



Herramienta computacional modular
a partir del modelo dinámico de un
aerogenerador de eje horizontal con
características mecánicas, eléctricas y
electrónicas

Kevin Felipe Martin Bohórquez

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogotá DC, Colombia

2022

Herramienta computacional modular a partir del modelo dinámico de un aerogenerador de eje horizontal con características mecánicas, eléctricas y electrónicas

Kevin Felipe Martin Bohórquez

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecatrónico

Director:

Ph.D. Andrés Leonardo Jutinico Alarcón

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogotá DC, Colombia
2022

Nota de Aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado 1

Firma del Jurado 2

Bogotá D.C. _____

“Dedicado a mis padres, quienes se merecen absolutamente todo, me animaron todos los días para poder cumplir con esto, también a mi hermana Emeth, de quién continúo aprendiendo cada día nuevas cosas.”

AGRADECIMIENTOS

Dios conoce los corazones y sabe cuánto agradecimiento hay en el mio, cada día renovó mis fuerzas y puso en mi la voluntad para seguir avanzando en este camino. Un agradecimiento enorme a mis padres Guillermo y Claudia, me brindaron todo lo necesario en este proceso, se llenaron de paciencia y mantuvieron un interes por mi estudio. A mis amigos, son pocos, pero ellos permanecieron pendientes de mi proceso, sobre todo en esta etapa final de proyecto de grado. A mi director de tesis, Ph.D. Andrés Leonardo Jutinico Alarcón, experto en muchas áreas, me brindo la guía y una ayuda enorme en este final de camino.

Resumen

En la actualidad la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, es un tema de interés nacional. No obstante, la generación de energía eólica a nivel residencial aún no ha sido promovida en nuestro país, a pesar de que ya existe reglamentación al respecto de la instalación y comercialización para pequeños generadores. Parte del problema, es la enseñanza a la comunidad sobre este tipo de sistemas de generación. La cual debería soportarse en herramientas computacionales que faciliten el entendimiento de estas tecnologías. Comercialmente, existen algunas aplicaciones software que exploran estas tecnologías [1][2][3]. Sin embargo, el software que se encuentra en la web para el análisis y la enseñanza de sistemas de generación eólica usualmente es pago o está desarrollado para niveles superiores a los de pregrado en Ingeniería Mecatrónica. Por lo tanto, en este trabajo integral de grado se presenta una herramienta software, conformada de una interfaz de datos y la simulación de un aerogenerador de eje horizontal, el cual ha sido modelado mediante herramientas computacionales que consideran característica mecánicas, eléctricas y electrónicas. El documento presenta las distintas configuraciones que puede llegar a tener un aerogenerador. Mostrando la información clave para elaborar la herramienta computacional. También se incluye la modelización geométrica de cada pieza, haciendo uso del software Solidworks, en el cual se utilizó el modo ensamblaje para acoplar todas las piezas en una sola figura 3D, y así obtener los parámetros físicos de las diferentes piezas. Con los parámetros del sistema se obtuvo el modelo matemático del aerogenerador de eje horizontal, haciendo uso de las fórmulas de Euler Lagrange. Un total de dos ecuaciones fueron realizadas para tal sistema y posteriormente se construyó un diagrama de bloques en Simulink para validar de forma numérica su comportamiento. Después de la construcción del sistema “Aerogenerador” en Simulink se desarrolló, la interfaz gráfica en Matlab. Finalmente, se realiza la validación de la herramienta.

Palabras clave: Aerogenerador, Energías renovables, Herramienta modular, Geometría, Generador síncrono

Abstract

Nowadays the power generation from renewable sources, is a national interest topic. Nevertheless, the wind power generation at a residential level has not been promoted in our country yet, even though regulation of installation and commercialization for small generators already exist. Part of the problem, is teaching to the community about this generation system, which should be supported with computational tools that facilitate understanding of these technologies. Commercially, there are some software applications that explore these technologies [1][2][3]. Nevertheless, the software that is in web pages for analysis and teaching of wind power generation systems usually has a license or is developed for a higher level than a Mechatronic program. Therefore, a software tool is presented in this TIG, which is composed of a graphical interface and a simulation of a horizontal axis generator, which has been modeled using computational tools that consider mechanical, electrical and electronic characteristics.

The paper presents different configurations that an aerogenerator can have. Showing key information to make the computational tool.

Also the geometric modeling of each piece is included, using Solidworks software, in which assembly mode was used to couple all pieces in a 3D figure, and so get the physical parameters of each piece.

With the system parameters the mathematic model of horizontal axis generator was obtained, using Euler Lagrange equations. Two equations in total were realized to describe the system and later a block diagram was built in Simulink to validate its behaviour numerically.

After “aerogenerator” system construction in Simulink, the graphical interface was made. Finally, the tool validation was realized.

Keywords: Aerogenerator, Renewable energies, Modular tool, Geometry,
Synchronous generator

Índice general

AGRADECIMIENTOS	II
Resumen	IV
Abstract	VI
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación	5
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
2. Marco Teórico	7
2.1. Clases y tecnologías de los aerogeneradores	7
2.1.1. Aerogenerador de eje vertical	7
2.1.2. Aerogenerador vortex	9
2.1.3. Aerogenerador de eje horizontal	10
2.2. Configuraciones de un aerogenerador de eje horizontal	12
2.3. Partes principales del aerogenerador	14
3. Metodología	16
3.1. Etapa de modelizado	16
3.2. Etapa de modelo matemático	16
3.3. Etapa del diseño de interfaz	17
3.4. Etapa de resultados y análisis	18
4. Modelizado de la estructura electro-mecánica del aerogenerador	19
4.1. Geometría seleccionada	19
4.2. Módulo mecánico	20
4.3. Módulo eléctrico	21
4.4. Modelizado de piezas	24
5. Obtención del modelo matemático	32
5.1. Datos importantes de las piezas mecánicas	34
5.2. Datos importantes del circuito eléctrico monofásico	35
5.3. Cálculos mediante las ecuaciones de Euler-Lagrange	37

5.4.	Ecuación en coordenada \dot{q}	40
5.5.	Ecuación en coordenada $\dot{\theta}_g$	41
5.6.	Matriz de funciones de transferencia	42
5.7.	Potencia y torque de entrada	44
5.7.1.	Torque de entrada	45
5.8.	Diagrama de bloques en Simulink	47
5.8.1.	Torque estimado y control de torque	50
5.8.2.	Bloque de factor de potencia	53
6.	Interfaz gráfica de usuario y resultados	55
6.1.	Programación de los elementos de guide	57
6.2.	Resultados	62
7.	Conclusiones y recomendaciones	69
7.1.	Conclusiones	69
7.2.	Recomendaciones	70
	Referencias	71

Índice de tablas

1.1. Porcentaje de energía renovable extraída de diferentes medios (Solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica) y sus valores desde el año 2001.	3
1.2. Inversión en capacidad de energía renovable por los 30 países o territorios principales en 2019 y crecimiento en 2018	4
4.1. Variables y parámetros del aerogenerador	20
4.2. Características del alternador 145STK6M.	29
5.1. Características de las piezas mecánicas.	34

Índice de figuras

1.1. Molino de viento	2
2.1. Diseños de aerogeneradores de eje vertical.	8
2.2. Aerogenerador vortex.	9
2.3. Aerogenerador de eje horizontal.	11
2.4. Tecnologías y configuraciones de tren de transmisión	13
2.5. Par de polos magnéticos en el rotor	14
2.6. Imanes permanentes y polos	15
4.1. Esquemático del aerogenerador	20
4.2. Circuito eléctrico monofásico equivalente del PMG.	21
4.3. Aspa del aerogenerador (Airfoil).	25
4.4. Eje principal (Main shaft).	25
4.5. Cojinete (Bearing).	26
4.6. Tren epicicloidal de engranajes (Gearbox).	27
4.7. Rotor con 12 polos.	28
4.8. Geometría del alternador 145STK.	28
4.9. Selección de material.	29
4.10. Pestaña calcular en Solidworks.	30
4.11. Opción de consulta de propiedades físicas de la pieza	30
4.12. Propiedades físicas de pieza mecánica de un aerogenerador	30
4.13. Amortiguador rotacional considerado.	31
5.1. Gráfica de potencia del generador en función de la velocidad angular.	35
5.2. Velocidades relativas en un tren de transmisión epicicloidal.	38
5.3. Diagrama del sistema realimentado	45
5.4. Ecuaciones diferenciales en diagrama de bloques	48
5.5. Variables de segundo orden	49
5.6. Bloque integrador	49
5.7. Diagrama de bloques representativo del aerogenerador	50
5.8. Diagrama de bloques con variables de entrada y salida	53
5.9. Diagrama de bloques con variables de entrada y salida	53
5.10. Sub-Bloque torque de entrada	54
5.11. Sub-Bloque Factor de potencia C_p	54
6.1. Boceto de la interfaz gráfica	56
6.2. Entorno Matlab Guide	56
6.3. Programación de sliders en Matlab	58

6.4. Panel de sliders y edit Text	58
6.5. Programación de edit text	59
6.6. Botón de inicio de simulación	60
6.7. Panel de resultados de datos numéricos	61
6.8. Panel de observación de gráficas	61
6.9. Programación del botón iniciar	62
6.10. Bloque de torque de entrada.	63
6.11. Resultados de la prueba #1	64
6.12. Resultados de la prueba #2	65
6.13. Gráfica de la variación en la velocidad del viento	66
6.14. Bloque generador de señales	66
6.15. Resultados de la prueba #3	67
6.16. Respuesta del sistema WTG interconectado en simultaneo	68

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Los aerogeneradores son la principal tecnología detrás de la generación de energía eólica, la cual es una de las formas de proveer energías limpias y renovables en la actualidad. La energía eólica ha existido desde hace miles de años, se puede comprobar al observar la estructura de los navíos antiguos, estos tenían un elemento fundamental llamado “La vela” que golpeada por el viento permitía desplazar la nave en los cuerpos de agua; y este es solo un ejemplo de la energía eólica antes de que existiesen los aerogeneradores [4].

Máquinas como el molino de viento fueron inventadas mucho tiempo después. En el siglo VII en oriente medio utilizaban esta herramienta y luego se extendió más hacia lugares como China y países cercanos [5]. Estos molinos eran utilizados para moler diferentes clases de granos como el trigo, entre otras diferentes tareas que se fueron dando con el tiempo como pueden ser: aserrar madera, bombear agua y extraer aceite de semillas. Cabe destacar que estos molinos de viento estaban compuestos por una rueda de entre 4 a 8 aspas como se observa en la Figura 1.1, ensambladas a un rotor principal horizontal que conectaba con un juego de engranajes que, estos a su vez transmitían la energía mecánica necesaria para la principal tarea, moler grano. La estructura del molino es muy importante tenerla en cuenta ya que hoy en día es muy semejante a la de un aerogenerador de eje horizontal.



Figura 1.1: Molino de viento

Fuente: Fotografía tomada por Carmen Bellés Monfort.

No fue hasta finales del siglo XIX y siglo XX que los aerogeneradores se crearon, teniendo su origen en Estados Unidos y Dinamarca (principal país en uso de aerogeneradores actualmente) y tomando gran fuerza en los años 70 y 80, periodo en donde se dio la primera crisis del petróleo. Esto ha llevado a que muchos países se integren a la búsqueda, investigación y desarrollo de mejores tecnologías, convirtiendo a los aerogeneradores en un tema de ingeniería de gran tamaño y gran importancia. Un pionero en estas tecnologías fue Charles Francis Brush [6] [7].

Desde hace aproximadamente 20 años, cada año se elabora un registro del porcentaje que abarcan las energías renovables dentro de la generación total de energía eléctrica en el mundo, aumentando hacia los últimos años hasta un poco menos del 20 % como se aprecia en la Tabla 1.1.

Year	RPP	Renewable energy target (MWh)
2022-2030	N/A	33,000,000
2021	18.54	33,000,000
2020	19.31	33,850,000
2019	18.60	31,244,000
2018	16.06	28,637,000
2017	14.22	26,031,000
2016	12.75	21,431,000
2015	11.11	18,850,000
2014	9.87	16,950,000
2013	10.65	19,088,000
2012	9.15	16,763,000
2011	5.62	10,400,000
2010	5.98	12,500,000
2009	3.64	8,100,000
2008	3.14	6,800,000
2007	2.70	5,600,000
2006	2.17	4,500,000
2005	1.64	3,400,000
2004	1.25	2,600,000
2003	0.88	1,800,000
2002	0.62	1,100,000
2001	0.24	300,000

Tabla 1.1: Porcentaje de energía renovable extraída de diferentes medios (Solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica) y sus valores desde el año 2001.

Fuente: Adaptado de [8].

Al hablar sobre estas tecnologías, se puede llegar a pensar que solo existen en Europa, Asia o norte América, pero la realidad es diferente. En países latinoamericanos como: Chile, Brasil y México se invierte en tecnologías para que el porcentaje de crecimiento de energía eólica, entre otras, siga aumentando (ver Tabla 1.2) [9]. En esta tabla se aprecia que para el año 2018 algunos países disminuyeron las inversiones destinadas al desarrollo de las diferentes tecnologías (Energías renovables) con respecto al año 2017. Sin embargo, esta inversión en Chile, Brasil y México aumento. En Colombia se trabaja con turbinas de viento, aunque en menor magnitud; existen algunos parques eólicos no muy grandes e incluso, hay proyectos que se planean elaborar dentro de los próximos 10 años [10]. Es de resaltar que aunque existen estas iniciativas, la generación de energía eólica a nivel residencial aun no ha sido promovida en nuestro país, a gran escala. Lo anterior, a pesar de que ya existe

reglamentación al respecto de la instalación y comercialización para pequeños generadores. Parte del problema, es la enseñanza a la comunidad sobre este tipo de sistemas de generación. La cual debería soportarse en herramientas computacionales que faciliten el entendimiento de estas tecnologías. Comercialmente, existen algunas aplicaciones software que exploran estas tecnologías [1][2][3]. Sin embargo, el software que se encuentra en la web para el análisis y la enseñanza de sistemas de generación eólica usualmente es pago o esta desarrollado para niveles superiores a los de pregrado en Ingeniería Mecatrónica.

país	\$ billion	% crecimiento 2018
China	83.4	-8%
United States	55.5	28%
Japan	16.5	-10%
India	9.3	-14%
Taiwan	8.8	390%
Spain	8.4	25%
Brazil	6.5	74%
Australia	5.6	-40%
Netherlands	5.5	25%
United Kingdom	5.3	-40%
Chile	4.9	302%
United Arab Emirates	4.5	1223%
Germany	4.4	-30%
France	4.4	3%
Mexico	4.3	17%
Sweden	3.7	-19%
Ukraine	3.4	56%
Vietnam	2.6	-64%
Korea (Republic)	2.4	31%
Russian Federation	2.3	76%
Argentina	2.0	-18%
Turkey	1.9	-16%
Poland	1.8	349%
Finland	1.5	41%
Italy	1.3	-35%
Norway	1.0	-8%
South Africa	1.0	-76%
Kazakhstan	0.8	58%
Greece	0.7	11%
Israel	0.7	113%

Tabla 1.2: Inversión en capacidad de energía renovable por los 30 países o territorios principales en 2019 y crecimiento en 2018

Fuente: Adaptada de [9].

Por medio de este proyecto se espera magnificar la investigación, estudio e implementación de turbinas de viento y motivar a que la ingeniería en este campo crezca mucho más. Es importante resaltar que este TIG se ha desarrollado en el marco del proyecto de investigación

"Gestión de energía basada en computación en la nube para la interoperabilidad entre un grupo de microrredes aisladas", código: 70172, el cual es financiado por Minciencias.

1.2. Justificación

Actualmente en diferentes partes del mundo se invierte en tecnología que conlleve a generación de energías renovables. Anualmente el porcentaje correspondiente a este tipo de tecnologías incrementa, aunque se mantiene prácticamente constante teniendo un porcentaje del 18,54 % para el año 2021, generando una cantidad de 33 millones de MWh. Por tal mención, las posibilidades de implementar tecnologías como turbinas eólicas son cada vez mayores.

Aunque en Colombia se cuenta con dos parques eólicos que producen energía eléctrica para su uso normal, se considera muy poco ya que la energía suministrada entre estos dos parques es de 39,5 MW y como se menciona en [10] en la región Caribe se cuenta con un potencial un poco superior a los 100GW. Con el desarrollo de este proyecto, se espera promover en un largo plazo que el área de investigación de estas tecnologías se amplíe y continúe tomando fuerza para mayores avances en un futuro cercano.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar una herramienta computacional modular a partir del modelo dinámico de un aerogenerador de eje horizontal con características mecánicas, eléctricas y electrónicas.

1.3.2. Objetivos específicos

- Modelar computacionalmente la geometría de los diferentes módulos que conforman una turbina eólica (Módulo mecánico, electromecánico y electrónico).
- Diseñar una interfaz que permita el ingreso de datos y la visualización de resultados.
- Hacer un análisis de los resultados obtenidos en la interfaz y una comparación con datos experimentales de un modelo PM-WTG (turbina de viento con generador síncrono de

imanes permanentes).

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Clases y tecnologías de los aerogeneradores

Cuando se habla de turbinas de viento, turbinas eólicas o aerogeneradores, se piensa primero que todo en el clásico diseño de una, el cual se puede decir que consta de un mástil muy alto que en su extremo tiene un rotor con hélices que están en posición perpendicular al viento, y este movimiento rotatorio se convierte en energía eléctrica; un resumen muy breve y valido, pero en la realidad es mucho más complejo, existen libros que pueden estar dedicados a un solo tipo de aerogenerador. Existen tres clases de aerogeneradores: aerogenerador de eje vertical, aerogenerador vortex y aerogenerador de eje horizontal. A continuación, se presentarán con más detalle cada uno de ellos.

2.1.1. Aerogenerador de eje vertical

En la Figura 2.1 se presentan cuatro diseños diferentes de aerogeneradores de eje vertical.

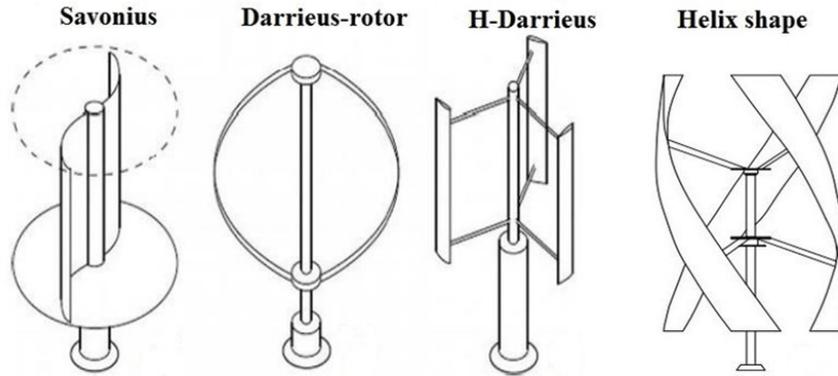


Figura 2.1: Diseños de aerogeneradores de eje vertical.

Fuente: Adaptado por el autor.

Esta clase de aerogeneradores fueron creados entre 1920 y 1930, siendo el francés Georges Darrieus, uno de los primeros en patentar su diseño y dándole su nombre [11]. Hoy en día estos aerogeneradores son una opción muy buena hablando de generación de energía en pequeña y mediana escala, ya que tiene una gran cantidad de ventajas, aunque cabe aclarar que no son competencia para los aerogeneradores de eje horizontal en términos de una alta generación de energía [12]. Estos son utilizados principalmente en zonas cercanas a la red eléctrica, por ejemplo, cerca de una vivienda en donde la energía suministrada por la turbina, puede ser utilizada para alimentar gran parte de esta vivienda, ya que si se toma en cuenta un modelo Darrieus promedio, este es capaz de proveer entre 5 y 7 kW de potencia [13].

Características y ventajas como: el fácil mantenimiento, impacto ambiental, aprovechamiento de vientos en cualquier dirección y bajo costo, son algunas de las razones por la que esta tecnología es preferiblemente usada en algunos ámbitos [12]. La razón por la que se dice que no compite con una turbina de eje horizontal, es porque no son tan eficientes teniendo en cuenta la relación potencia/costos y además, la potencia de salida no se compara con la de los de eje horizontal. Por la anterior razón, es que estos aerogeneradores de eje vertical no son los más usados en parques eólicos, aunque si existen, pero como ya se mencionó, la eficiencia no es la mejor. Claramente, hoy en día se presencian muchos modelos diferentes debido a que obviamente, esta tecnología no se deja de estudiar para seguir profundizando en conocimientos y realizar mejoras.

2.1.2. Aerogenerador vortex

Esta tecnología es la más nueva, y aunque no tiene presencia de una turbina, su función se cumple gracias al viento. Este proyecto tuvo inicio en 2015 y desde entonces se ha ido desarrollando hasta ahora. En la Figura 2.2 se observa un modelo de aerogenerador Vortex.



Figura 2.2: Aerogenerador vortex.

Fuente: Adaptado de [14].

Este dispositivo tiene un funcionamiento sencillo y el principio fundamental se explica muy claramente en su página web dedicada a tal proyecto [14]. Ya que no tiene ningún rotor, la energía se genera gracias a las oscilaciones que se producen en el vortex cuando es golpeado por el viento. Un aspecto importante de este modelo, es que no existen partes mecánicas como por ejemplo: engranajes en los aerogeneradores convencionales, lo que disminuye costos de reparación o mantenimiento.

El ejemplar que se observa en la Figura 2.2 puede aparentar un tamaño considerable o hasta parecido al de un aerogenerador de eje horizontal promedio, y es posible que pueda ser así en un futuro, pero este modelo actualmente tiene un tamaño no mayor a los tres metros de altura según la información que brinda la página web; además se categoriza

como un aerogenerador para la micro eólica. Esta tecnología innovadora tiene ventajas muy importantes a comparación con un aerogenerador de eje horizontal, pero algo también muy importante aquí es buscar que el aerogenerador proporcione una gran cantidad de potencia, lo cual es algo que el vortex hasta el momento no tiene y esto no quiere decir que no hay que profundizar más en estos modelos, sino al contrario, continuar mejorando esta herramienta porque a pesar de que es totalmente nueva, el potencial que tiene es grande.

2.1.3. Aerogenerador de eje horizontal

Esta es sin duda la clase de aerogeneradores más conocida; básicamente, cuando alguien piensa en aerogeneradores lo más probable es que se imagine uno de eje horizontal. Como se menciona en este documento, estos aerogeneradores se crean a partir de la idea de un molino, o mejor dicho, son molinos mucho más mejorados, solo que hoy en día no se les llama así porque su función principal no es moler sino generar energía eléctrica. En la Figura 2.3 se aprecia un ejemplar de aerogenerador de eje horizontal.

Estas tecnologías tuvieron su origen en Europa, en donde se desarrolló a tal grado que hoy en día cubren gran porcentaje de la energía total en países como Alemania y Dinamarca, sin mencionar algunos grandes de Asia como China e India entre otros más [15].

Como anteriormente se mencionó, esta clase es comúnmente la más usada en parques eólicos en todo el mundo (en generación eólica) y es importante mencionar que puede haber dos tipos de instalaciones diferentes: el primero es la instalación en tierra, lo que se conoce como on-shore y la instalación en mar adentro, lo que se conoce como off-shore [16].



Figura 2.3: Aerogenerador de eje horizontal.

Fuente: Autor.

La energía eólica se ha vuelto un negocio de gran escala, pues grandes empresas como Siemens Gamesa es líder de la producción off-shore [17]. También otras empresas más pequeñas se dedican a la producción de tecnologías de menor escala y que puedan abastecer sitios como residencias, granjas o incluso ciertas fábricas.

Es una realidad que anualmente se incrementa el uso y se invierte en el desarrollo de estas tecnologías, esto se menciona en un informe de tendencias globales en la inversión de energías renovables [18]. Algunas de estas razones son las que causan preguntas como: ¿se está invirtiendo en tecnologías de este tipo en el país?, ¿cómo va el desarrollo de estas tecnologías por parte de la ingeniería en el país? o incluso ¿se está haciendo una investigación adecuada

por parte propia y no solamente extranjera? Estas tecnologías son un fuerte ahora y en un futuro muy cercano seguramente lo serán aún más.

2.2. Configuraciones de un aerogenerador de eje horizontal

Los aerogeneradores de eje horizontal suelen ser iguales a simple vista, pero esto no es así siempre. Como se ha estado mencionando, a parte de su modo de instalación o su uso, estos aerogeneradores tienen distintas configuraciones salvo en algunos casos como parques eólicos o granjas eólicas donde se suele utilizar el mismo diseño de aerogenerador para cada una de las turbinas. La configuración en estas máquinas puede definir muchas cosas como: la vida útil, tasa de generación, rentabilidad entre algunas otras más. Con “configuración” se hace referencia a la combinación de elementos que componen la turbina, la programación si es requerida y la operabilidad. La Figura 2.4 muestra una gran variabilidad de tecnologías y configuraciones posibles.

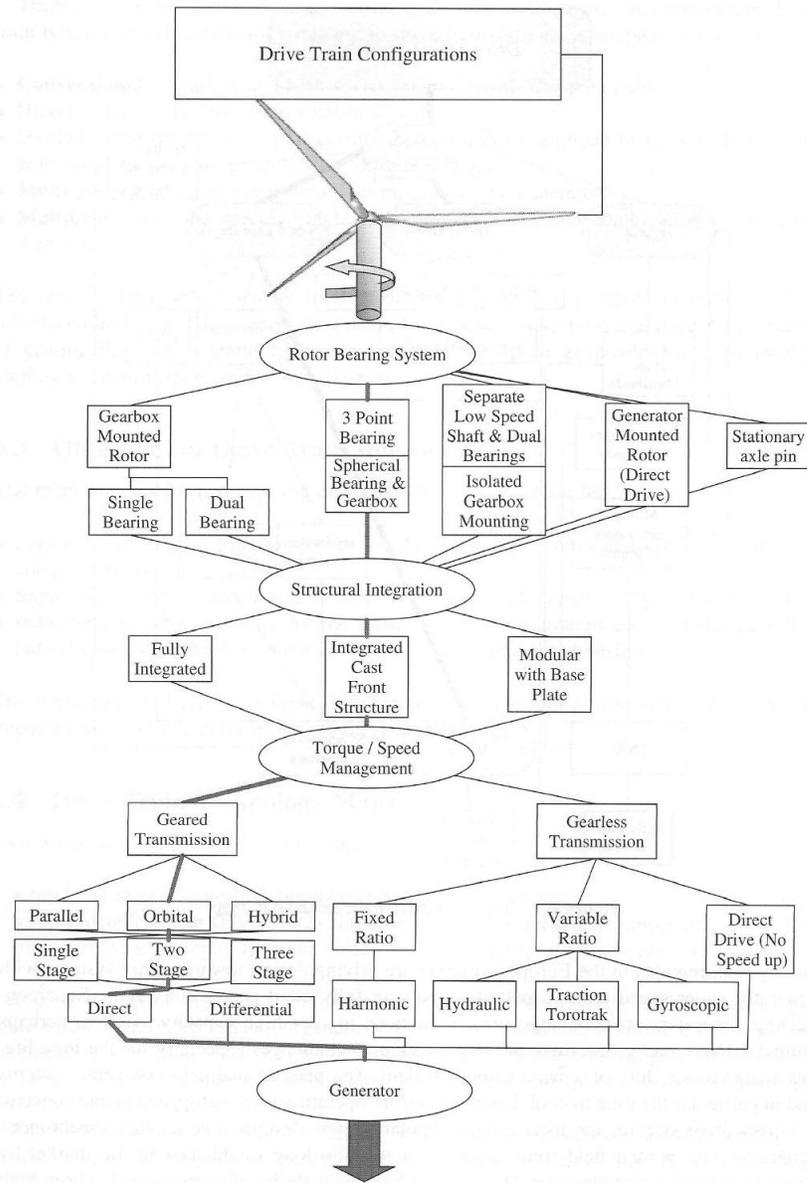


Figura 2.4: Tecnologías y configuraciones de tren de transmisión

Fuente: Adaptado de [19].

En posteriores capítulos se mencionará la configuración del aerogenerador de eje horizontal que se va a usar para el modelo base de la herramienta computacional.

2.3. Partes principales del aerogenerador

Los aerogeneradores de eje horizontal tienen diferentes partes, piezas o secciones que resaltan en la estructura física de estos. Al observar rápidamente un modelo de eje horizontal, lo que más llama la atención son las aspas o hélices que se encuentran en la parte frontal de la turbina. Gracias a su ingenioso diseño, este elemento se encarga de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica, dándole una velocidad rotacional al rotor principal. En una turbina también se puede apreciar el elemento conocido como góndola que es prácticamente una pieza encargada de proteger las partes mecánicas internas. En esta sección de partes mecánicas internas se puede encontrar un elemento conocido como caja multiplicadora, caja de engranajes o tren de transmisión cuya función principal es tomar la velocidad rotacional de entrada, incrementarla reduciendo el torque y posteriormente sacar esa velocidad incrementada por un eje independiente en donde se situará el generador eléctrico. El elemento que le da sentido a estas tecnologías es el generador eléctrico o alternador, ya que sin esta pieza clave no se logra una obtención de energía eléctrica renovable. El generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial es un elemento que se sitúa en el eje de salida del tren de transmisión en el aerogenerador; este cuenta con dos partes importantes que son: el rotor y el estator.

- Rotor: El rotor, como su nombre lo indica es la parte giratoria dentro del generador. Este elemento cuenta con imanes permanentes incrustados al cuerpo del rotor, dichos imanes son generalmente de hierro o en otros casos de aleaciones como "Tierras raras" que se componen de metales como el samario y el neodimio.

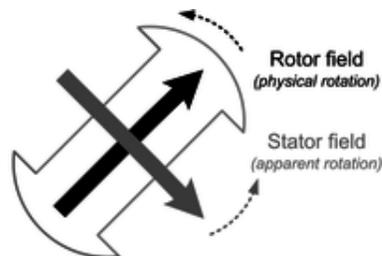


Figura 2.5: Par de polos magnéticos en el rotor

Fuente: Adaptado de [20].

En la Figura 2.5 se puede observar un par de polos magnéticos en el rotor. Para una

aplicación en un aerogenerador como la de este caso, el generador cuenta con muchos más pares de polos en el rotor. El beneficio de tener imanes permanentes y no un circuito de campo es grande, ya que en primer lugar permite al generador funcionar con velocidades variables. Por otro lado no se requiere un circuito encargado de excitar el devanado del rotor para generar un campo magnético, esto reduce costos en mantenimiento y además, al tratarse de imanes permanentes tanto la velocidad de rotación del campo magnético como la velocidad del rotor van a ser iguales, es por eso que se considera una máquina síncrona.

Por último, cabe mencionar que el campo magnético se genera de forma radial, es decir, uniformemente en todas direcciones del rotor y esto es debido a la posición de los imanes como se observa en la Figura 2.6.

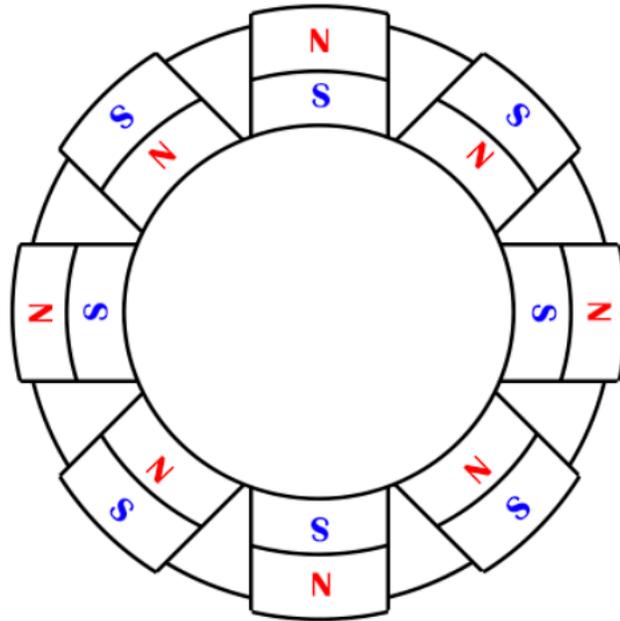


Figura 2.6: Imanes permanentes y polos

Fuente: Autor.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Etapa de modelizado

Para realizar el modelado de la geometría del aerogenerador, se hace uso de la herramienta Solidworks. Antes de comenzar a modelizar las diferentes piezas, se elabora un boceto sencillo en donde se aprecien las diferentes partes con sus respectivas medidas, estas medidas pueden variar un poco debido a que en el proceso se pueden considerar variaciones en la geometría. En Solidworks se realizan las piezas de manera individual haciendo uso del modo "Pieza". Las piezas más importantes que se mencionaron en el anterior capítulo tendrán asignado un material con el fin de que la misma herramienta a través de cálculos proporcione parámetros físicos como la masa e inercia, ambas necesarias para la obtención del modelo matemático. Con todas las piezas modelizadas, se procede a crear un ensamblaje en la misma herramienta Solidworks. Con ayuda de las relaciones de posición se busca un acople adecuado entre las piezas y así conseguir el ensamble final deseado.

Antes de elaborar el modelo matemático, es muy importante obtener las inercias de las piezas que participan en la transmisión de energía mecánica.

3.2. Etapa de modelo matemático

Para poder obtener un modelo que represente lo mejor posible un aerogenerador de eje horizontal, se consideró en primera instancia el uso de las ecuaciones de Euler Lagrange. La razón principal por la cual se eligió este método, es porque al tratarse de fenómenos físicos, las

ecuaciones de energía de Lagrange son adecuadas para describir el sistema. Además, ya se tiene conocimiento de este método para describir un sistema. Las ecuaciones de Lagrange, permiten representar tanto la parte mecánica como la parte eléctrica del sistema con ecuaciones diferenciales. Teniendo el modelo matemático, se procede a expresar dichas ecuaciones en un diagrama de bloques con el que se pueda trabajar en el entorno de Simulink, así poder interconectar el sistema del aerogenerador con la interfaz gráfica.

Es indispensable tener los valores de masa e inercia de las piezas mencionadas anteriormente. Más adelante se podrá observar como contribuyen estos datos en el modelo obtenido.

3.3. Etapa del diseño de interfaz

Para la elaboración de la interfaz gráfica, se utiliza la herramienta Matlab mencionada anteriormente. Dicha interfaz cuenta con espacios indicados en donde la persona puede ingresar datos iniciales. En este punto se tiene la idea de cómo es la interfaz y se tiene en cuenta la posibilidad de que su aspecto cambie; sin embargo, lo que si se espera es que su funcionalidad siempre sea la misma. La interfaz cuenta con espacios indicados para los siguientes datos de entrada: velocidad del viento (Rango definido) y el ángulo de ataque beta (Rango definido).

Adicionalmente, aparte de los datos de entrada se encuentran espacios en donde se observan datos de salida o resultados que corresponden a valores de operaciones internas que se realizan haciendo uso de los datos de entrada. Los datos de salida que se observan en la interfaz son: velocidad angular en el alternador y el voltaje generado.

Todo esto se lleva a cabo gracias al comando "Guide" que proporciona Matlab. Este comando dispone de un área de trabajo que facilita la creación de interfaces, proporcionando diferentes elementos como botones, espacios de texto, gráficas, sliders, entre otros más. En el espacio de trabajo simplemente se prepara la parte visual de la interfaz y se asegura que quede estético y entendible para los futuros usuarios. Después de esto, Matlab automáticamente crea un script con el código por defecto de cada elemento de la interfaz y solamente queda programar y asignar funciones entre estos elementos para que cumplan con la función deseada.

3.4. Etapa de resultados y análisis

En la última etapa del proyecto, se comprueba la funcionalidad de la herramienta computacional desarrollada. Para esto se ejecuta el software desarrollado con diferentes valores iniciales ingresados y así obtener sus respectivos resultados de velocidad de salida y voltaje generado. Una vez realizada la ejecución del programa (sistema aerogenerador), los resultados de velocidad angular de salida y voltaje generado se podrán comparar con los valores que ofrece el catálogo del alternador. Por otro lado, se compara el comportamiento que tienen las diferentes variables de salida, con base en resultados de un aerogenerador similar. Tanto los resultados como los diferentes comportamientos deben ser coherentes.

Capítulo 4

Modelizado de la estructura electro-mecánica del aerogenerador

Se vuelve a resaltar el uso de un software diferente para cada una de estas dos partes: en primer lugar, el uso de SolidWorks para el modelizado de cada pieza de la geometría y en segundo lugar, Matlab para el desarrollo de la interfaz.

4.1. Geometría seleccionada

En la Tabla 4.1 se observan las variables y los parámetros más importantes que se consideran para la modelización del aerogenerador, donde V_c y V_f son las velocidades mínima y máxima del viento que se van a utilizar, r es el radio del frente del aerogenerador, P_r es la potencia a una velocidad nominal, p es el número de polos del alternador y K_b es la constante de voltaje que relaciona la velocidad angular con el voltaje generado en el alternador. Así mismo, en la Figura 4.1 se observan las piezas mecánicas internas del aerogenerador; estas piezas, en su mayoría engranajes, se encargan de transmitir la energía mecánica hasta el alternador.

VARIABLES Y PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
V_c	2	m/s
V_f	10	m/s
r	5	m
P_r	1750	W
p	12	
K_b	0,4	Vs/rad

Tabla 4.1: Variables y parámetros del aerogenerador

4.2. Módulo mecánico

La energía mecánica en una turbina eólica puede llegar al generador de forma directa o por medio de un sistema de aumento de velocidad; en este caso, como se observa en la Figura 4.1, se optó por hacer uso de un tren de engranajes que transmita la energía mecánica sin perder potencia y al mismo tiempo multiplique la velocidad angular presente en el aerogenerador.

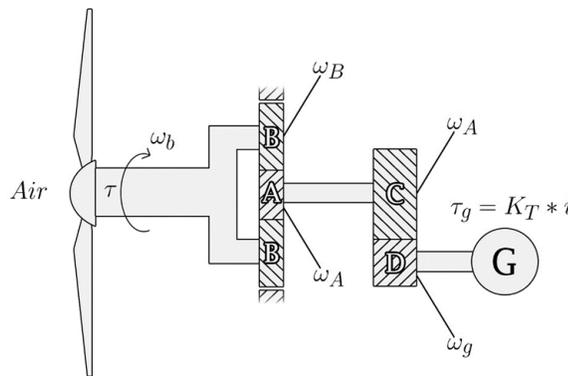


Figura 4.1: Esquemático del aerogenerador

Fuente: Autor.

Explicando un poco la figura anterior, en esta se observa el eje principal que parte desde la zona frontal donde están las aspas. Este eje principal va a tener una velocidad rotacional ω_b y un torque producido gracias a la velocidad del viento (más adelante en el modelo matemático se explicará la obtención de este torque de entrada). Conectado al final del eje principal se encuentra un tren epicicloidal de engranajes, encargado de dar mayor velocidad angular en la salida; en este punto se tienen diferentes velocidades angulares relativas, ya que los engranajes

B aparte de girar sobre su centro, giran con respecto al eje principal.

4.3. Módulo eléctrico

Para llegar a la obtención del circuito de la Figura 4.2 es necesario realizar un análisis previo del generador síncrono de imanes permanentes. Normalmente estos generadores tienen una salida trifásica, esto quiere decir que va a suministrar tres líneas diferentes cada una con un voltaje y corriente eléctrica iguales en magnitud (sistemas balanceados), pero hay una clara diferencia entre las tres fases y es que cada una está desfasada 120° respecto a las demás [21]. Esta característica del generador síncrono causa una mayor dificultad al intentar encontrar un modelo matemático que represente el circuito eléctrico de una sola fase.

Lo que se hace comúnmente para un análisis correcto de estas máquinas síncronas es transformar sus variables de un esquema trifásico ABC (tres líneas) a un esquema con dos variables llamados: eje directo y eje de cuadratura (dq). Para lograr este cambio de variables se aplica lo que se conoce como transformada de Park, este método se puede apreciar en [22] [23].

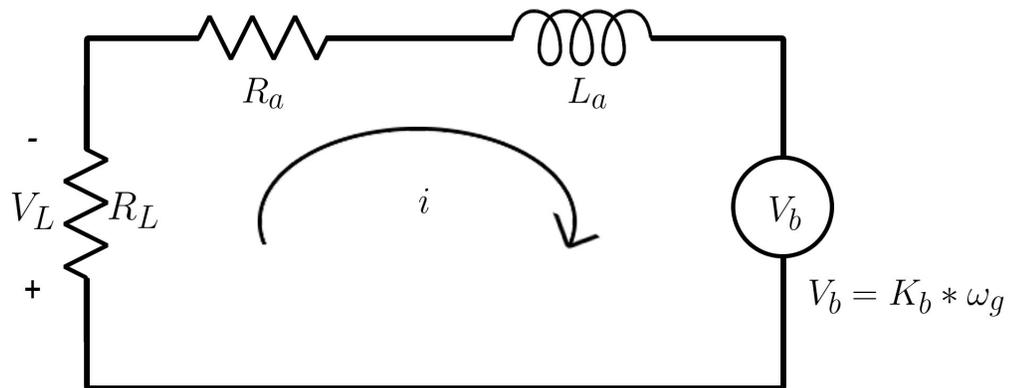


Figura 4.2: Circuito eléctrico monofásico equivalente del PMG.

Fuente: Autor.

Hay que aclarar que en este documento no se va a considerar ni se va a profundizar en un sistema de conversión de acople a la red eléctrica; pero algo que si se debe tener presente es la

potencia que se va a entregar a dicho sistema de conversión. Por lo tanto esta potencia está descrita como,

$$P_g = 3 (V_{b\Phi RMS} * i_{\Phi RMS}). \quad (4.1)$$

Donde $V_{b\Phi RMS}$ es el voltage RMS monofásico y $i_{\Phi RMS}$ es la corriente RMS en la armadura del generador. La potencia total entregada equivale a 3 veces la multiplicación de estos dos valores anteriores. Gracias a lo mencionado anteriormente, se aclara que el circuito de la Figura 4.2 representa una sola fase del generador síncrono de imanes permanentes. Dicho circuito cuenta con una resistencia en la armadura R_a , una inductancia L_a debido al devanado en la armadura, una fuente que representa el voltaje generado o fuerza contra-electromotriz V_b y por último un elemento llamado R_L que representa la carga que el circuito observa en la salida (carga causada por el sistema de conversión). Igualmente, una corriente i está presente en el circuito.

La carga observada en el circuito va a depender de una potencia llamada potencia de referencia P_{Ref} que equivale a la suma entre la potencia P_g y las pérdidas que se encuentren en el sistema de conversión. Para conocer el valor de R_L se empieza por hallar la ecuación del circuito en estado estacionario haciendo uso de las leyes de kirchhoff [24]:

$$V_b - V_L - R_a i - j\omega_n L_a i = 0. \quad (4.2)$$

Al tratarse de un circuito en donde la corriente y el voltaje sobre la carga se consideran en fase, la componente imaginaria j se puede suprimir de la ecuación 4.2. Importante mencionar que la frecuencia $\omega_n=377$ rad/s debido a que la frecuencia de red es 60Hz. El voltaje V_L se puede reemplazar por la siguiente expresión,

$$V_L = \frac{P_{L\Phi}}{i}. \quad (4.3)$$

A su vez, la potencia de carga monofásica también se puede escribir como,

$$P_{L\Phi} = \frac{P_{Ref}}{3}, \quad (4.4)$$

así que, si se reemplazan las Ecuaciones 4.3 y 4.4 en la Ecuación 4.2 se obtiene la siguiente expresión,

$$V_b - \frac{P_{Ref}}{3i} - R_a i - \omega_n L_a i = 0. \quad (4.5)$$

La Ecuación 4.5 se puede multiplicar por la corriente eléctrica y dejar expresada como una ecuación cuadrática en donde la variable de interés es i . Haciendo lo anterior, se obtiene lo siguiente:

$$- (R_a + \omega_n L_a) i^2 + V_b i - \frac{P_{Ref}}{3} = 0, \quad (4.6)$$

entonces,

$$i = \frac{-V_b + \sqrt{V_b^2 - \frac{4}{3}(R_a + \omega_n L_a)(P_{Ref})}}{-2(R_a + \omega_n L_a)}. \quad (4.7)$$

Por último, el valor de R_L se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$V_L = R_L i = \frac{P_{Ref}}{3i}, \quad (4.8)$$

entonces,

$$R_L = \frac{P_{Ref}}{3i^2}. \quad (4.9)$$

Ahora por otra parte, explicando un poco mas sobre el rotor del generador, este es cilíndrico y cuenta con imanes permanentes salientes, es decir, en lugar de tener un circuito o devanado de campo que posteriormente debe ser excitado mediante una corriente para generar un campo magnético, está conformado por imanes reales que por sus propiedades están constantemente generando un campo magnético mientras rotan sobre el eje al cual están acoplados. Esto causa que se produzca un campo magnético radial el cual va a inducir un voltaje sobre el devanado de la armadura como se mencionó anteriormente.

4.4. Modelizado de piezas

A continuación se presentarán las piezas que se consideran más importantes del modelo, estas tendrán sus debidas medidas y una explicación sobre el aporte a la geometría del aerogenerador. Es necesaria la modelización de estas piezas para poder obtener los parámetros físicos, que serán requeridos para la elaboración del modelo matemático más adelante.

- Aspa o hélice: El ensamblaje cuenta con 3 aspas o hélices, cada una de una longitud de 4,65 m más una sección que se inserta al eje principal y cuyo diámetro es de 23 cm con una profundidad de 11,5 cm.

Para la modelización, se seleccionó un tipo de aspa en un catálogo; dicho catálogo ofrece las coordenadas en un plano 2D que pertenecen a la silueta del perfil del aspa. Luego con ayuda de herramientas en Solidworks, se termina la pieza. En la Figura 4.3 se puede apreciar el diseño realizado del aspa.

Estas piezas generalmente se modelizan a partir de un perfil de hélice, que está dado por una lista de coordenadas. Para la creación de un perfil y así mismo una hélice, es necesario adentrarse al mundo de la ingeniería aeroespacial, en donde se estudia y considera cada detalle para un óptimo desempeño de tales piezas. Por la anterior razón, al investigar y tener que seleccionar una pieza que funcione bastante bien en aerogeneradores de eje horizontal, se consideró el uso de una hélice cuyo perfil sea de la familia NACA (National advisory committee for aeronautics) de 4 dígitos. Se puede apreciar el perfil de la hélice seleccionada en [25].

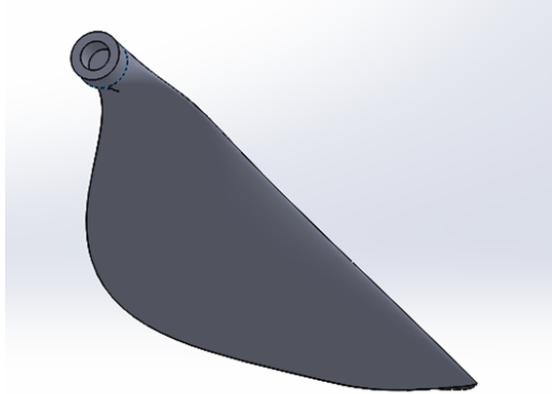


Figura 4.3: Aspa del aerogenerador (Airfoil).

Nota. Pieza modelizada en solidworks. Fuente: Autor.

- Eje principal: Esta pieza es la encargada de transmitir el movimiento rotacional desde el frente del aerogenerador hasta el tren epicicloidal de engranajes. Tiene una longitud de 76 cm desde el frente hasta el soporte de engranajes planetarios (ver Figura 4.4) y está apoyado sobre un cojinete el cual es necesario para un giro apropiado (ver Figura 4.5). Al momento del modelizado, se le asignó un material (Acero) para lograr que el software brinde información física de la pieza. Al observar se toman valores de masa=151,15 kg e inercia=1,44 kgm^2 .

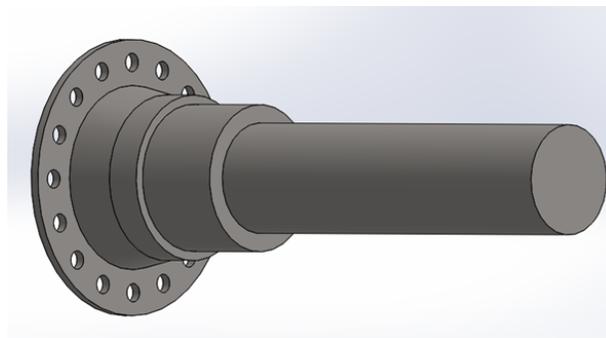


Figura 4.4: Eje principal (Main shaft).

Nota. Pieza modelizada en solidworks. Fuente: Autor.

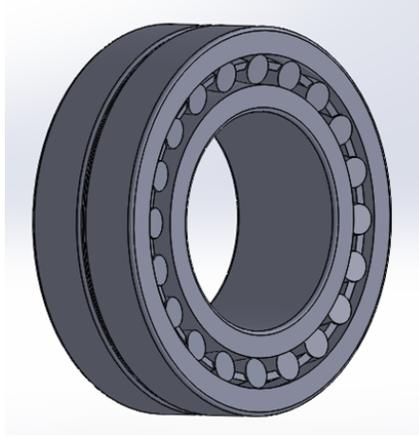


Figura 4.5: Cojinete (Bearing).

Nota. Pieza modelizada en solidworks. Fuente: Autor.

- Tren epicicloidal de engranajes: Esta sección conformada por ocho engranajes tiene una configuración especial conocida como tren epicicloidal. En la Figura 4.6 se puede apreciar la configuración especial de este módulo. La función principal es lograr una velocidad de giro en la salida mucho mayor que la de la entrada; mencionar que a su vez, estos trenes de engranajes pueden hacer 3 funciones diferentes dependiendo cual sea su entrada y cual sea su salida. Para el caso del multiplicador en la geometría seleccionada, la velocidad rotacional de entrada va a ingresar por medio del portador y será transmitida de los engranajes satélites (B) hacia el engranaje planetario central (A) mientras que la corona exterior (E) permanece fija.

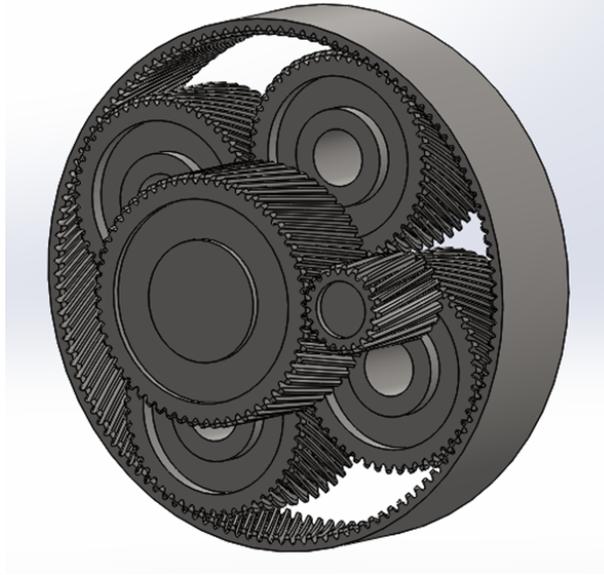


Figura 4.6: Tren epicicloidal de engranajes (Gearbox).

Nota. Pieza modelizada en solidworks. Fuente: Autor.

Igualmente, en la modelización se le asignó un material a cada pieza de esta sección para poder obtener las características físicas. Estos datos son importantes debido a que serán utilizados para la obtención del modelo matemático en un próximo capítulo. Los valores de masa e inercia de cada engranaje se muestran en la Tabla 5.1.

- Generador síncrono de imanes permanentes (PMG): Para la geometría del aerogenerador, se seleccionó el alternador 145STK6M. Todas sus características mecánicas, eléctricas y físicas se pueden encontrar en la Tabla 4.2, la cual es tomada del catálogo del alternador [26]. Es importante mencionar aquí mismo las características más importantes de este alternador. Lo primero que hay que mencionar es sobre su apariencia, pues para un tamaño mediano de aerogeneradores como es este el caso, estos generadores no tienen una armadura, en las Figuras 4.7 y 4.8 se puede observar la geometría del mismo.

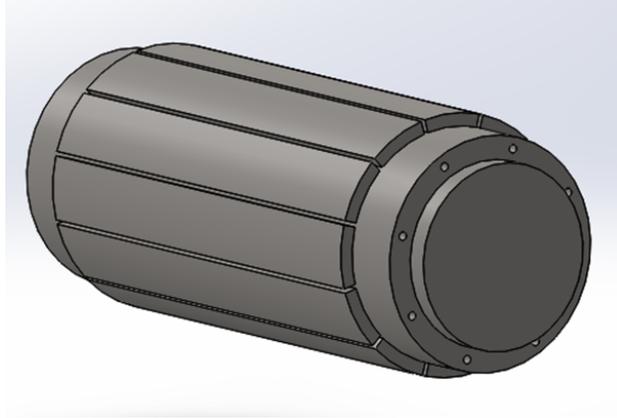


Figura 4.7: Rotor con 12 polos.

Nota. Pieza modelizada en solidworks. Fuente: Autor.

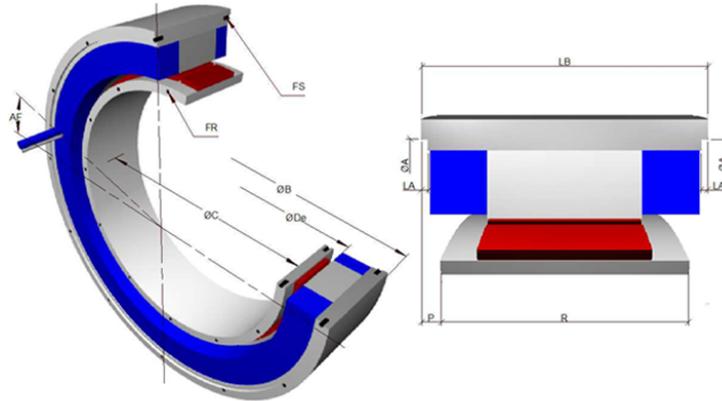


Figura 4.8: Geometría del alternador 145STK.

Fuente: Adaptado de [26].

		145STK2M		145STK4M		145STK6M		145STK8M		
Rated speed		Rpm	650	1500	650	1500	650	1500	650	1500
Rated Power at Rated speed	Rated power (1)(2)	W	571	1752	1307	3389	1962	4904	2633	6462
	Input torque at rated speed(1)(2)	N.m	11.2	13.9	25.4	25.2	36	35.9	47.8	47
	Efficiency at rated power (1)(2)	%	75	81	76	86	81	87	81	88
	Current at rated power (1)	Amps	1.4	4.3	3.2	8	4.8	13	6.4	16
Rated Power at Half speed	Voltage at rated power (1)(2)(3)	V	244	250	243	260	246	231	249	248
	Rated Power at half speed (1)(2)	W	204	690	493	1566	739	2319	1075	3097
	Input torque at half speed (1)(2)	N.m	8.9	11.5	20.7	25.4	28.8	36	43.5	47.8
	Efficiency at half speed (1)(2)	%	68	77	70	78	76	82	73	83
	Number of poles (number of pairs of poles)		12 (6)							
	Cogging torque	N.m	0.2		0.4		0.6		0.8	
	Phase resistance at 20°C	Ohm	19.8	4.53	8.6	1.4	4.11	0.59	3.18	0.51
	Phase inductance (5)	mH	105	24	60	10	34	4.9	25.8	4.1
	Voltage at no load (back emf) at 20°C (4)	V	365	393	390	367	357	312	361	334
	Rotor inertia	10 ⁻³ Kg.m ²	1.28		2.24		3.19		4.14	
	Weight	Kg	6.2		10.4		14.5		18.7	
	Power cable square section (6)	mm ²	4x1.5		4x1.5		4x1.5		4x1.5	
	Power cable diameter	mm	Ø8.6		Ø8.6		Ø8.6		Ø8.6	

Tabla 4.2: Características del alternador 145STK6M.

Fuente: Adaptado de [26].

La información de la Tabla 4.2 servirá para comparar y validar resultados que se vayan obteniendo, tanto en el transcurso de la obtención del modelo matemático como en resultados finales. A continuación se muestra el procedimiento para la obtención de dichos datos. Después de tener cada pieza elaborada en Solidworks, se le asigna el material (ver Figura 4.9).

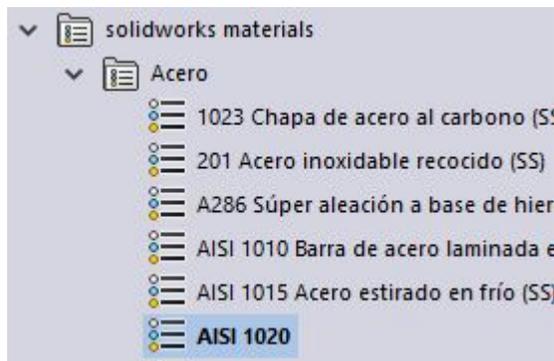


Figura 4.9: Selección de material.

Fuente: Autor.

Después de asignar el material, se desea obtener los parámetros físicos de la pieza. Estando en Solidworks, se selecciona la pestaña *calcular* como se muestra en la Figura 4.10.

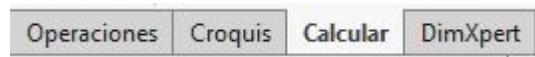


Figura 4.10: Pestaña calcular en Solidworks.

Fuente: Autor.

Luego en la barra de opciones se selecciona *Propiedades físicas* como se puede apreciar en la Figura 4.11.



Figura 4.11: Opción de consulta de propiedades físicas de la pieza

Fuente: Autor.

En esta nueva ventana se pueden obtener valores como masa, volumen, densidad entre otros (ver Figura 4.12).

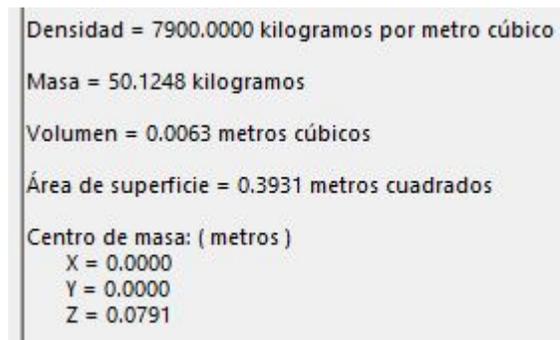


Figura 4.12: Propiedades físicas de pieza mecánica de un aerogenerador

Fuente: Autor.

Con el valor de masa en unidades de kilogramos se puede calcular la inercia de cada pieza. Para el cálculo de las inercias de los engranajes se utiliza la siguiente fórmula [27]:

$$I = \frac{1}{2}m (R_1^2 + R_2^2), \quad (4.10)$$

y para el cálculo del eje principal se utiliza la siguiente fórmula [27],

$$I = \frac{1}{2}mR^2. \quad (4.11)$$

Se consideró un amortiguador rotacional en cada eje con un valor de $C_r=200e-3$ Ns/m. Como ya se mencionó, esto se hace con el fin de simular un sistema con disipación de energía. La Figura 4.13 da una idea de cómo están acoplados estos amortiguadores.

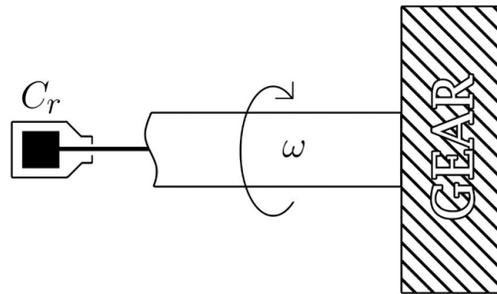


Figura 4.13: Amortiguador rotacional considerado.

Fuente: Autor.

Capítulo 5

Obtención del modelo matemático

El sistema “Aerogenerador” en este proyecto es totalmente mecatrónico, es por esta razón que se utilizaron las ecuaciones de Euler Lagrange [28]. Como bien se conoce, estas ecuaciones describen el comportamiento de las diferentes coordenadas o puntos independientes Z_i en un sistema, analizando las energías que se encuentran en él y aunque es más conocido por utilizarse en sistemas netamente mecánicos, de igual manera existen ecuaciones que relacionan estos sistemas mecánicos con sistemas eléctricos [28][29]. La ecuación principal de Euler Lagrange es:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial z_i} = 0, \quad (5.1)$$

donde,

$$L = T - V, \quad (5.2)$$

siendo T la energía cinética total,

$$T = \frac{1}{2} \dot{z}^2 M_{\dot{z}}, \quad (5.3)$$

y V la energía potencial elástica total,

$$V = \frac{1}{2} z^2 K_z. \quad (5.4)$$

Este caso anterior es cuando el sistema se considera conservativo, es decir, que no hay pérdidas y tampoco hay medios externos que influyan sobre el sistema. Ahora hablando de un caso no conservativo, entran dos términos nuevos y la ecuación se presenta a continuación:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}_i} \right) + \frac{\partial D}{\partial \dot{z}_i} - \frac{\partial L}{\partial z_i} = Q_i, \quad (5.5)$$

donde D es una función de disipación en todo el sistema y Q_i es una fuerza externa en el mismo punto o coordenada que se evalúa la ecuación lagrangiana.

Un sistema mecánico puede ser visto como un conjunto de elementos que aportan una inercia, una rigidez y una disipación, además de la posibilidad de contar con un trabajo externo que cause variaciones en el sistema. Para poder analizar un sistema de manera sencilla, se consideran dichos elementos como cuerpos con masa, muelles o resortes y amortiguadores respectivamente; estos dos últimos pueden actuar de manera lineal como comúnmente se conocen o de forma rotacional como sería el caso para un tren de engranajes.

En el caso de un sistema eléctrico, los elementos que lo conforman aportarán una inductancia, una capacitancia y una resistencia, además que, dependiendo de cual formulación se utilice para encontrar los modelos, el trabajo externo cambiará y por lo tanto actuará diferente.

Para el caso eléctrico existen dos formulaciones: la primera es la formulación por el método de las cargas en el circuito y la segunda por el método de los flujos eléctricos [29][30].

Para el análisis del aerogenerador, se utilizará la formulación por cargas, por lo que a la expresión Lagrangiana (5.2), se le añaden dos términos que corresponden a la parte eléctrica, quedando de la siguiente manera:

$$L^* = T - V + W_m^* - W_e, \quad (5.6)$$

donde W_m^* es la coenergía magnética de un inductor,

$$W_m^* = \frac{1}{2} L \dot{q}^2, \quad (5.7)$$

y W_e es la energía eléctrica de un capacitor, que en este caso particular no se considera.

La expresión restante que se mencionó en (5.5) es D . Todo sistema en la vida real se considera

no conservativo, es por eso que al analizar el sistema aerogenerador se considerarán elementos asociados a la disipación. Cada elemento tiene una expresión y en sus diferentes casos, mecánico y eléctrico son respectivamente:

$$D = \frac{1}{2} \dot{z}^2 C_{\dot{z}}, \quad (5.8)$$

$$D = \frac{1}{2} R \dot{q}^2. \quad (5.9)$$

Esta vez C corresponde al coeficiente de amortiguación y R a la resistencia en la armadura del generador. Para comenzar con la obtención de las ecuaciones que describan el sistema mecatrónico, se presentan los datos importantes.

5.1. Datos importantes de las piezas mecánicas

A continuación se presentan las piezas que conforman la sección mecánica y sus respectivas inercias.

Pieza	# Dientes	Diámetro (mm)	Masa (kg)	Inercia (kgm^2)
Eje principal	N/A	138	151,15	1,44
Engranaje planetario (A)	24	120	13,24	90e-3
Engranaje satélite (B)	50	250	50,12	1,57
Engranaje C	60	300	78,44	3,53
Engranaje D	20	100	8,87	40e-3
Engranaje corona (E)	124	620	34,77	13,36

Tabla 5.1: Características de las piezas mecánicas.

En la Tabla 5.1 se colocaron las inercias de cada pieza presente en la transmisión del aerogenerador (ver Figura 4.1). Como se mencionó en el capítulo anterior, estas fueron calculadas utilizando las ecuaciones 4.10 y 4.11.

5.2. Datos importantes del circuito eléctrico monofásico

Las variables que se presentan en la Figura 4.2 tienen valores de: $R_a=1,76 \Omega$ y $L_a=14,55e-3$ H. i se puede calcular con (4.7) y R_L con (4.9). Antes de proceder a calcular la corriente, se requieren algunos datos. En primer lugar, el voltaje inducido V_b es constante para una velocidad síncrona previamente definida. Más adelante se obtendrá el valor de la velocidad ω_g que condiciona dicho voltaje, pero por ahora es necesario recordar lo que se mencionó con anterioridad: "que el voltaje generado esté por los 200 V o un poco más". Entonces se selecciona $V_b=235$ V.

El otro dato importante es P_{Ref} que ya se explicó en el capítulo anterior. El valor de P_g se puede obtener de la Figura 5.1, pero como se observa, la potencia está en función de la velocidad angular ω_g [26].

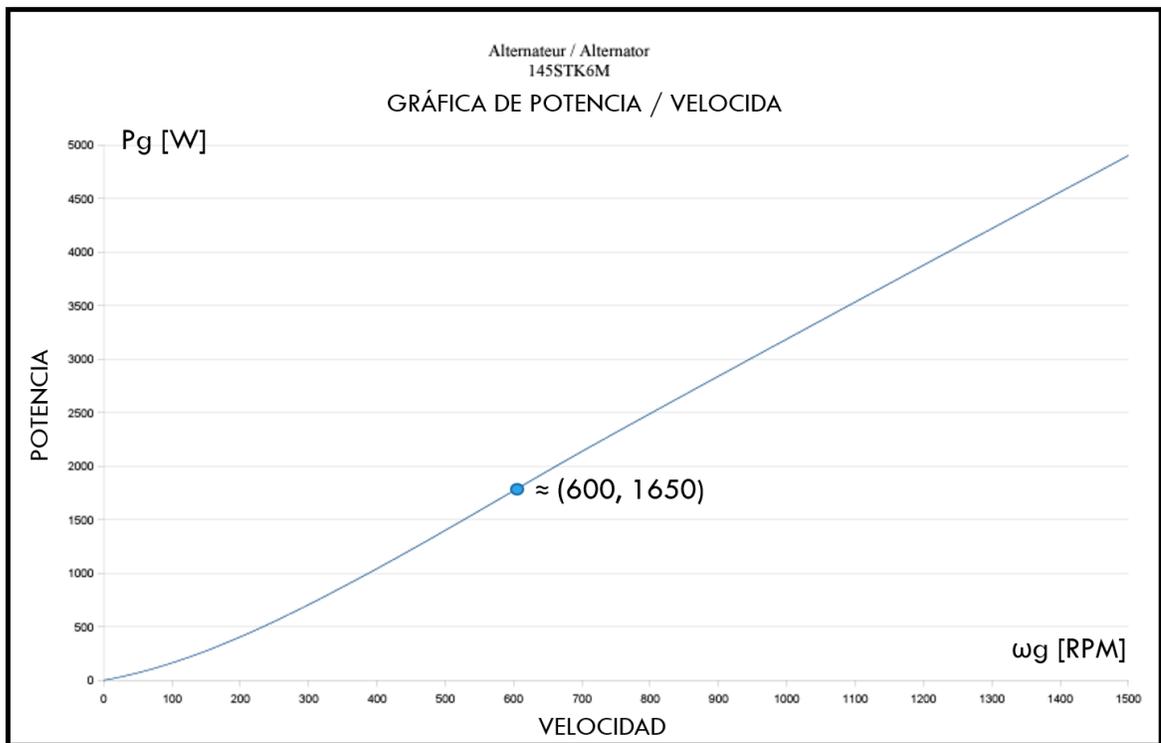


Figura 5.1: Gráfica de potencia del generador en función de la velocidad angular.

Fuente: Adaptado de [26].

Para poder conocer cuál es la potencia que se va a suministrar hacia una red, se requiere conocer cuál es la velocidad nominal en el rotor. En [31] se aprecia un cálculo para encontrar

la frecuencia de red, pero esto es algo que ya se conoce, pues se ha mencionado anteriormente que la herramienta computacional que se va a desarrollar se implementará en la ciudad de Bogotá, donde la frecuencia en la red es de 60Hz.

$$f = \frac{\omega_g p}{120} = 60Hz, \quad (5.10)$$

donde f es la frecuencia en la red eléctrica, ω_g es la velocidad de giro en el rotor del generador y p el número total de polos. De esta ecuación lo único que es desconocido hasta el momento es ω_g . Entonces al despejar de (5.10) se puede obtener,

$$\omega_g = \frac{120f}{p} = \frac{120 * 60}{12} = 600rpm. \quad (5.11)$$

De la Figura 5.1 se extrae la potencia nominal basada en la velocidad nominal anteriormente hallada. $P \approx 1650$ W entonces $P_g \approx 5100$ W, con un voltaje nominal $V=235$ V se obtiene una corriente nominal $i=7,02$ A.

El segundo método para encontrar esta potencia es utilizando (4.1) pero para una sola fase y con una pérdida estimada de 500 W, como sigue:

$$P_g = 3\left(\frac{246}{\sqrt{2}} * \frac{13}{\sqrt{2}}\right) = 4797W, \quad (5.12)$$

$$P_{g\Phi} = \frac{4797}{3} = 1599W. \quad (5.13)$$

Donde, $i = 13$ A es el valor máximo de corriente entregada por el generador y es tomado de la Tabla 4.2. Reemplazando, queda lo siguiente:

$$i = \frac{-235 + \sqrt{235^2 - \frac{4}{3}(1,76 + 377(14,55e - 3))(4297)}}{-2(1,76 + 377(14,55e - 3))} = 8,14A. \quad (5.14)$$

Comparando las corrientes obtenidas, se observa una diferencia de aproximadamente 1A, por lo tanto, se calcularán dos valores para R_L y se promediarán para obtener solo un valor,

$$R_L(i = 7, 02A) = \frac{4797 - 500}{3(7, 02)^2} = 29, 06\Omega, \quad (5.15)$$

$$R_L(i = 8, 14A) = \frac{4797 - 500}{3(8, 14)^2} = 21, 62\Omega. \quad (5.16)$$

Con estos valores entonces se procede a calcular el valor final de R_L ,

$$R_L = 25, 34\Omega. \quad (5.17)$$

5.3. Cálculos mediante las ecuaciones de Euler-Lagrange

La primera expresión que se desea representar, es la mostrada en (5.5), donde se tienen cuatro términos. Sabiendo que cada término es un tipo de energía diferente, se deben sumar todos los que sean similares. Las coordenadas generalizadas o variables independientes son la posición angular en el generador θ_g y la carga q en el circuito equivalente. Entonces para la energía cinética se tiene que:

$$T = \frac{1}{2}I_b\dot{\theta}_b^2 + \frac{4}{2}I_B(\dot{\theta}_B - \dot{\theta}_b)^2 + \frac{1}{2}I_A(\dot{\theta}_A - \dot{\theta}_b)^2 + \frac{1}{2}I_C(\dot{\theta}_C - \dot{\theta}_b)^2 + \frac{1}{2}I_D\dot{\theta}_g^2 + \frac{1}{2}I_g\dot{\theta}_g^2. \quad (5.18)$$

Cada término está asociado a la energía cinética que aporta cada pieza con su respectiva inercia. En (5.18) se observan tres términos con diferencias de velocidades angulares, esto es debido a que el tren epicicloidal tiene engranajes que rotan a velocidades diferentes con respecto a la velocidad del eje principal. En la Figura 5.2 se observa que cada disco tiene una velocidad diferente y además el brazo gira con respecto al punto fijo lo que causa que rote a otra velocidad diferente aparte de las anteriores.

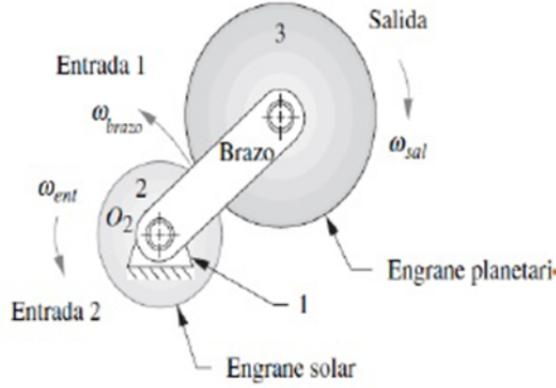


Figura 5.2: Velocidades relativas en un tren de transmisión epicicloidal.

Fuente: Adaptado por el Autor.

No se consideró ningún elemento asociado a la rigidez en el sistema (muelle o resorte) por lo tanto, no hay una energía potencial elástica V .

Para la coenergía magnética se reemplaza y se obtiene:

$$W_m^* = \frac{1}{2} L_a \dot{q}^2. \quad (5.19)$$

De la misma manera, en el circuito equivalente no se considera ningún elemento capacitivo al tratarse de un generador pequeño. Sabiendo lo anterior, la ecuación lagrangiana queda de la siguiente forma:

$$L^* = \frac{1}{2} L_a \dot{q}^2 + \frac{1}{2} I_b \dot{\theta}_b^2 + \frac{3}{2} I_B (\dot{\theta}_B - \dot{\theta}_b)^2 + \frac{1}{2} I_A (\dot{\theta}_A - \dot{\theta}_b)^2 + \frac{1}{2} I_C (\dot{\theta}_C - \dot{\theta}_b)^2 + \frac{1}{2} I_D \dot{\theta}_g^2 + \frac{1}{2} I_g \dot{\theta}_g^2, \quad (5.20)$$

y la ecuación de disipación conformada tanto por términos mecánicos y eléctricos quedaría,

$$D = \frac{1}{2} (R_a + R_L) \dot{q}^2 + \frac{1}{2} C_r \dot{\theta}_b^2 + \frac{1}{2} C_r \dot{\theta}_A^2 + \frac{1}{2} C_r \dot{\theta}_g^2. \quad (5.21)$$

Para un análisis específico en un punto o coordenada generalizada, es necesario reescribir estas ecuaciones anteriores con el fin de dejar una única variable independiente (El punto de análisis). Para lograr esto, hay que mencionar que existen expresiones que logran relacionar

las diferentes velocidades en un tren de engranajes; esto se llama relación de transmisión y explica en cuánto varía la velocidad de un engrane de entrada a otro de salida [32].

$$N_{ab} = \frac{\omega_b}{\omega_a} = \frac{Z_a}{Z_b} \quad (5.22)$$

La relación de transmisión entre un engranaje 'a' y un engranaje 'b' va a ser igual a la relación inversa de sus velocidades o igual a su relación directa del número de dientes. Sabiendo esto y las características de los engranajes, se pueden hallar todas las relaciones de transmisión posibles en la geometría del aerogenerador,

$$N_{BA} = \frac{\dot{\theta}_A - \dot{\theta}_b}{\dot{\theta}_B - \dot{\theta}_b} = \frac{50}{25} = 2,08, \quad (5.23)$$

$$N_{BE} = \frac{\dot{\theta}_E - \dot{\theta}_b}{\dot{\theta}_B - \dot{\theta}_b} = \frac{50}{124} = 0,4032, \quad (5.24)$$

$$N_{AE} = \frac{\dot{\theta}_E - \dot{\theta}_b}{\dot{\theta}_A - \dot{\theta}_b} = \frac{24}{124} = 0,1935, \quad (5.25)$$

$$N_{CD} = \frac{\dot{\theta}_g}{\dot{\theta}_A} = \frac{60}{20} = 3. \quad (5.26)$$

Las primeras 3 expresiones tienen esta forma debido a que están relacionadas siempre con respecto al eje principal de giro, el cual tiene una velocidad $\dot{\theta}_b$. La cuarta relación es común, por lo que simplemente toma en cuenta las velocidades de cada eje; por último es importante mencionar que el engranaje 'C' o corona permanece estático por lo cual su velocidad es cero facilitando cálculos posteriores.

Con ayuda de las ecuaciones anteriores, se logra llegar a la obtención de una expresión que relacione la velocidad de entrada ω_b con la velocidad de salida ω_g ,

$$\dot{\theta}_b = \frac{N_{AC}}{N_{CD}N_{AC} - N_{CD}}\dot{\theta}_g, \quad (5.27)$$

y para resumir un poco se hace una pequeña sustitución,

$$\dot{\theta}_b = N_{gb}\dot{\theta}_g. \quad (5.28)$$

Una vez teniendo presente estas cinco igualdades, se procede a reemplazar en las ecuaciones 5.20 y 5.21. Se obtiene lo siguiente al dejar todo en términos de $\dot{\theta}_g$ y factorizar:

$$L^* = \frac{1}{2} \left[I_b N_{gb}^2 + 4I_B \left(\frac{N_{gb}}{N_{BC}} \right)^2 + (I_A + I_C) \left(\frac{N_{gb}}{N_{AC}} \right)^2 + I_D + I_g \right] \dot{\theta}_g + \frac{1}{2} L_a \dot{q}^2. \quad (5.29)$$

Igualmente para resumir un poco la ecuación, se podría reescribir dejando simplemente una inercia equivalente,

$$L^* = \frac{1}{2} I_e \dot{\theta}_g + \frac{1}{2} L_a \dot{q}^2, \quad (5.30)$$

y la ecuación de disipación termina siendo:

$$D = \frac{1}{2} \left[C_r N_{gb}^2 + C_r \left(\frac{N_{gb}}{N_{BC}} \right)^2 + C_r \right] \dot{\theta}_g^2 + \frac{1}{2} (R_a + R_L) \dot{q}^2. \quad (5.31)$$

Además, se considera una resistencia equivalente,

$$R_e = R_a + R_L, \quad (5.32)$$

y nuevamente resumiendo un poco, se deja un coeficiente de amortiguación equivalente,

$$D = \frac{1}{2} C_e \dot{\theta}_g^2 + \frac{1}{2} R_e \dot{q}^2. \quad (5.33)$$

Una vez con las ecuaciones 5.30 y 5.33, se procede a encontrar las ecuaciones diferenciales que describen el sistema; para esto se trabajará de forma independiente con cada variable.

5.4. Ecuación en coordenada \dot{q}

Aplicando (5.5) se obtienen las derivadas parciales,

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = L_a \dot{q}, \frac{\partial L}{\partial q} = 0, \frac{\partial D}{\partial \dot{q}} = R_e \dot{q}, \quad (5.34)$$

y así mismo la ecuación diferencial es,

$$L_a \ddot{q} + R_e \dot{q} = V - V_b. \quad (5.35)$$

Para el análisis con cargas, el trabajo externo Q_i estará asociado a la fuente de voltaje que se halla en el circuito. V_b es la fuente de voltaje contraelectromotriz, es decir, el voltaje generado. Se podría reescribir la ecuación sabiendo lo siguiente:

$$V = 0 \quad (5.36)$$

$$V_b = K_b \dot{\theta}_g. \quad (5.37)$$

El voltaje contraelectromotriz es igual a una constante de voltaje K_b multiplicado por la velocidad en el generador, entonces al reemplazar se obtiene,

$$L_a \ddot{q} + R_e \dot{q} = -K_b \dot{\theta}_g. \quad (5.38)$$

5.5. Ecuación en coordenada $\dot{\theta}_g$

Aplicando (5.5) se obtienen las derivadas parciales,

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_g} = I_e \dot{\theta}_g, \frac{\partial L}{\partial \theta_g} = 0, \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_g} = C_e \dot{\theta}_g \quad (5.39)$$

y así mismo la ecuación diferencial,

$$I_e \ddot{\theta}_g + C_e \dot{\theta}_g = \tau - \tau_g. \quad (5.40)$$

El trabajo externo Q_i que actúa en el sistema va a ser la diferencia de dos torques; el primero

es un torque característico del generador y el segundo es el torque que se genera en el frente del aerogenerador por la acción del viento. Cada término τ se puede reemplazar por su respectiva expresión,

$$\tau \delta \theta_b = \frac{\tau}{N_{gb}} \delta \theta_g, \quad (5.41)$$

$$\tau_g = K_t i. \quad (5.42)$$

El torque en el generador es igual a una constante de torque K_T multiplicado por la corriente en el circuito equivalente. El segundo término cambia un poco debido a que el torque está actuando en la coordenada generalizada θ_b y como se ha venido mencionando, se debe dejar en términos de θ_g , es por eso que haciendo uso de (5.28) se logra cambiar de coordenada generalizada,

$$I_e \ddot{\theta}_g + C_e \dot{\theta}_g = \frac{\tau}{N_{gb}} - K_t \dot{q}. \quad (5.43)$$

5.6. Matriz de funciones de transferencia

Para conseguir un análisis rápido de este sistema haciendo uso de Matlab, se le debe proporcionar al software lo que se conoce como función de transferencia. Se dice análisis rápido, porque hay otras maneras un poco más extendidas de observar el comportamiento de estos sistemas y obtener sus múltiples respuestas.

En este punto se entiende que el sistema tiene dos coordenadas generalizadas o lo que es igual, dos variables independientes; además de esto, se apreció anteriormente que existe un trabajo externo en cada punto. Teniendo en cuenta esto, se decide representar las funciones de transferencia posibles por medio de un sistema MIMO (multiple input, multiple output) [33] el cual tiene la siguiente forma:

$$\{Y(s)\} = [G(s)] \{U(s)\}, \quad (5.44)$$

donde $Y(s)$ es una matriz de una columna que contiene todas las salidas del sistema, $G(s)$

es la matriz de funciones de transferencia y $U(s)$ es la matriz de una columna que contiene todas las entradas del sistema.

Hasta el momento se tienen los modelos matemáticos que representan el sistema completo, aunque estos están en lo que se conoce como dominio del tiempo. Cuando se trabaja con funciones de transferencia, generalmente se cambia ese dominio del tiempo a el dominio de la frecuencia; esto se realiza de una manera muy sencilla que es aplicando la transformada de Laplace a cada expresión diferencial [34].

La transformada de Laplace tiene una fórmula general que aplica para cualquier función, pero para este caso se tomarán soluciones ya desarrolladas para dos casos específicos,

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s), \quad (5.45)$$

$$\mathcal{L}\{f'(t)\} = sF(s). \quad (5.46)$$

Para este punto se hace una aclaración acerca de las variables que se desean analizar de aquí en adelante. Las variables de salida serán dos, la corriente del circuito y la velocidad angular en el alternador. Después teniendo como base estas dos variables anteriores, se podrán realizar equivalencias que relacionen otras variables como voltaje generado y torque en el alternador, esto se puede lograr si se tienen en cuenta (5.37) y (5.42),

$$i = \dot{q}, \quad (5.47)$$

$$\omega_g = \dot{\theta}_g. \quad (5.48)$$

Entonces, llevando los modelos al dominio de la frecuencia haciendo uso de (5.45) y (5.46) se obtienen las siguientes expresiones,

$$L_a s I(s) + R_e I(s) + K_b \Omega_g(s) = 0, \quad (5.49)$$

$$I_e s \Omega_g(s) N_{gb} + C_e \Omega_g(s) N_{gb} - K_t I(s) N_{gb} = T(s). \quad (5.50)$$

Esto se puede escribir en forma de matrices como se había mencionado anteriormente en (5.44),

$$\begin{bmatrix} L_a s + R_e & K_b \\ -K_t & (I_e s + C_e) N_{gb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(s) \\ \Omega_g(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ T(s) \end{bmatrix} \quad (5.51)$$

Aunque si se observa detenidamente, la estructura que tiene este arreglo está de una forma diferente y por el momento se va a representar así,

$$[H(s)] \{Y(s)\} = \{U(s)\}. \quad (5.52)$$

Para que el arreglo cumpla con la estructura de un sistema MIMO, es necesario hallar la matriz inversa de $H(s)$, pero esto será con ayuda del comando *inv()* de Matlab. Esta matriz final $inv(H)$ contiene las diferentes funciones de transferencia, que relacionan las variables de entrada con las variables de salida del sistema del aerogenerador. De esta manera se pueden hacer observaciones rápidas sobre la respuesta y comportamiento de estas variable.

5.7. Potencia y torque de entrada

Continuando con la obtención de datos importantes, surge la pregunta ¿Cuánta potencia se extrae de un aerogenerador? Para ello se recurre a la siguiente expresión tal como se menciona en [35],

$$P = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p(\beta, \lambda). \quad (5.53)$$

La ecuación (5.53) representa la potencia que se puede extraer del viento en un generador eólico donde, ρ es la densidad del aire, A es el área de frente del aerogenerador, V_w es la velocidad del viento y C_p es el coeficiente de potencia. Esta potencia a su vez es equivalente a el torque multiplicado por la velocidad angular [32],

$$P = \tau \omega. \quad (5.54)$$

En la Figura 5.3 se presenta el diagrama principal del sistema realimentado, esta es la misma forma como se va a graficar en la herramienta Simulink. Como se puede apreciar en dicha figura, en la entrada se presenta el torque de entrada que se puede obtener simplemente dividiendo la potencia que produce el aerogenerador entre la velocidad de giro de entrada (5.56).

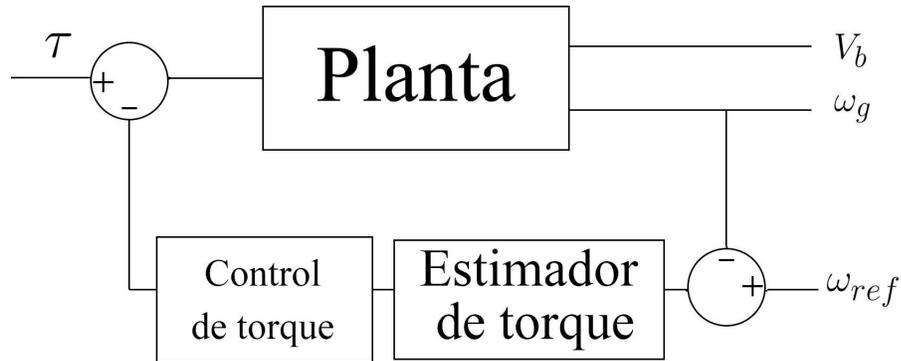


Figura 5.3: Diagrama del sistema realimentado

Fuente: Autor.

$$\tau = \frac{P}{\omega_b}, \quad (5.55)$$

$$\tau = \frac{1}{2\omega_b} \rho A v_w^3 C_p(\beta, \lambda). \quad (5.56)$$

A continuación se analizará cada variable de (5.56) para poder encontrar la señal de entrada que corresponde al torque, justo como indica la Figura 5.3.

5.7.1. Torque de entrada

Para comenzar, se procede a encontrar una expresión que proporcione el valor de ω_b ; este valor se puede encontrar de una manera fácil si se recurre a (5.28),

$$\omega_b = N_{gb}\omega_g = 0,08 * 600 = 48rpm. \quad (5.57)$$

Esta velocidad de entrada ω_b va a tener un sentido contrario a la velocidad ω_g y la misma ecuación lo demuestra al hallar la relación de transmisión N_{gb} . En el caso que el torque tenga un valor negativo quiere decir que al igual que la velocidad, tiene un sentido contrario.

Un punto importante de mencionar, es que los valores en rpm deben ser convertidos a rad/s para poder operar sin problemas con otras unidades del SI (Sistema Internacional).

El siguiente dato es ρ o densidad del aire. Este valor es sencillo de encontrar, pues a condiciones normales y teniendo en cuenta factores como la temperatura en la ciudad, este valor es $\rho=1.2041 \text{ kg}/m^3$.

El siguiente dato corresponde al área del frente del aerogenerador. En la Tabla 4.1 se encuentra que el radio tiene un valor de 5 m, así que con ayuda de la fórmula del área de un círculo se puede hallar su valor,

$$A = \pi r^2 = \pi * 5^2 = 78,54m^2. \quad (5.58)$$

El siguiente dato es uno de los más importantes, pues se trata de la velocidad del viento que coincide perpendicularmente con el área anteriormente mencionada. Se le considera especial porque en la teoría este dato está cambiando de valor constantemente; por lo tanto, como se ha mencionado en este documento, este dato va a variar dentro de un rango y podrá ser modificado a gusto de la persona que utilice esta herramienta,

$$0 < v_w \leq 10m/s.$$

Por último, el coeficiente de potencia que fue demostrado por el alemán Albert Betz en el año 1918, el cual probó que de una turbina eólica como máximo el 59,26 % de la energía cinética del viento se convierte en energía mecánica [36]. Este coeficiente corresponde a una función que depende de la relación de velocidad de punta λ y el ángulo de ataque β . λ es la relación entre la velocidad en el extremo de la hélice y la velocidad del viento [37] [38],

$$\lambda = \frac{\omega_b r}{v_w}. \quad (5.59)$$

La función del coeficiente de potencia o factor de potencia se expresa a continuación,

$$C_p = c_1(c_2\lambda_i - c_3\beta - c_4)e^{-c_5\lambda_i} + c_6\lambda. \quad (5.60)$$

En la función C_p aparecen seis coeficientes más, desde C_1 hasta C_6 . Estos valores dependen de la geometría de la hélice y es algo que se profundiza más en los parámetros de diseño de estas piezas como ya se mencionó. Por esta razón se decidió tomar unos valores ya previamente calculados y que se utilizan en la mayoría de casos para aerogeneradores con una geometría similar a esta [37].

También notar que se presenta un nuevo factor λ_i que está definido por:

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}, \quad (5.61)$$

así que reemplazando los valores de los coeficientes, la función C_p queda de la siguiente manera:

$$C_p = 0,52(116\lambda_i - 0,4\beta - 5)e^{-21\lambda_i} + 0,0068\lambda. \quad (5.62)$$

5.8. Diagrama de bloques en Simulink

Ya que el sistema está descrito por ecuaciones diferenciales, se puede trabajar fácilmente en un diagrama de bloques en Simulink. En la Figura 5.3 se muestra un bloque llamado “Planta”, dentro de este bloque estarán las ecuaciones diferenciales pero representadas en sub-bloques. Para lograr plasmar estos diagramas de manera fácil, se cambian un poco las ecuaciones (5.38) y (5.43), dejando de un lado de la igualdad únicamente el término que contiene a la variable de orden más alto,

$$L_a \ddot{q} = -K_b \dot{\theta}_g - R_a \dot{q}, \quad (5.63)$$

$$I_e \ddot{\theta}_g = \frac{\tau}{N_{gb}} - K_t \dot{q} - C_e \dot{\theta}_g. \quad (5.64)$$

Una vez teniendo las dos ecuaciones anteriores, es sencillo representar los términos que están a la izquierda del igual como una sumatoria de los términos de la derecha del igual como se muestra en la Figura 5.4.

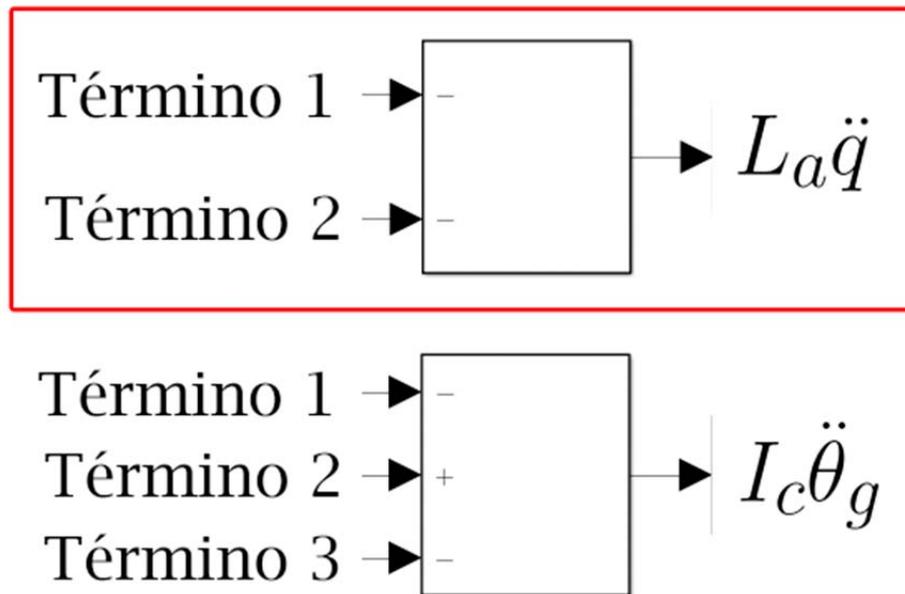


Figura 5.4: Ecuaciones diferenciales en diagrama de bloques

Fuente: Autor.

Es necesario despejar por completo las variables de segundo orden. Entonces los términos a la izquierda del igual se dividen por L_a e I_e respectivamente para así obtener lo mencionado anteriormente, esto se demuestra en la Figura 5.5.

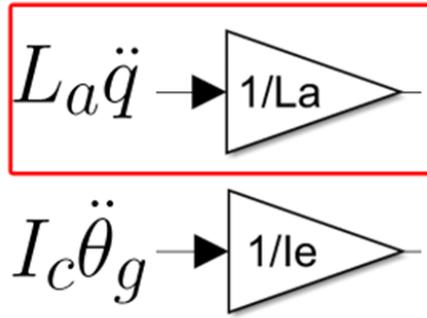


Figura 5.5: Variables de segundo orden

Fuente: Autor.

Además, teniendo dichas variables, en Simulink es sencillo aplicar un bloque de integración para obtener las variables correspondientes a las salidas del sistema i y ω_g . La Figura 5.6 da una idea de cual es este bloque integrador.

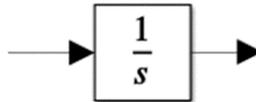


Figura 5.6: Bloque integrador

Fuente: Autor.

Teniendo lo anterior y siguiendo con la construcción del resto de términos, se concluyó el diagrama que corresponde a la planta “Aerogenerador”.

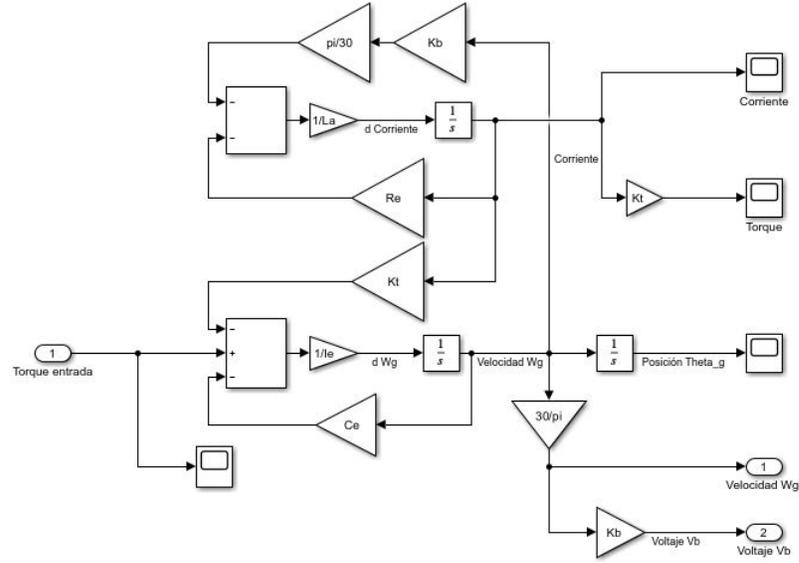


Figura 5.7: Diagrama de bloques representativo del aerogenerador

Fuente: Autor.

En el diagrama de la Figura 5.7 se observa una señal de entrada que corresponde al torque de entrada τ en la parte izquierda y también otras señales de salida como la velocidad angular ω_g , el torque en el generador τ_g y el voltaje generado V_b en la parte derecha.

En la Figura 5.3 se aprecia un lazo de realimentación compuesto por un par de elementos que son: el torque estimado y el control de torque.

5.8.1. Torque estimado y control de torque

Para el cálculo de estas secciones se tomó como guía un control de torque para las variable de una turbina eólica en todos sus regímenes de operación. [39]. El bloque control de torque tendrá como entrada la velocidad angular de salida y una velocidad de referencia dada por el usuario; principalmente esta velocidad de referencia será la misma calculada en el generador (ver Ecuación 5.11) ya que lo que se desea es que se mantenga en un régimen estacionario. También será necesario un torque estimado que previamente debe ser calculado.

Para hallar la expresión que permitirá la obtención de dicho torque, se considera un sistema aerogenerador de una única masa,

$$I_e \dot{\omega}_g = \tau - C_e \omega_g - \tau_g. \quad (5.65)$$

El control que se aplica está elaborado para que el error de seguimiento de velocidad sea cero y como ya se mencionó, esto se realiza con la velocidad ya que el torque por si solo no puede ser medido. Por lo tanto se tiene la siguiente expresión,

$$\omega_{ref}(t+k) - \omega_g(t+k) = 0. \quad (5.66)$$

El predictor de velocidad puede ser escrito de una forma aproximada haciendo uso de la expansión de series de Taylor. El término ω_g quedaría de la siguiente manera,

$$\omega_g(t+k) = \omega_g(t) + k\dot{\omega}_g(t). \quad (5.67)$$

De (5.65) se despeja la variable de orden más alto y se reemplaza en (5.67),

$$\omega_g(t+k) = \omega_g(t) + \frac{k}{I_e}(\tau - C_e\omega_g - \tau_g). \quad (5.68)$$

Nuevamente se procede a reemplazar (5.68) en (5.66) para obtener la siguiente expresión,

$$\omega_{ref}(t) + k\dot{\omega}_{ref}(t) - \omega_g(t) - \frac{k}{I_e}(\tau - C_e\omega_g(t) - \tau_g) = 0. \quad (5.69)$$

Lo siguiente que hay que realizar, es el despeje de la variable τ_g ,

$$\tau_g = -\frac{I_e}{k}(\omega_{ref} - \omega_g) - I_e\dot{\omega}_{ref} - C_e\omega_g + \tau. \quad (5.70)$$

Hasta el momento, la Ecuación 5.70 representa el control de torque en donde se conocen la mayoría de términos excepto τ que corresponde a un torque estimado. Para la obtención de este término se parte de (5.65) que se reescribe de la siguiente manera,

$$\frac{1}{I_e}\tau = \dot{\omega}_g + \frac{C_e}{I_e}\omega_g + \frac{1}{I_e}\tau_g. \quad (5.71)$$

Después de consultar acerca de este tipo de controladores, se determina una expresión para un tipo de estimador basado en el error de torque,

$$\dot{\hat{\tau}} = p \frac{1}{I_e} (\tau - \hat{\tau}). \quad (5.72)$$

Reemplazando (5.72) en (5.71) se obtiene la siguiente expresión,

$$\dot{\hat{\tau}} = p \left(\dot{\omega}_g + \frac{C_e}{I_e} \omega_g + \frac{1}{I_e} \tau_g \right) - p \frac{1}{I_e} \hat{\tau}. \quad (5.73)$$

Teniendo esto, se considera la expresión de control de torque (5.70), solo que esta vez el torque presente en tal ecuación es $\hat{\tau}$,

$$\tau_g = -\frac{I_e}{k} (\omega_{ref} - \omega_g) - I_e \dot{\omega}_{ref} - C_e \omega_g + \hat{\tau}. \quad (5.74)$$

Para obtener un acercamiento mayor al torque estimado, solamente es necesario reemplazar τ_g en (5.73). Quedará una expresión de primer orden que posteriormente se integrará,

$$\dot{\hat{\tau}} = -\frac{p}{k} (\omega_{ref} - \omega_g) - p (\dot{\omega}_{ref} - \dot{\omega}_g), \quad (5.75)$$

$$\int \dot{\hat{\tau}} dt = -\frac{p}{k} \int (\omega_{ref} - \omega_g) dt - p \int (\dot{\omega}_{ref} - \dot{\omega}_g) dt, \quad (5.76)$$

$$\hat{\tau} = -\frac{p}{k} \int (\omega_{ref} - \omega_g) dt - p (\omega_{ref} - \omega_g). \quad (5.77)$$

Ahora si se puede reescribir por completo la expresión del controlador de torque,

$$\tau_g = -\frac{I_e}{k} e_\omega(t) - I_e \dot{\omega}_{ref} - C_e \omega_g - \left(\frac{p}{k} \int e_\omega(t) dt + p e_\omega(t) \right), \quad (5.78)$$

donde,

$$e_\omega(t) = \omega_{ref}(t) - \omega_g(t). \quad (5.79)$$

Los valores de p y k son los recomendados, 10 y 0,01 respectivamente en [39].

El diagrama de bloques que representa esta sección de torque estimado y control de torque

se puede apreciar en la Figura 5.8.

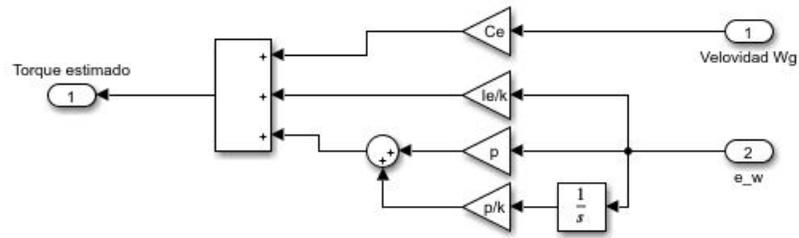


Figura 5.8: Diagrama de bloques con variables de entrada y salida

Fuente: Autor.

Con esto se da por concluido el bloque de control de torque. En la Figura 5.9 se observa todo el sistema completo en Simulink.

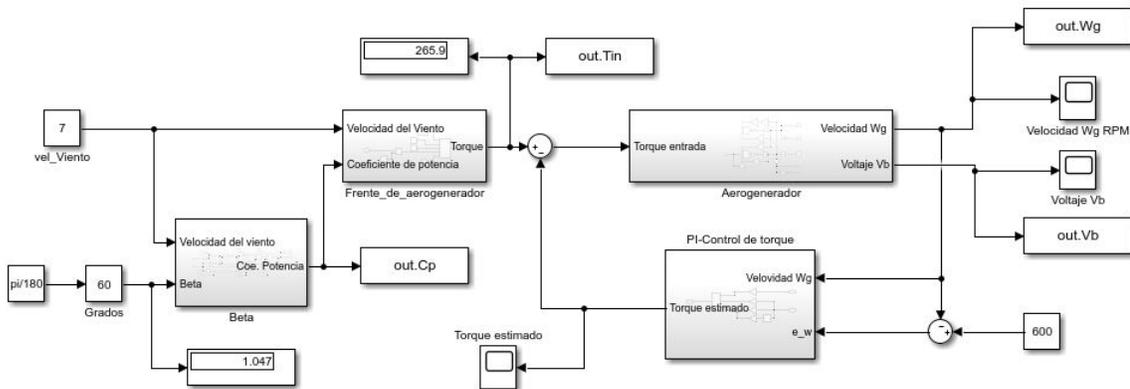


Figura 5.9: Diagrama de bloques con variables de entrada y salida

Fuente: Autor.

5.8.2. Bloque de factor de potencia

En este punto se tiene conocimiento de los bloques que hacen parte del lazo de realimentación, pero hace falta comprender la parte que conforma la señal de entrada a dicho lazo; y en realidad es bastante sencilla la construcción de esta sección de diagrama. Si se recurre a (5.56) se observa que es una multiplicación de varios factores de los cuales ya se habló anteriormente, esto se puede llevar a la construcción con bloques en Simulink, constituyendo el bloque llamado “Frente de aerogenerador” en la Figura 5.9.

Al expresar cada factor con un bloque, queda el sub-bloque que se observa en la Figura 5.10.

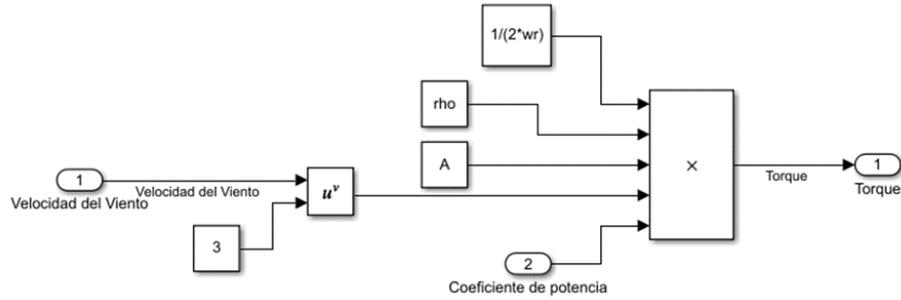


Figura 5.10: Sub-Bloque torque de entrada

Fuente: Autor.

Entre todos los valores que se observan allí en la Figura 5.10, resaltan dos en especial: velocidad del viento y coeficiente de potencia; estos valores se asignan para el caso de la velocidad y se calculan para el caso del coeficiente C_p .

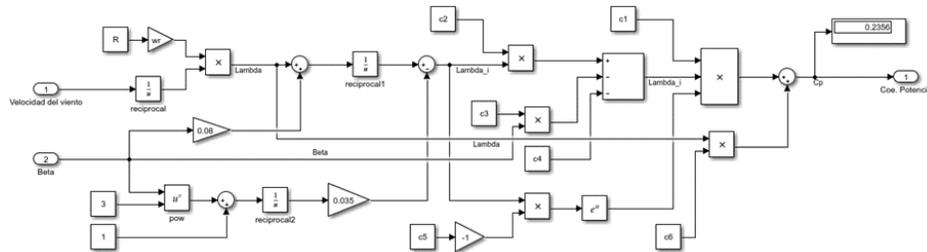


Figura 5.11: Sub-Bloque Factor de potencia C_p

Fuente: Autor.

En la Figura 5.11 se presencia el sub-bloque encargado de calcular el valor para C_p y está conformado por una cantidad de bloques mucho mayor que los anteriores sub-bloques ya que lo que se debe lograr es representar (5.60) en Simulink. Igualmente, resaltan dos variables de entrada en la parte izquierda del diagrama: velocidad del viento y beta o ángulo de ataque.

Aclarar que se configuró un bloque para que sea el encargado de convertir la unidad de grados a radianes de la variable β , para poder operar todo en un mismo sistema de unidades.

El usuario podrá variar estos dos datos de entrada mencionados anteriormente desde la interfaz gráfica. Es importante mencionar que para ambas variables existe un rango de valores el cual ya se ha venido mencionando en este documento.

Por último, la Figura 5.9 también presenta algunos bloques especiales que realizan tareas como: graficar señales, exportar datos y mostrar variables.

Capítulo 6

Interfaz gráfica de usuario y resultados

Para el desarrollo de la interfaz en Matlab, se hará uso del asistente de interfaces “GUIDE” que provee un entorno donde se puede elaborar la parte visual de la interfaz, la parte interactiva se realizará después utilizando la programación orientada a acciones que requieren este tipo de interfaces.

Antes de todo, se realizó un boceto de la interfaz para tener una idea de los componentes visuales y la distribución que van a tener en el espacio de dicha interfaz. En la Figura 6.1 se puede apreciar la primera idea que se concibió.

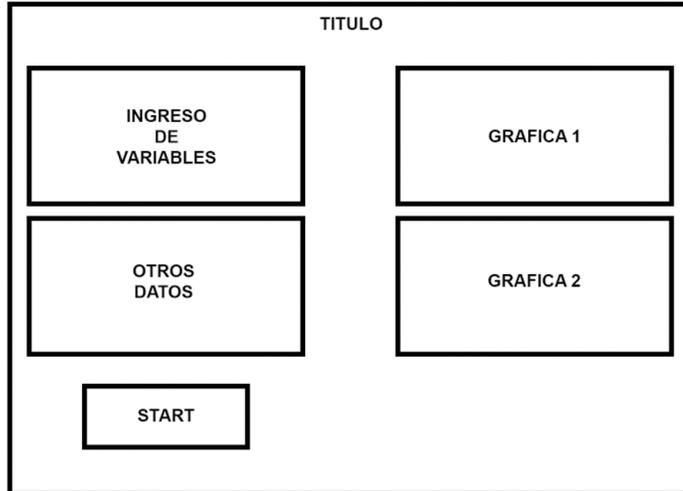


Figura 6.1: Boceto de la interfaz gráfica

Fuente: Autor.

Teniendo la idea principal se procede a colocar cada elemento necesario en el espacio de trabajo de Matlab guide.

Este entorno dispone de varios tipos de elementos, entre ellos: controles deslizantes, cuadros de texto editables y no editables, botones y espacios para gráficos. Estos serán los que se utilizarán principalmente para el proyecto.

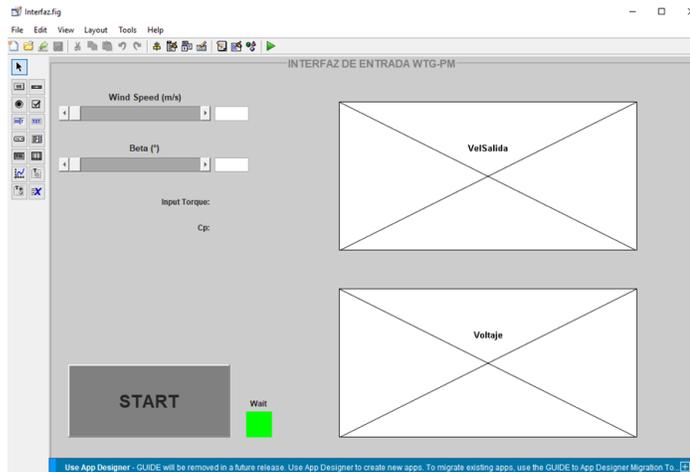


Figura 6.2: Entorno Matlab Guide

Fuente: Autor.

En la Figura 6.2 se observa el entorno de Matlab guide con los elementos que conformarán la interfaz de usuario. Es importante que el resultado final sea fácil de manejar y de entender,

es por ello que se adecuó de tal manera que tenga una interpretación sencilla de su uso.

Al terminar el desarrollo en Matlab guide, se crea un nuevo script con las funciones de respuesta (Callbacks) de varios elementos utilizados. Una función de respuesta en programación orientada a acciones es un espacio en el script que corresponde a un elemento de guide, en donde se declaran acciones para que sean ejecutadas al momento que se detecte una variación en el valor del elemento.

Además de estas funciones de respuesta, también se crea la función “inicio” (Opening). Esta función se ejecuta en el mismo instante en que se da inicio a la interfaz, es por este motivo que dentro de esta función se declararán todas las variables usadas en el programa de Simulink y se ejecutará la acción de correr el programa una sola vez. Igualmente, dentro de esta función se asignarán características a los elementos de guide como: colores, textos, rangos, propiedades, entre otras.

Para identificar cada elemento dentro del script de Matlab, se le asigna un tag o etiqueta a cada elemento dentro de guide, de esta manera es fácil distinguir entre las diferentes funciones de respuesta.

6.1. Programación de los elementos de guide

En la Figura 6.3a se muestra el código de programación del elemento que controla la variable “Velocidad del viento”. La primera línea de código guarda el valor que tiene el respectivo control deslizante en la variable V_w . Este valor es un dato numérico, así que se transforma en un dato tipo cadena para poder ser utilizado después. La segunda línea en el código permite que se muestre el valor de la variable V_w en el elemento “Cuadro de texto editable” que se encuentra en la parte derecha del control deslizante, esto se diseña así con el fin de que el usuario pueda tener un mejor control de la variable. La tercera línea en el código realiza el cambio de valor del bloque respectivo en simulink, para este caso, el bloque llamado “vel_Viento” que se observa en el costado izquierdo de la Figura 5.9. Por último, la línea final hace una actualización del elemento actual.

```
Vw=num2str(get(handles.Wind,'Value'));
set(handles.TextVel,'String',Vw);

set_param('Planta_Aerogenerador/vel_Viento','Value',Vw);
guidata(hObject,handles);
```

(a)

```
beta=num2str(get(handles.Beta,'Value'));
set(handles.TextBeta,'String',beta);

set_param('Planta_Aerogenerador/Grados','Gain',beta);
guidata(hObject,handles);
```

(b)

Figura 6.3: Programación de sliders en Matlab

Fuente: Autor.

Este mismo procedimiento se realiza en el otro control deslizante como se observa en la Figura 6.3b, aunque con este elemento se varía el ángulo de ataque beta.

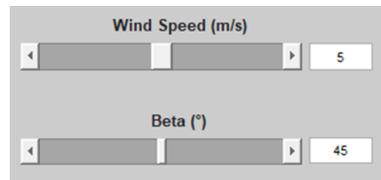


Figura 6.4: Panel de sliders y edit Text

Fuente: Autor.

La interfaz no solo permitirá cambiar los valores desde los controles deslizables, sino que el usuario también podrá ingresar un valor en los cuadros de texto editables y mientras dicho valor se encuentre dentro del rango, la variable correspondiente tomará el valor asignado en el cuadro de texto asociado. En resumen, las variables cambiarán su valor en más o menos una unidad por cada clic en los controles deslizables o cambiarán directamente al valor que se digite en el cuadro de texto editable.

```

velocidad=str2double(get(handles.TextVel,'String'));
v=get(handles.TextVel,'String');
if 0<=velocidad && velocidad<=10
    set(handles.Wind,'Value',velocidad);
    set_param('Planta_Aerogenerador/vel_Viento','Value',v);
    guidata(hObject,handles);
elseif velocidad<0
    set(handles.Wind,'Value',0);
    set_param('Planta_Aerogenerador/vel_Viento','Value','0');
    guidata(hObject,handles);
else
    set(handles.Wind,'Value',10);
    set_param('Planta_Aerogenerador/vel_Viento','Value','10');
    guidata(hObject,handles);

```

(a)

```

beta=str2double(get(handles.TextBeta,'String'));
b=get(handles.TextBeta,'String');
if 0<=beta && beta<=90
    set(handles.Beta,'Value',beta);
    set_param('Planta_Aerogenerador/Grados','Gain',b);
    guidata(hObject,handles);
elseif beta<0
    set(handles.Beta,'Value',0);
    set_param('Planta_Aerogenerador/Grados','Gain','0');
    guidata(hObject,handles);
else
    set(handles.Beta,'Value',90);
    set_param('Planta_Aerogenerador/Grados','Gain','90');
    guidata(hObject,handles);

```

(b)

Figura 6.5: Programación de edit text

Fuente: Autor.

En la programación de los cuadros de texto editables, primero se deben tener en cuenta los rangos. La primera variable tiene un rango de 0 a 10 m/s mientras que la segunda variable tiene un rango de 0 a 90°. Estos rangos son importantes para poder realizar las diferentes condiciones que se muestran en ambas partes de la Figura 6.5.

Al igual que para los anteriores elementos, en las funciones de los cuadros de texto editable lo primero que se solicita es el valor tipo cadena que esté en ellos; este valor se guarda en dos variables diferentes “velocidad” y “v”, solamente que en la primera variable se almacena como tipo numérico y en la segunda como tipo cadena.

Después de haber almacenado este valor, se presentan tres condiciones: la primera es que cumpla y esté dentro del rango, la segunda es que esté por debajo del menor número del rango y la tercera es que esté por encima del mayor número del rango.

En el primer caso se toma el valor numérico del cuadro de texto y se modifica el control

deslizante respectivo asignándole dicho valor. Además, al igual que en los anteriores elementos de la Figura 6.3, el valor del bloque en simulink es cambiado por el valor tipo cadena que se almacenó con anterioridad. Lo anterior sucede en el segundo y tercer caso, solo que en el segundo el valor que se asigna es cero y en el tercero el valor que se asigna es el máximo del rango. La Figura 6.4 deja ver la interacción entre estos elementos diferentes, ya que se observan en los cuadros de texto los valores 5 y 45, que son exactamente el valor de la mitad de cada rango y se demuestran con una barra en el centro de cada slider.



Figura 6.6: Botón de inicio de simulación

Fuente: Autor.

El elemento de la Figura 6.6 es el encargado de empezar una simulación del sistema con los valores de las variables que se encuentren en la parte superior de la interfaz, los que se presentaron anteriormente. En la función de respuesta de este elemento se va a tener lo siguiente:

- Una acción de correr para el sistema en simulink.
- Cambio de la señal de color verde. Esta cambiará a rojo y su mensaje será “Wait” (espere).
- Se realizará una pausa de 5 segundos en el código con el fin de que la simulación se ejecute completamente.
- Los valores que se obtengan de simulink se almacenarán en diferentes variables. Los diferentes datos son: arreglo de tiempo, arreglo de velocidad en el generador, arreglo de voltaje generado, valor del torque de entrada y valor del coeficiente de potencia del viento.
- Se mostrarán los valores del torque de entrada y coeficiente de potencia como se observa en la Figura 6.7.
- Se realizarán las gráficas de velocidad angular en el generador y voltaje generado. (Todo

en un tiempo de simulación de 10 segundos). Se puede ver un ejemplo en la Figura 6.8.

- Por último la señal que estaba de color rojo cambiará a verde y avisará al usuario que puede volver a cambiar los datos de entrada para realizar una nueva simulación.

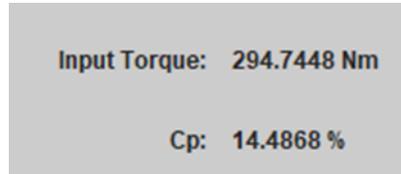


Figura 6.7: Panel de resultados de datos numéricos

Fuente: Autor.

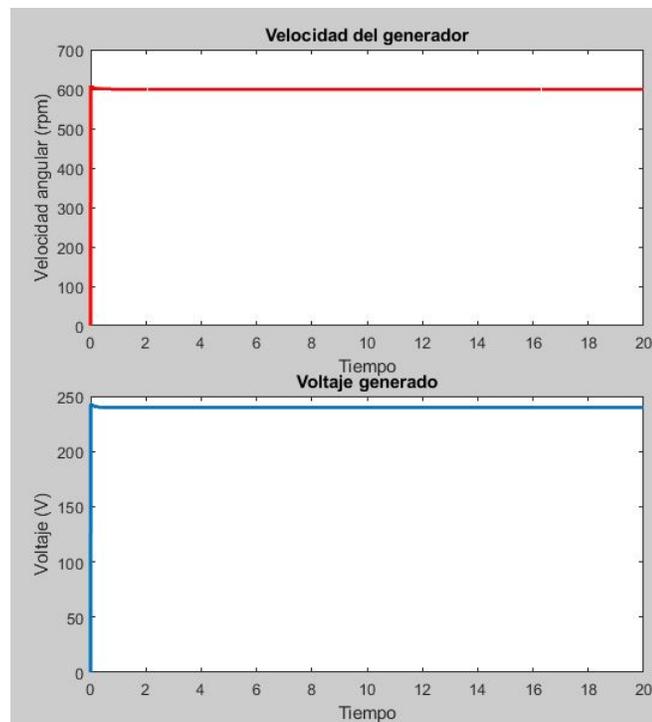


Figura 6.8: Panel de observación de gráficas

Fuente: Autor.

El código de programación de cada una de las instrucciones anteriores estará dentro de la función *respuesta del botón* tal como se muestra en la Figura 6.9. Las líneas de código siguen el mismo orden que la lista de instrucciones descrita previamente.

```

set_param(gcs, 'SimulationCommand', 'Start');
set(handles.Delay, 'String', 'Wait');
set(handles.Color, 'Background', 'red');
pause(5);
Salida=evalin('base', 'out')
time=Salida.tout;
W_g=Salida.Wg.*-1;
V_b=Salida.Vb.*-1;
T_in=num2str(Salida.Tin);
C_p=num2str(Salida.Cp*100);
% Datos numéricos
set(handles.InText, 'String', strcat(T_in, ' Nm'));
set(handles.CpText, 'String', [C_p, ' %']);
% Gráficas
plot(handles.VelSalida, time, W_g, 'LineWidth', 2, 'Color', 'red');
title(handles.VelSalida, 'Velocidad del generador');
xlabel(handles.VelSalida, 'Tiempo');
ylabel(handles.VelSalida, 'Velocidad angular (rpm)');
plot(handles.Voltaje, time, V_b, 'LineWidth', 2);
title(handles.Voltaje, 'Voltaje generado');
xlabel(handles.Voltaje, 'Tiempo');
ylabel(handles.Voltaje, 'Voltaje (V)');
% Luz verde y roja
set(handles.Delay, 'String', 'Ready');
set(handles.Color, 'Background', 'green');

```

Figura 6.9: Programación del botón iniciar

Fuente: Autor.

6.2. Resultados

Para la primera prueba se asignaron los siguientes valores,

$$V_w = 5m/s,$$

$$\beta = 45^\circ.$$

Estos son los valores medios en cada uno de los rangos tanto de velocidad del viento como del ángulo beta. Además, en páginas web como *Windfinder* se tiene una estimación de la velocidad del viento promedio en Bogotá durante el año 2022 y está al rededor de los 5m/s [40].

Con estos valores se obtuvieron los siguientes resultados:

- Torque de entrada de 277,38 Nm.
- Coeficiente de potencia de viento de 23,6 %.
- Una velocidad angular de salida de 600 rpm en aproximadamente 5 s (ver Figura 6.11).
- Un voltaje generado de 240 V en los mismos 5 s (ver Figura 6.11).

Los valores de torque de entrada y coeficiente de potencia, se obtienen propiamente del diagrama de Simulink. En la Figura 6.10 se pueden apreciar bloques de salida.

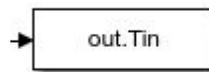


Figura 6.10: Bloque de torque de entrada.

Fuente: Autor.

La función de esos bloques *Out* es extraer el valor en ese punto del diagrama de bloques y guardarlo en una variable. Así es como se logran obtener esos dos valores en especial.

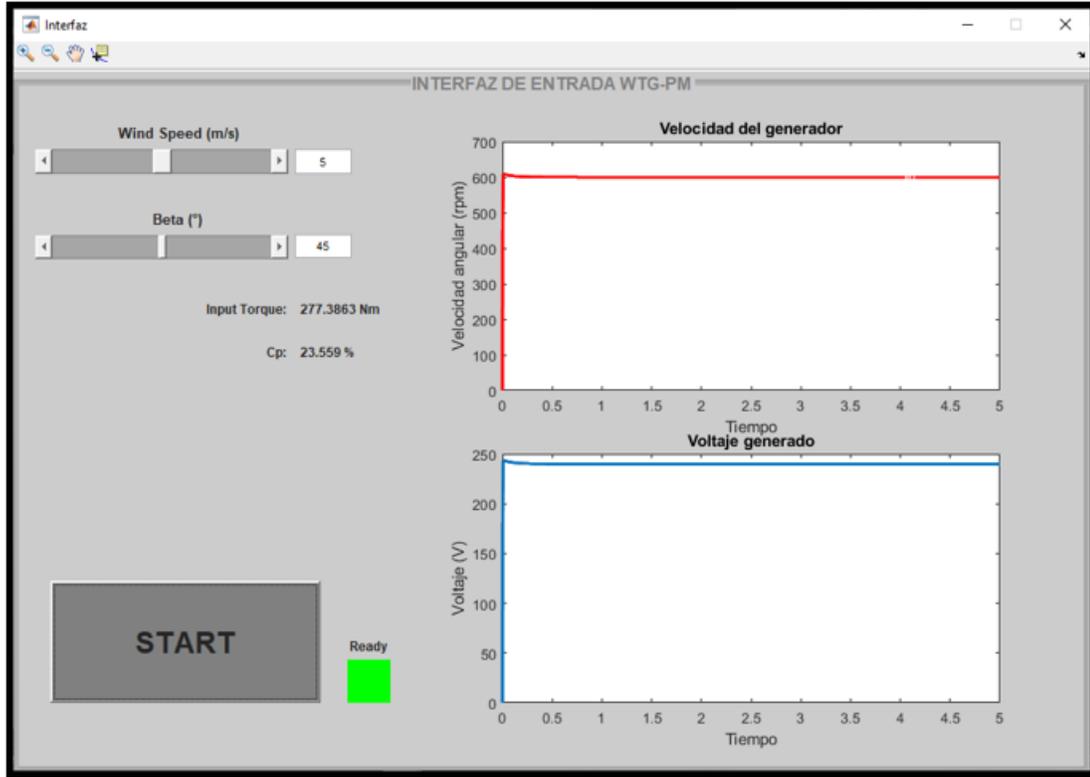


Figura 6.11: Resultados de la prueba #1

Fuente: Autor.

Se debe mencionar que la velocidad de referencia se mantiene en 600 rpm, esto produce que el torque estimado aumente o disminuya sin importar cual sea el torque generado por la acción del viento y con la finalidad de que la velocidad angular en el rotor del generador se mantenga en un valor constante.

Se procede a hacer otra prueba pero esta vez buscando un mayor C_p . Un mayor coeficiente de potencia quiere decir mayor potencia extraída del viento. Se asigna un valor menor de velocidad del viento y un ángulo de ataque de cero, lo que produce que el área del frente del aerogenerador aumente,

$$V_w = 4m/s,$$

$$\beta = 0^\circ,$$

y se obtiene que para estos datos de simulación, el torque de entrada es $\tau = 241,65 \text{ Nm}$ y un $C_p = 40\%$ (ver Figura 6.12). Si se compara con los resultados anteriores, el torque disminuye debido a que hay mayor área y esto produce mayor velocidad angular de entrada. El coeficiente de potencia alcanza uno de los valores más altos para este aerogenerador.

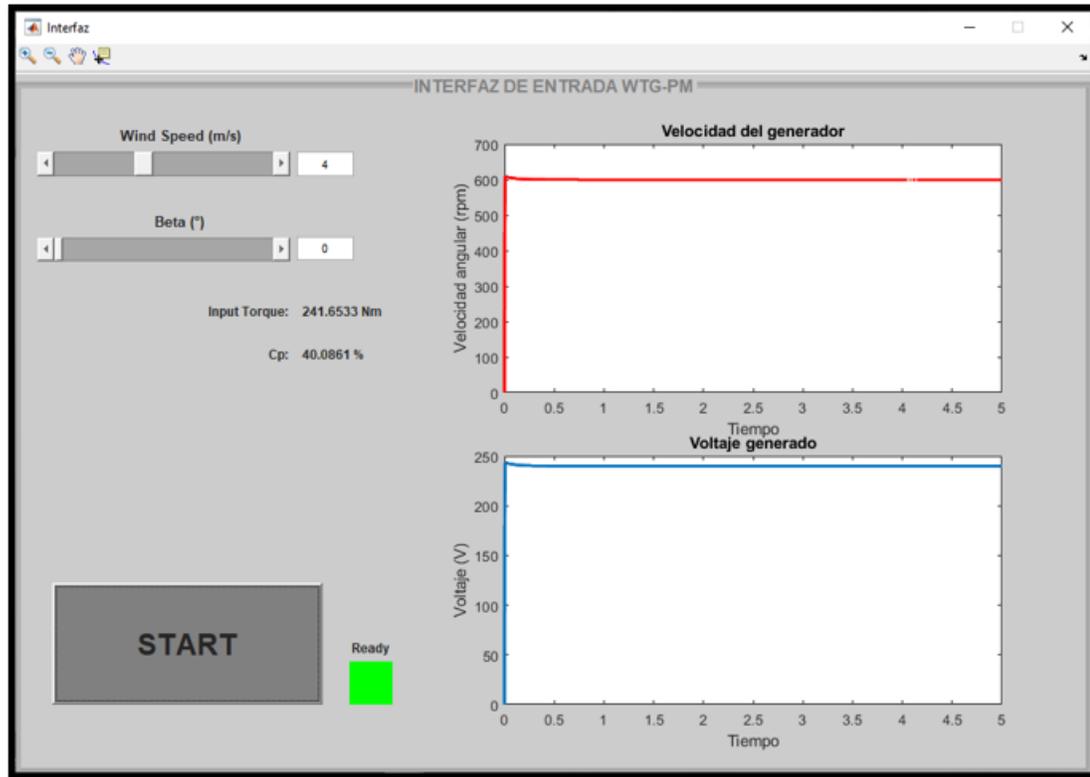


Figura 6.12: Resultados de la prueba #2

Fuente: Autor.

Estas pruebas anteriores se realizaron a partir de un dato de velocidad de viento constante. Además, el estimador de torque produce que la respuesta del sistema sea prácticamente inmediata, algo que en la simulación se puede entender como un cambio de estado del aerogenerador, donde en principio no recibe viento y de manera inmediata ese valor de viento cambia positivamente causando una velocidad en el generador y un voltaje generado casi instantáneo. Esto anterior se puede permitir en una simulación, pero en la vida real ese comportamiento no es tan cierto.

Se realizó otra prueba de la herramienta computacional, pero cambiando los valores de las constantes k y p del estimador de torque, se les asignaron los valores de 1 y 0.1

respectivamente. Esto se hizo con el fin de obtener una respuesta mas realista en las salidas. Además en esta misma prueba no solo se simuló con un valor constante de velocidad de viento, sino que se agregó una señal sinusoidal que representa una pequeña variación en el viento, esta señal se puede observar en la Figura 6.13.

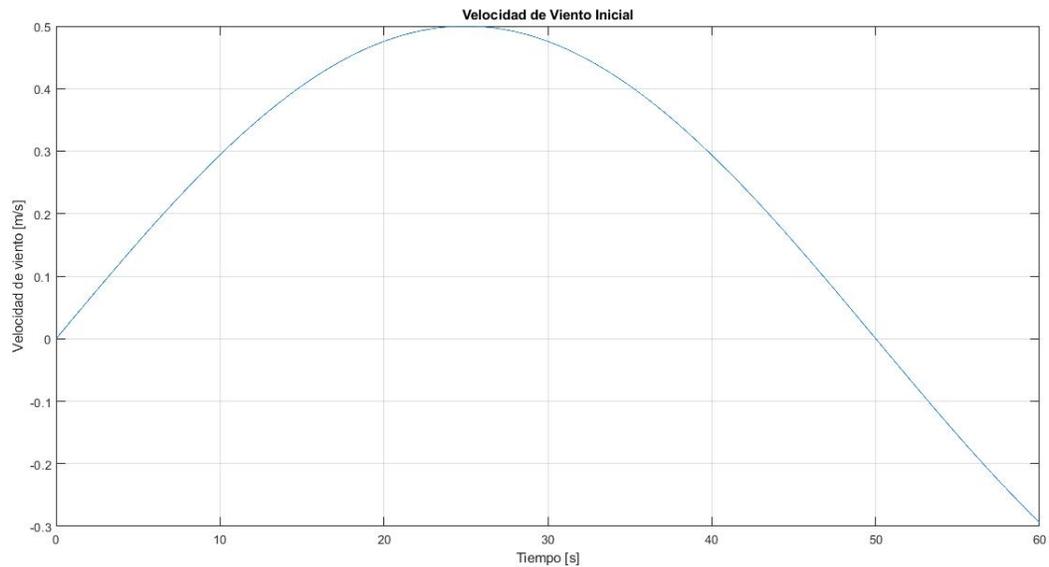


Figura 6.13: Gráfica de la variación en la velocidad del viento

Fuente: Autor.

La señal corresponde a $y = 0,5\sin(2\pi * 0,01t)$ y se acopló en el diagrama de bloques de Simulink por medio un generador de señales como se observa en la Figura 6.14. Por lo tanto, el valor de velocidad de viento que se ingresa a la interfaz se suma con esta variación dando como resultado una señal sinusoidal que oscila muy cerca a dicho valor de entrada.

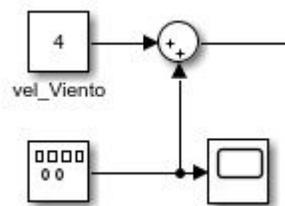


Figura 6.14: Bloque generador de señales

Fuente: Autor.

La Figura 6.15 muestra el comportamiento de las salidas en un tiempo de 60 segundos, con

datos de entrada $v_w = 4$ m/s y $\beta = 0$. Los datos de τ y C_p esta vez no son constantes, por lo que se deben representar en gráficas haciendo que la interfaz deba modificarse.

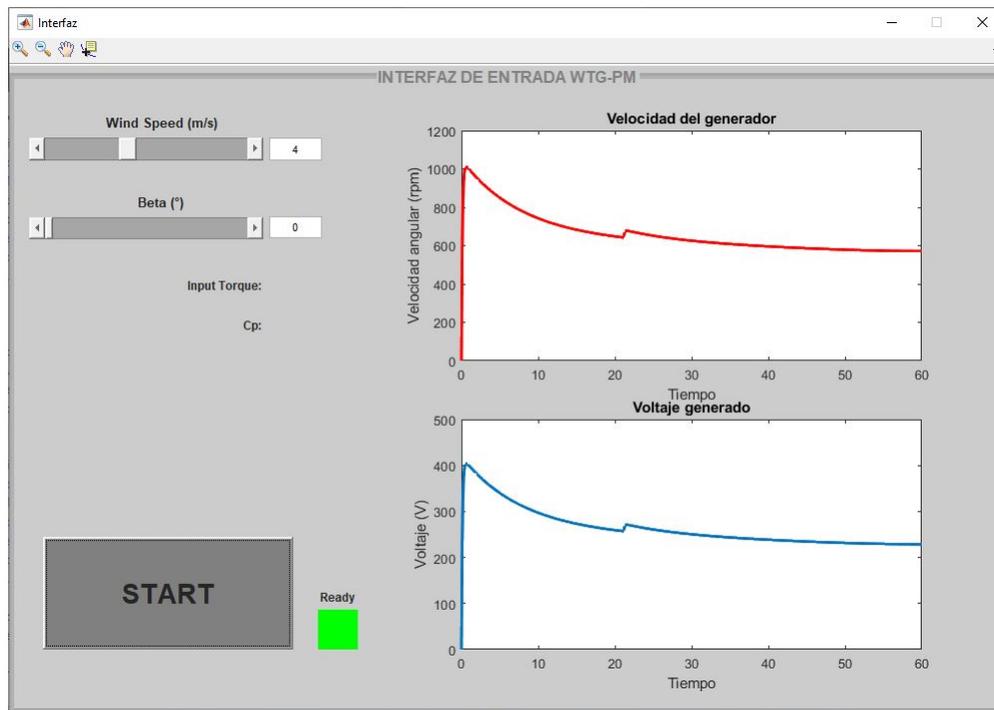


Figura 6.15: Resultados de la prueba #3

Fuente: Autor.

Ahora hablando del comportamiento de las señales de salida, estas muestran un valor constante después de un tiempo de aproximadamente 60 segundos, los cuales son los valores deseados. Se puede observar también un sobre-impulso al inicio debido a que el aerogenerador parte de un estado en reposo, esto es posible ya que si se observa el catálogo del alternador, la velocidad máxima que puede alcanzar el rotor es de 1500 rpm y el voltaje generado sería el máximo permitido. El tiempo de asentamiento se acerca mucho más a la realidad esta vez. A continuación en la Figura 6.16 se presentan los resultados de un aerogenerador con características similares y conectado a un sistema de conversión y a su vez conectado a la red eléctrica. Por tal motivo se puede apreciar en [41] la presencia de circuitos de potencia encargados de hacer la conversión precisa para un excelente acople con la red eléctrica. La Figura 6.16 se presenta con el fin de hacer una comparación

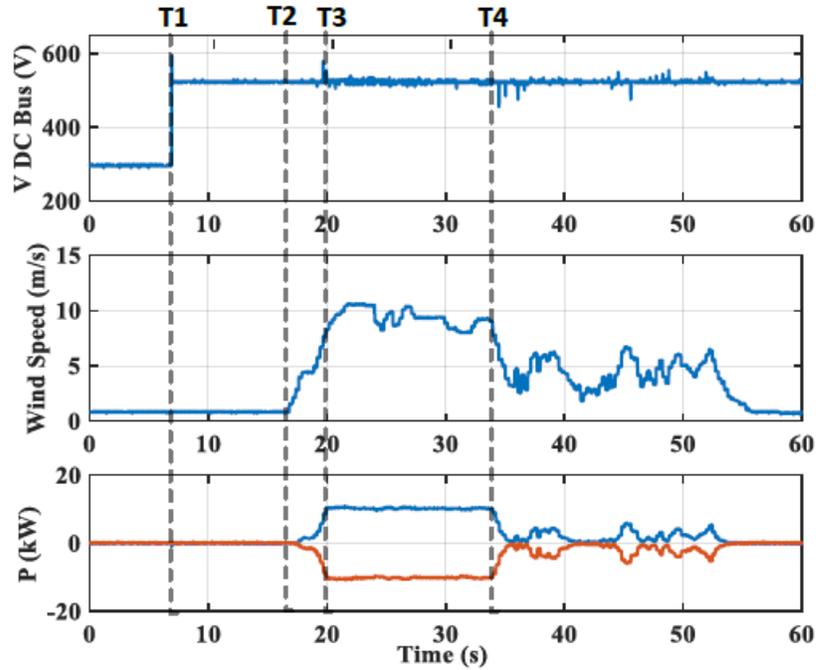


Figura 6.16: Respuesta del sistema WTG interconectado en simultaneo

Fuente: Adaptado de [41].

En el artículo [41] se puede presenciar la existencia de un circuito de control llamado VSC (Voltage Source Converter) el cual como menciona el documento se activa en el tiempo T1 para lograr regular la salida DC a un valor definido, todo mientras la velocidad del viento permanece en cero.

Además de lo anterior se observa como desde el T2 la velocidad del viento varía entre 0 y 10 m/s y el voltaje generado permanece lo más constante posible.

Algo clave en la Figura 6.16 es el comportamiento que tiene la señal de salida. Como se puede notar, el comportamiento del voltaje es constante, esto es algo importante en los PM-WTG, ya que por más que la velocidad del viento oscile, la salida debe permanecer lo más cercano a un valor deseado.

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

Se modelizó la geometría del aerogenerador y se hizo principal énfasis en las piezas que participan en la transmisión mecánica, se les asignó un material y se obtuvieron los datos necesarios de inercia para la etapa siguiente. Al final se ensamblaron todas las piezas en un solo montaje, no fue algo relevante, pero se quería demostrar que era una geometría coherente y ceñida a uno real con esas características.

Se realizó una interfaz adecuada para la herramienta computacional, en donde cumplió con espacios dedicados al ingreso de datos, en este caso fue la velocidad del viento y el ángulo de ataque. Además se presentó un espacio donde se pueden evidenciar resultados por medio de gráficas, esto corresponde a la respuesta del sistema y los datos que se pueden apreciar fueron la velocidad de salida (Velocidad a la que gira el rotor del alternador) y el voltaje generado. También se estableció un pequeño espacio en la interfaz donde se podían observar 2 datos más que se consideraron como importantes, los cuales fueron: torque de entrada y coeficiente de potencia del viento.

Se realizó la comparación teniendo en cuenta la precisión de resultados y el comportamiento de las diferentes señales de respuesta. Se pudo apreciar que aún así siendo aerogeneradores bastante similares los resultados no son tan parecidos entre sí. La principal causa de estas

diferencias es la geometría en sus variaciones más mínimas como por ejemplo: tamaño del multiplicador de velocidad y sus respectivos materiales. Es seguro que esto afecta la relación de transmisión e incluso las inercias en cada pieza. Algo que también afecta, es el generador seleccionado, que igualmente hace parte de la geometría y a pesar de ser síncrono de imanes permanentes, la configuración interna puede causar variaciones en los resultados. Hay que aclarar que no se especificó claramente la geometría del aerogenerador con el que se comparó, simplemente se proporcionaron ciertas características y se asumieron otras para realizar la comparación final.

7.2. Recomendaciones

Lo que se recomienda principalmente es investigar sobre la obtención de un modelo matemático que permita convertir una única geometría en una interactiva, es decir, que se pueda variar entre transmisión con multiplicador (varias configuraciones) y transmisión directa. Igualmente que se permita variar el generador eléctrico sin alterar todo el sistema para la obtención de resultados.

También se cree que esta herramienta podría mejorar mucho más si se diseña un sistema que controle también la variable β y así mantener constante las salidas de una forma automática variando únicamente la variable V_w .

Bibliografía

- [1] “Software etap,” último acceso: 06/05/2022. [Online]. Available: <https://etap.com/sitefinity/status?ReturnUrl=https://etap.com/es/product/wind-turbine-generator-software>
- [2] “Software ashes,” último acceso: 06/05/2022. [Online]. Available: <https://www.simis.io/#>
- [3] “Software homer pro,” último acceso: 06/05/2022. [Online]. Available: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>
- [4] J. Moragues and A. Rapallini, “Energía eólica,” *Buenos Aires: Instituto Argentino de la Energía General Mosconi*, 2003.
- [5] J. I. Rojas-Sola and J. M. Amezcua-Ogáyar, “Origen y expansión de los molinos de viento en España,” *Interciencia*, vol. 30, no. 6, pp. 7–14, 2005.
- [6] H. Zhao and Q. Wu, “Status of wind power technologies,” *Modeling and Modern Control of Wind Power*, pp. 1–10, 2018.
- [7] D. C. Jackson, “Charles Francis Brush (1849-1929),” in *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*. JSTOR, 1935, pp. 494–498.
- [8] “The renewable power percentage,” último acceso: 07/10/2020. [Online]. Available: <http://www.cleanenergyregulator.gov.au/RET/Scheme-participants-and-industry/the-renewable-power-percentage#Cumulative-adjustment>
- [9] F.-U. BNEF, “Global trends in renewable energy investment 2019,” 2019.
- [10] Semana, “Cerca de barranquilla se construirá el primer parque eólico de Colombia sobre el mar,” 2022, último acceso: 06/05/2022. [Online]. Available: <https://www.semana.com/economia/macroeconomia/articulo/cerca-de-barranquilla-se-construira-el-primer-parque-eolico-de-colombia-sobre-el-mar/202214/>
- [11] E. Möllerström, P. Gipe, J. Beurskens, and F. Ottermo, “A historical review of vertical axis wind turbines rated 100 kW and above,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 105, pp. 1–13, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118308153>
- [12] Z. Salameh, “Chapter 3 - wind energy conversion systems,” in *Renewable Energy System Design*, Z. Salameh, Ed. Boston: Academic Press, 2014, pp. 115–199. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123749918000039>

- [13] W. Tjiu, T. Marnoto, M. Sohif, M. Ruslan, and K. Sopian, “Darrieus vertical axis wind turbine for power generation i: Assessment of darrieus vawt configurations,” *Renewable Energy*, vol. 75, p. 50–67, 03 2015.
- [14] D. J. Y. Villarreal, “Aerogeneradores resonantes por VIV,” 2018, último acceso: 06/05/2022. [Online]. Available: <https://vortexbladeless.com/download-green-paper/>
- [15] S. Zhang, J. Wei, X. Chen, and Y. Zhao, “China in global wind power development: Role, status and impact,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 127, p. 109881, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212030174X>
- [16] How do wind turbines work? ENERGY.GOV. último acceso: 06/05/2022. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work>
- [17] S. Gamesa, “Navegando por la revolución offshore,” [online], último acceso: 06/05/2022. [Online]. Available: <https://www.siemensgamesa.com/es-es/products-and-services/offshore>
- [18] T. Ajadi, V. Cuming, R. Boyle, D. Strahan, M. Kimmel, M. Logan, A. McCrone *et al.*, “Global trends in renewable energy investment 2020,” 2020, último acceso: 06/05/2022. [Online]. Available: <https://www.smartgridsinfo.es/biblioteca/informe-tendencias-globales-inversion-energias-renovables-2020>
- [19] W. Cao, Y. Xie, and Z. Tan, “Wind turbine generator technologies,” in *Advances in Wind Power*, R. Carriveau, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2012, ch. 7. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/51780>
- [20] “Generador síncrono de imanes permanentes,” último acceso: 06/05/2022. [Online]. Available: https://hmg.es/wiki/Permanent_magnet_synchronous_generator
- [21] I. L. Kosow, *Máquinas eléctricas y transformadores*. Reverté, 2012.
- [22] M. Yin, G. Li, M. Zhou, and C. Zhao, “Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration,” in *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, pp. 1–6.
- [23] J. D. Gutiérrez Torres, P. C. Sánchez Cifuentes *et al.*, “Diseno y simulación de un sistema de control para un aerogenerador de eje horizontal.”
- [24] T. L. Floyd, R. N. Salas, L. M. O. González, and G. P. López, *Principios de circuitos eléctricos*. Pearson Educación, 2007.
- [25] “Naca 4 digit airfoil generator (naca 2412 airfoil),” último acceso: 06/05/2022. [Online]. Available: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>
- [26] “Stk wind and water turbines alternators,” último acceso: 06/05/2022. [Online]. Available: <http://www.alxion.com/products/stk-alternators/>
- [27] W. F. Riley and L. D. Sturges, *Ingeniería mecánica. dinámica. ii*. Reverté, 1996.
- [28] M. Hazewinkel, “Contravariant tensor, encyclopedia of mathematics,” 2001.
- [29] S. F. Gelfand, Izrail Moiseevich, “Calculus of variations,” *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ*, vol. 51, pp. 444–456, 1963.

- [30] Y. Kadhim and I. Buchberger, “Lagrangian description of electric circuits.”
- [31] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, “Synchronous machine theory and modelling,” *Power system stability and control*, pp. 128–131, 1994.
- [32] R. L. Mott, V. G. y Pozo, S. S. Sánchez, Á. H. Fernández, and J. V. Sánchez, “Diseño de elementos de máquinas,” 2006.
- [33] S. Petruk, R. Zhyvotovskiy, and A. Shyshatskiy, “Mathematical model of mimo,” in *2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S T)*, 2018, pp. 7–11.
- [34] D. G. Zill, M. R. Cullen, A. E. G. Hernández, and E. F. López, *Ecuaciones diferenciales con problemas de valores en la frontera*. Thomson, 2002.
- [35] J. S. Thongam and M. Ouhrouche, “Mppt control methods in wind energy conversion systems,” *Fundamental and advanced topics in wind power*, vol. 15, pp. 339–360, 2011.
- [36] G. A. Van Kuik, “The lanchester–betz–joukowsky limit,” *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 289–291, 2007.
- [37] A. González and S. Morales, “Control de velocidad de aerogenerador mediante realimentación de variables de estado,” *Ciencia e Ingeniería*, vol. 38, no. 2, pp. 123–130, 2017.
- [38] P. Jansuya and Y. Kumsuwan, “Design of matlab/simulink modeling of fixed-pitch angle wind turbine simulator,” *Energy Procedia*, vol. 34, pp. 362–370, 2013, 10th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213010072>
- [39] A. Merabet, J. Thongam, and J. Gu, “Torque and pitch angle control for variable speed wind turbines in all operating regimes,” in *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2011, pp. 1–5.
- [40] “Mapa de vientos,” [online], último acceso: 06/05/2022. [Online]. Available: https://es.windfinder.com/windstatistics/bogota_el_dorado
- [41] N. L. D. Aldana and A. C. L. Hernández, “Modeling and real-time simulation of a grid-connected wind turbine generator,” in *2019 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 2019, pp. 1–6.