ATP Draw), simulación de entornos de iluminación (Visual y Luxicon) y simulación de Ambiental enfocado al aprovechamiento de recursos renovables (TRNSYS).

Publicaciones Indizadas Título: Comparative Assessment of a Horizontal Small Wind Turbine with Ball and Magnetic Bearings on the Starting

Revista: Chemical Engineering Transactions

Autores: Rosales P. *, Cerezo J., Montero G., Lambert A.

Fecha de Publicación: Mayo, 2013

DOI: 10.3303/CE1334010; **ISBN:** 978-8-95608-25-9; **ISSN:** 1974-9791

Experiencia Profesional

Proyectos en los que ha colaborado como proyectista de instalaciones eléctricas:

Ampliación Hotel Lucerna (Zona de Suites)

Escuela de Artes Mexicali – UABC

Edificio de Maquinaria Elevación

P. de Media Tensión en Unidad de UABC “Valle Las Palmas” 1er Sección

Centro comunitario UABC Valle las Palmas

P. Goodrich incluidos estudios de Ferroresonancia

Casa habitación con sistemas de iluminación inteligente

Unidad deportiva n el Valle de Mxicali, Ej. Morelos

Estación de policía en el valle de Mexicali, km. 47

Tecnoparque con implementación LEED

SOLAR – Servicios de Ingeniería Eléctrica

Proyectos en que se ha participado

Almacén Carnicería Súper Chivas

Jardín de Niños “Claudia Izquierdo”

Clínica Dental en “San José del Cabo” B.C.S.

Iluminación Especial para Azotea del Inst. de Ingeniería UABC

Qualitech Nave Industrial

Casino Jackpot Pabellón Rosarito

Ashram California

7 Eleven

Tecno Parque C. – Edificio de oficinas TITANIUM

Planta de Procesos de Productos Alimenticios DIET ZONE S.A. de C.V. Merida, Yuc.

Taller Mecánico Lavado y Refacciones – Lorenzo Sánchez Salinas

TITANIUM – Tecno Parque C.

SCAENER – Sistemas de Control y Automatización en Energías Renovables

Planta Piloto Híbrida Solar-Eólica en Instituto de Ingeniería UABC

Universidad del Desarrollo Profesional

Junio-Julio 2010 y 2011

Profesor de la materia de Iluminación para la carrera de Lic. En Diseño y Decoración de Interiores

Universidad Autónoma de Baja California

Enero 2010 – A la Fecha

Cursos Impartidos: Teoría de Control II, Energía Eólica, Materiales Eléctricos

Laboratorios Impartidos: Maquinas Eléctricas, Circuitos I y II, Teoría de Control, Control de Motores.

Trabajo Actual

Tiempo Completo - Estudiante de Doctorado en Ingeniería, en el Instituto de Ingeniería Campus Mexicali enfocado al desarrollo de un aerogenerador de baja capacidad.

Profesor de asignatura - en la Universidad Autónoma de Baja California donde imparte laboratorios y cursos a los alumnos de la carrera de ingeniería eléctrica e ingeniería en energías renovables.

Asesorías profesionales en proyectos y obra eléctrica comercial, industrial, en baja, media y alta tensión.