

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN CON
TURBINA EÓLICA Y SU SISTEMA DE CONTROL**

**CARLOS ANDRÉS ESCOBAR VALBUENA
JOSEPH THOMAS PÁEZ MARISCAL**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2017

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN CON
TURBINA EÓLICA Y SU SISTEMA DE CONTROL**

**CARLOS ANDRÉS ESCOBAR VALBUENA
JOSEPH THOMAS PÁEZ MARISCAL**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista.

Director:

**JAVIER ENRIQUE SOLANO MARTÍNEZ
PhD. en Ingeniería Eléctrica**

Codirector:

**MÓNICA ANDREA BOTERO LONDOÑO
PhD. en Ciencia - Física**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

Primero que todo le doy gracias a **DIOS** por las bendiciones sobre mí y mi familia, por darme la mejor familia del mundo y que siga guiándonos e iluminándonos a todos.

Dedico este triunfo a mis padres **AZUCENA VALBUENA** y **LUIS FRANCISCO ESCOBAR**, doy gracias por todo el amor, el apoyo, la paciencia, la dedicación, la motivación y palabras de enseñanza que me dan cada día para superar cada reto y etapa en mi vida.

Agradezco especialmente a **JESSICA MIRANDA, FANNY JEREZ y FRANCISCO JAVIER ESCOBAR**, personas muy importantes que me han ayudado, aportado y enriquecido en mi formación tanto profesional como personal.

Gracias por la amistad incondicional a **ANDRES SAID** y **JHOAN SEBASTIAN**, por todos los momentos y anécdotas compartidas.

Gracias a **JOSEPH PAEZ** por la confianza y la compañía en el proceso de culminación de una gran etapa en nuestras vidas.

A nuestro director **JAVIER SOLANO** por su ayuda, tiempo y consejos en la elaboración de nuestro trabajo de grado.

A **Ivonne, Beatriz, Martha, Susana, Yolima, Eloisa, Ismael, Francisco, Cecilia, Sandra, Jorge**, por estar pendientes de mi proceso y el apoyo brindado.

A Dios, mi familia, a mis amigos y compañeros de la universidad.
GRACIAS TOTALES

Carlos Andrés Escobar

DEDICATORIA

Gracias a Dios, por permitirme tener y disfrutar a mi familia en todo momento.

*A mí amada madre **Martha Patricia Mariscal Chuzcano** por su inmenso amor, perseverancia y esfuerzo que me hace querer ser siempre una mejor persona, por su comprensión y su voz de aliento cuando más lo necesito.*

*A mi hermosa abuela **Fidelina**, por siempre confiar en mí e inculcarme el valor del estudio y alentarme a ser mejor cada día.*

*A mis queridas tías **Amparo** y **Nancy**, por estar presentes en mis ciclos de formación, al igual que mi hermano **Johan Sebastián** y a mi tío **David**.*

A mi tía Amparito, por su innegable positivismo y cariño extremo.

Gracias familia porque me han brindado su apoyo incondicional y han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores lo cual me han ayudado a salir adelante en lo dulce y amargo de la vida.

*A mi novia y amiga **Ana María** por acompañarme en este ciclo de ingeniería, por lidiar conmigo y ser parte de mi vida.*

*A mis amigos y compañeros de universidad: **Diego, Jenny, Kevin, Jesús, Wilmer** y a todos aquellos que me brindaron su mano amiga cuando lo necesite.*

A mi grupo de amigos del colegio “Los fieles”, porque no me les pensaba quedar atrás, especialmente a Julián S. por esa insistencia desmesurada en graduarme y por servir de tutor cuando lo requerí.

*A mi compañero de proyecto **Carlos** por su paciencia y acompañamiento en la elaboración de este documento.*

*A mi director **Javier Solano** por ser de gran ayuda, su tiempo y comprensión en la elaboración de este documento.*

Josephth Thomás Páez Mariscal

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. OBJETIVOS	20
1.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
3. SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA	23
3.1 SISTEMAS DE ENERGÍA EÓLICA	23
3.2 MÁQUINA DE INDUCCIÓN	25
3.2.1 Generador de Inducción Jaula de Ardilla	25
4. CONTROL VECTORIAL EN SISTEMAS DE GENERACIÓN CON TURBINAS EÓLICAS.	26
4.1 CONTROLADOR DE ACCIÓN PROPORCIONAL E INTEGRAL (PI) PARALELO.....	26
5. MODELADO Y EMR DEL SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA.	28
5.1 REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCOPICA.....	28
5.2 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CONVERSION DE ENERGÍA EÓLICA SELECCIONADO.	29
5.2.1 Fuente de energía.	30
5.2.2 Modelado de las aspas.....	31
5.2.3 Modelado de las partes mecánicas.	33
5.2.4 Modelado Máquina de Inducción.	34

5.2.5 Rectificador de tensión y corriente.	40
5.2.6 Bus DC	41
6. MÉTODO DE CONTROL.....	42
6.1 LAZO DE AJUSTE.....	42
6.1.1 Estrategia de seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT).	43
6.1.2 Estructura de control.....	44
6.1.3 Estimación de variables no medibles.....	50
7. SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA. ...	54
7.1 RESULTADOS DE SIMULACIÓN	56
8. CONCLUSIONES	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
BIBLIOGRAFÍA	69
ANEXOS	74

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Generador de inducción Jaula de Ardilla [7].	25
Figura 2. Bloques de asignación del EMR [8].	29
Figura 3. Configuración sistema de conversión de energía eólica.	30
Figura 4. EMR de fuentes de energía.	30
Figura 5. Coeficiente de torque del sistema de conversión de energía eólica.	32
Figura 6. EMR de las aspas.	33
Figura 7. EMR del eje de la turbina.	33
Figura 8. EMR Caja de engranajes.	34
Figura 9. EMR transferencia multi-física y flujo en eje directo.	36
Figura 10. EMR cálculo de corrientes.	37
Figura 11. EMR Transformada de Park y Concordia.	39
Figura 12. EMR de la Máquina de Inducción.	40
Figura 13. Rectificador.	40
Figura 14. EMR del Bus DC.	41
Figura 15. Lazo de ajuste del SCEE.	43
Figura 16. EMR Bloque del MPPT.	43
Figura 17. Perfil par mecánica vs velocidad de la turbina [21].	44
Figura 18. Controlador de flujo Matlab-Simulink.	45
Figura 19. EMR control de flujo.	45
Figura 20. EMR inversión con controlador (elementos acumuladores)	46
Figura 21. Controlador PI de corriente en eje directo del estator.	46
Figura 22. Controlador PI de corriente en eje de cuadratura del estator	47
Figura 23. EMR tensión referida de referencia del estator en los ejes (d, q).	47
Figura 24. EMR tensión de referencia en el estator del generador.	48
Figura 25. EMR vector modulación.	49

Figura 26. Estructura de control del SCEE.	50
Figura 27. EMR estimación de corriente I_{sdq}	50
Figura 28. EMR tensiones inducidas ejes d-q.	52
Figura 29. EMR estimación de flujo.	52
Figura 30. EMR variables estimadas.	53
Figura 31. Sistema de generación de energía eólica implementado en Matlab/Simulink.....	54
Figura 32. a) Velocidad de rotación. b) Potencia Mecánica [25].	55
Figura 33. Perfil del Viento.....	56
Figura 34. Potencia mecánica extraída del viento.	57
Figura 35. Potencia mecánica extraída del viento y potencia mecánica en el eje de la turbina.....	58
Figura 36. Velocidad del eje.	58
Figura 37. Potencias mecánicas en el eje de la turbina y potencia mecánica en el eje del generador.	59
Figura 38. Potencia mecánica del generador y potencia eléctrica del generador.	60
Figura 39. Potencia eléctrica del generador y potencia eléctrica en el bus DC.	60
Figura 40. Potencias del sistema.....	61
Figura 41. Eficiencia del sistema.	61

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de la máquina de inducción.....	55
Tabla 2. Parámetros de la turbina.	56
Tabla 3. Parámetros de la caja de engranajes.....	56

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Descripción de bloques del EMR en Matlab-Simulink.	74
ANEXO B. Representación de las ecuaciones en Matlab-Simulink	87
ANEXO C Sistema de generación de energía eólica implementado en Matlab-Simulink.	99

SIMBOLOGÍA

C_T	<i>Coeficiente de torque.</i>
C_p	<i>Coeficiente de potencia.</i>
β	<i>Ángulo de paso del aspa.</i>
λ	<i>Relación de desplazamiento.</i>
V_{asp_nom}	<i>Velocidad nominal de las aspas.</i>
R	<i>Radio de las aspas.</i>
ρ	<i>Densidad del aire.</i>
V_{wind}	<i>Velocidad del viento.</i>
ω_{shaft}	<i>Velocidad rotacional del eje de la turbina.</i>
T_{gear}	<i>Torque en el eje acoplado al generado y la caja de engranajes.</i>
T_{blade}	<i>Torque producido por las aspas.</i>
f	<i>Coeficiente de fricción del eje.</i>
J	<i>Inercia en el eje de la turbina.</i>
W_{gear}	<i>Velocidad rotacional en el eje acoplado al generado y la caja de engranajes.</i>
K_{gear}	<i>Relación de transmisión de la caja de engranajes.</i>
T_{im}	<i>Torque eléctrico.</i>
T_r	<i>Constante de tiempo rotórica.</i>
T_s	<i>Constante de tiempo estática.</i>
Φ_{rd}	<i>Flujo del rotor en eje directo.</i>
L_r	<i>Inductancia asociada al rotor.</i>
L_s	<i>Inductancia asociada al estator.</i>
R_r	<i>Resistencia asociada al rotor.</i>
R_s	<i>Resistencia asociada al estator.</i>
i_{sd}	<i>Corriente del estator en eje directo.</i>

i_{sq}	Corriente de estator en eje de cuadratura.
M_{sr}	Inductancia ciclica mutual entre el estator y el rotor.
P	Polos de la maquina de inducción.
θ_{ds}	Posición del rotor en eje directo, respecto al estator.
σ	Coefficiente de dispersión.
e_{sd}	Tensión inducida del estator en eje directo.
e_{sq}	Tensión inducida del estator en eje de cuadratura.
K_1 y K_2	Contantes relacionadas a parámetros de la máquina
u_{sdq}	Tensión de fase del estator en marco de referencia d-q.
u_{abc}	Tensión de línea del estator.
u_{rect}	Tensión de fase rectificada del estator.
u_{albe}	Tensión del estator en marco de referencia (alfa, beta).
K_{uv}	Matriz de transformación de tensiones de fase a línea.
K_{vu}	Matriz de transformación de tensiones de línea a fase.
$[T(\theta_{ds})]$	Transformada directa de Park.
$[T(\theta_{ds})]^{-1}$	Transformada inversa de Park.
C	Transformada de Concordia.
C^{-1}	Transformada inversa de Concordia.
i_{albe}	Corriente del estator en marco de referencia (alfa, beta).
i_{im}	Corriente de línea del estator.
i_{sdq}	Corriente del estator en marco de referencia d-q.
i_{rect}	Corriente en continua rectificada.
K_{ii}	Matriz de transformación de corriente de fase a línea.
u_{DC}	Tensión en continua constant del barraje DC.
m_{vsc}	Vector modulación.
K_{ii_inv}	Matriz de transformación de corriente de línea a corriente de fase.
i_{sd_ref}	Corriente de referencia del estator en eje directo.
i_{sq_ref}	Corriente de referencia del estator en eje de cuadratura.
i_{sdq_est}	Corriente estimada del estator en marco de referencia d-q.

$e_{sd_estimado}$	Tensión inducida estima del estator en eje de cuadratura.
$e_{sq_estimado}$	Tensión inducida estima del estator en eje directo.
$\theta_{ds_estimado}$	Estimado de la posición del rotor en eje directo respecto al estator.
$i_{sd_estimado}$	Corriente estimada del estator en eje directo.
$i_{sq_estimado}$	Corriente estimada del estator en eje de cuadratura.
Φ_{rd_ref}	Flujo de referencia del rotor en eje directo.
C_1	Controlador PI para flujo.
C_2 y C_3	Controladores PI para corrientes.
T_{im_ref}	Torque de referencia.
u_{sd_ref}	Tensión del estator de referencia en eje directo.
u_{rect_ref}	Tensión de fase rectificada de referencia.

RESUMEN

TITULO: MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN CON TURBINA EÓLICA Y SU SISTEMA DE CONTROL

AUTORES: JOSEPH THOMAS PÁEZ MARISCAL
CARLOS ANDRÉS ESCOBAR VALBUENA **

PALABRAS CLAVES: Modelado y simulación, Sistema de conversión, Energía eólica, Sistema de control.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo principal de este trabajo de grado es identificar un modelo de sistema de generación de energía eólica y un sistema de control que se pueda aplicar en estos sistemas. Este modelo de simulación se implementará en un software computacional, utilizando las ecuaciones matemáticas representativas de cada subsistema. El sistema de generación eólica estudiado en este trabajo, está conformado por los siguientes subsistemas: modelado aerodinámico, modelado de las partes mecánicas (aspas, eje de la turbina, caja de engranajes), modelado del generador eléctrico, elementos de electrónica de potencia, sistema de control y un barraje DC. Para validar el modelo del sistema, se utiliza la herramienta Matlab Simulink y se emplea el formalismo de representación energética macroscópica (EMR, por sus siglas en inglés Energetic Macroscopic Representation), propuesto por el profesor Alain Bouscayrol de la Universidad de Lille en Francia.

La metodología planificada para realizar este trabajo está dividida en: búsqueda bibliografía, selección del modelo de sistema de conversión de energía eólica (SCEE), implementación del modelo utilizando la herramienta de Matlab-Simulink y simulación junto con los respectivos análisis de resultados.

La investigación realizada contribuirá con el estudio de micro-redes, llevado a cabo por el Grupo de Investigación "GISEL", adscrito a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), de la Universidad Industrial de Santander (UIS), utilizando ese modelo como parte del desarrollo del proyecto de construcción de un laboratorio de integración energética, en el Parque Tecnológico Guatiguara (Santander-Piedecuesta).

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Javier Enrique Solano Martínez. Codirector: Mónica Andrea Botero Londoño

SUMMARY

TITLE: MODELING AND SIMULATION OF A WIND TURBINE GENERATOR WITH CONTROL SYSTEM

AUTHORS: JOSEPH THOMAS PÁEZ MARISCAL
CARLOS ANDRÉS ESCOBAR VALBUENA **

KEYWORDS: Modeling and simulation, Conversion System, Wind Power, Control System.

DESCRIPTION:

The main objective of this work is to identify a wind power generation model and the control system that could be applied to this. This simulation model will be implemented in a computer software using mathematical representative equations from each subsystem. The wind power generation system on which this work is based, consists on the following subsystems: aerodynamic modeling, mechanical parts modeling (blades, turbine shaft, gear box), electric generator modeling, control system and a DC busbar. To validate this model, it will be use the software 'Matlab-Simulink', and will be applied to the macroscopic energy representation (EMR, Energetic Macroscopic Representation) formalism, proposed by Professor Alain Bouscayrol of the University of Lille in France. .

The planned methodology to perform this work is divided into: search bibliography, selection of the wind power conversion system model (WECS), model implementation using the Matlab-Simulink tool and simulation together with the respective analysis of results.

This research will contribute to the study of micro-networks conducted by "GISEL" a research group attached to the 'Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications School (E3T)' from 'Universidad Industrial de Santander' (UIS). This model will be use as part of the development and construction of the 'Integration Energy Laboratory' at 'Guatiguara Technology Park' (Santander Piedecuesta).

* Degree work

** Faculty of Physics and Mechanical Engineering, School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Director: Enrique Javier Solano Martínez. Co-director: Mónica Andrea Botero Londoño

INTRODUCCIÓN

Con motivo de la creciente demanda energética mundial y la conservación del medio ambiente, los usos de sistemas de conversión de energía eólica se han incrementado de forma considerable en la última década. Lo anterior, hace indispensable el estudio de nuevas tecnologías que permitan obtener mayor eficiencia y una reducción de costos en la implementación de estos sistemas.

Es por esto que el grupo de investigación “GISEL” de la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T) planea la construcción de un laboratorio de integración energética y micro-redes en las instalaciones del Parque Tecnológico de Guatiguara (Piedecuesta, Santander).

Una de las etapas del proyecto es la simulación de una micro-red con diferentes fuentes de energía y almacenamiento de la misma. De acuerdo a lo anterior, en este trabajo de grado se abordan los sistemas de conversión de energía eólica, donde se busca modelar y simular un sistema de generación con turbina eólica y su sistema de control de potencia utilizando el software “MATLAB-Simulink”.

En este documento se realiza una revisión bibliográfica correspondiente a los diferentes modelos de generadores eléctricos y metodologías de control para sistemas de conversión eólica. Utilizando la técnica de: “Representación Energética Macroscópica por sus siglas en inglés EMR (Energetic Macroscopic Representation)” y haciendo uso de la herramienta “Matlab-Simulink” se realizará la simulación y análisis del flujo de potencias del sistema seleccionado, comparando los resultados obtenidos con los resultados propuestos en la bibliografía encontrada

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar e implementar un modelo de simulación de un sistema de generación con turbinas eólicas y su sistema de control utilizando la representación energética macroscópica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar la bibliografía de modelos de sistemas de generación de turbinas eólicas y su sistema de control de potencia.
- Simular un sistema de generación mediante turbina eólica.
- Simular el sistema de control de potencia de un sistema de generación de turbina eólica.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, el grupo 'GISEL' adscrito a la 'Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS), realiza en la actualidad una serie de investigaciones para la construcción de un laboratorio de integración energética y micro-redes en el 'Parque Tecnológico Guatiguara' (Santander-Piedecuesta).

En este lugar, se están llevando a cabo diferentes proyectos entre los que se destacan el diseño de una micro red de baja tensión; el desarrollo de un software en MATLAB® para el modelado del comportamiento operacional en estado estable de componentes de micro-redes eléctricas [9] y la definición de componentes tecnológicos de una micro red [13].

Otros proyectos ya sustentados con éxito se cristalizaron mediante el modelado y simulación de un sistema de generación de paneles fotovoltaicos y su respectivo sistema de control [28-29], implementación y simulación de algoritmos de carga de las baterías NiCd, NiMH y Li-ion [30-31].

Por este motivo, y con el fin de aportar y complementar las investigaciones realizadas en pro de la construcción del laboratorio de integración, genera la necesidad de realizar un estudio sobre un sistema de conversión de energía eólica, del cual se espera arroje información relevante acerca de los modelos de "conversión" y los posibles sistemas de control que se pueden aplicar.

Conocer e investigar el uso de estas herramientas de simulación, permitirán una mejor comprensión de los mecanismos y sistemas de energías renovables y el sistema de control de potencia.

La metodología a desarrollar durante las etapas de esta investigación son las siguientes:

En primer capítulo, se realizará una investigación bibliográfica en artículos y/o revistas de categoría A1 acerca del concepto y los componentes más importantes de los sistemas de conversión de energía eólica (SCEE).

En los capítulos dos (2) y tres (3) de este documento serán presentados los generadores eléctricos más utilizados y los métodos más comunes de control para los modelos de generación eólica.

Posteriormente, en los capítulos cuatro (4) y cinco (5) se presentarán las ecuaciones a implementar del modelo seleccionado de los sistemas de potencia y control. Así mismo se replicará una estructura del sistema y subsistemas de un SCEE propuesto por el profesor Alain Bouscayrol en sus artículos [25] [26], con las herramientas y el protocolo a seguir para la simulación del mismo.

Considerando los trabajos realizados anteriormente por el grupo "GISEL", se utilizará el software 'MATLAB-Simulink' aplicando el formalismo EMR (por sus siglas en inglés 'Energetic Macroscopic Representation'). El mismo facilitará la comprensión de un sistema complejo, representando los resultados en bloques funcionales (subsistemas) y su respectivo análisis individual.

Al término de capítulo 6 se presentarán las conclusiones acerca del modelo implementado y los aportes que puede ofrecer, los cuales serán comparados con las gráficas en [26] [25], y los aportes que pueda ofrecer esta investigación en la construcción del laboratorio de integración energética en las instalaciones del 'Parque Tecnológico Guatiguara'.

3. SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica es una fuente de energía inagotable, limpia y amigable con el medio ambiente que cada vez aumenta su competitividad en el sector eléctrico, en área de producción de energía a gran escala. Contribuyendo en la disminución parcial del uso de combustibles fósiles y evitando el cambio climático. Por esta razón se convierte en una de las fuentes más importantes y prometedoras del planeta, principalmente por sus bajos niveles de contaminación y viabilidad económica.

En esta sección se dará una definición de los sistemas de energía eólica y algunos de sus componentes. A continuación, se mencionan los tres generadores más utilizados en los sistemas de conversión eólica: Generador de inducción doblemente alimentado, el Generador síncrono de imanes permanentes y el Generador de inducción jaula de ardilla

3.1 SISTEMAS DE ENERGÍA EÓLICA

Los sistemas de conversión de energía eólica (WECS, por sus siglas en inglés, “*Wind Energy Conversion System*”) están compuestos por una turbina que convierte la potencia disponible del viento en potencia mecánica en el eje. La potencia mecánica en el eje impulsa un generador que suministra potencia eléctrica a la red.

En países como Alemania, Estados Unidos y España la potencia generada por los sistemas de conversión de energía eólica está alcanzando un porcentaje significativo del total de la energía generada en estos países [1].

Las partes y mecanismos del sistema de generación se pueden ver en la Figura 1. y se describen a continuación:

- Rotor, está conformado por las aspas y se acopla al eje de baja velocidad.
- Transmisión, compuesta por un eje de baja velocidad y un eje de alta velocidad, los cuales están conectados entre sí por una caja de engranajes que tiene una relación de velocidades apta para el funcionamiento del generador.
- Generador, es el encargado de convertir la energía mecánica de rotación en energía eléctrica.
- Góndola, es la estructura que soporta y protege la transmisión y el generador, esta acoplada a la torre y al rotor.
- Torre, la góndola es soportada sobre la torre que eleva las aspas del rotor a la altura de operación del sistema.
- Sistema de Orientación, mantiene el rotor en dirección del viento controlada por la veleta.
- Sistema de Control, conformado por sensores y actuadores con diferentes funciones como regulación de potencia, control de velocidad, control de voltaje, arranque y paro de la máquina.
- Sistema de Seguridad, mantiene al aerogenerador en una condición segura y estable de funcionamiento, se compone de los sistemas de frenado, detección de altas temperaturas, presiones y vibraciones.

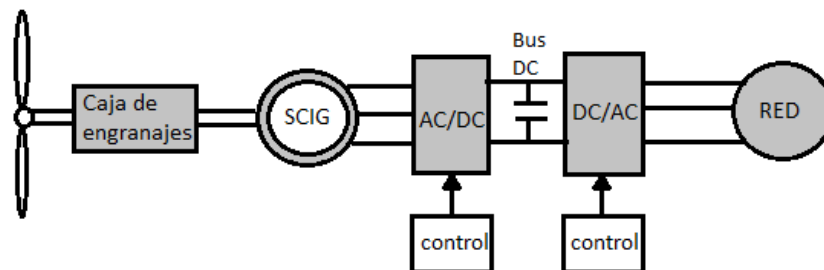
3.2 MÁQUINA DE INDUCCIÓN

La máquina de inducción es usada en una amplia variedad de aplicaciones para transformar la energía eléctrica a trabajo mecánico. Las máquinas de inducción trifásicas operan como motor cuando giran con una velocidad menos a la velocidad síncrona y como generador cuando giran a una velocidad mayor. La máquina de inducción es menos costosa que sus equivalentes en tamaño o potencia de máquinas síncronas.

Las principales partes constitutivas de la máquina de inducción trifásica son: el estator, el rotor, los devanados, el eje, la carcasa y elementos mecánicos.

3.2.1 Generador de Inducción Jaula de Ardilla Los Generadores de Inducción Jaula de Ardilla (SIGS, por sus siglas en inglés “*Squirrel Cage Induction Generator*”) son muy populares en las configuraciones de sistemas de energía eólica. Debido a su robustez, fiabilidad, eficiencia, ventajas económicas en su fabricación y mantenimiento, junto con el avance rápido en las tecnologías de electrónica de potencia los están convirtiendo en una opción atractiva para la aplicación de aerogeneradores [7]. Un ejemplo de configuración usado en los sistemas de energía eólica con generadores de inducción se presenta en la Figura 1 [7].

Figura 1. Generador de inducción Jaula de Ardilla [7].



4. CONTROL VECTORIAL EN SISTEMAS DE GENERACIÓN CON TURBINAS EÓLICAS.

El control vectorial cambia el modelo dinámico del motor en coordenadas a-b-c a un modelo referido a dos ejes ortogonales d-q o ejes de referencia directo y de cuadratura. Para lograr la transformación del modelo del generador de inducción jaula de ardilla, el sistema trifásico alterno de corrientes del estator es referenciado a un sistema de coordenadas ortogonales giratorio. En este nuevo sistema de referencia, las corrientes del estator son tratadas como un vector espacial. Es posible asumir cualquier valor arbitrario para la velocidad de giro del sistema de coordenadas d-q. Sin embargo, en el control vectorial se elige que el sistema de coordenadas ortogonales gire sincrónicamente con el flujo enlazado del rotor.

El paso a seguir es descomponer el vector espacial de las corrientes del estator en dos componentes: una colineal con el flujo enlazado del rotor (denominada i_{sd}) y la otra en cuadratura (denominada i_{sq}). La primera componente resulta ser responsable del flujo enlazado del rotor, el cual en condiciones nominales de funcionamiento se mantiene constante, y se designa como corriente de magnetización. La segunda componente es responsable de la generación del par electromagnético y se llama corriente activa.

4.1 CONTROLADOR DE ACCIÓN PROPORCIONAL E INTEGRAL (PI) PARALELO.

Los controladores PI de la forma “paralelo/ideales”, se caracterizan por mitigar el error en estado estacionario, provocado por el control proporcional de modo que el comportamiento del sistema converja al valor deseado y simultáneamente

garantizando estabilidad en el sistema. Se caracterizan por variar la salida del controlador P de manera proporcional al tiempo de permanencia del error y la razón al tiempo que permanece el error y la magnitud del mismo.

$$\text{controlador PI} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i * s} \right)$$

Donde K_p es la constante de proporcionalidad y T_i es el tiempo de integración.


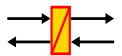
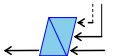
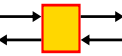

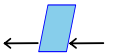
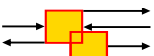
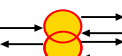
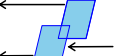



5. MODELADO Y EMR DEL SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA.

En el siguiente capítulo se encuentra una introducción del formalismo EMR, la configuración del sistema de conversión de energía eólica seleccionado en este trabajo y la representación de cada una de las etapas del sistema mediante los bloques utilizados en el formalismo.

5.1 REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA.

A partir del año 2000, se ha venido implementado la Representación Energética Macroscópica EMR por sus siglas en inglés “*Energetic Macroscopic Representation*”, para el desarrollo de investigaciones de sistemas electromecánicos complejos, esta descripción funcional es un formalismo gráfico y multi-físico que permite destacar las propiedades de cada subsistema y admite la comprensión de cada una por separado, reemplazando cualquier bloque funcional (Figura 2) y acoplarlo al sistema general sin tener que modificar la totalidad del conjunto [8].

Figura 2. Bloques de asignación del EMR [8]

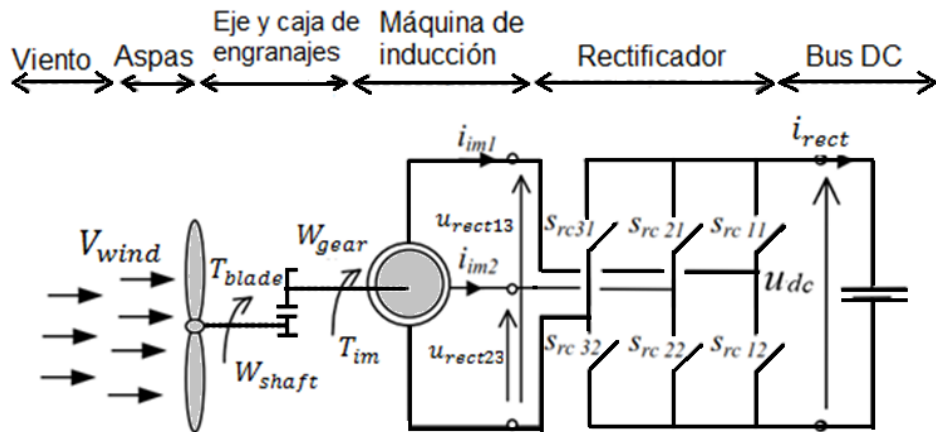
	Fuente de energía (Ej. batería)		Acumulador de energía (Ej. inercia)		Bucle de control cerrado
	Convertidor mono-físico (Ej. elevador de velocidad)		Convertido multi-físico (Ej. bombeo)		Bucle de control abierto
	Distribución de energía (mismo dominio)		Distribución de energía (varios dominios)		Inversión de acoplamientos con criterios de distribución
	Acción – Reacción variables		Sensor		Gestiona la energía global

El modelo de SCEE y su Representación energética macroscópica (EMR), utilizados en este proyecto, hacen parte de estudios realizados por Alain Bouscayrol y otros autores mencionados en [25] [26].

5.2 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CONVERSION DE ENERGÍA EÓLICA SELECCIONADO.

Las etapas que conforman la configuración del sistema de conversión de energía eólica son: aspas en el rotor, caja de engranajes, máquina de inducción de jaula de ardilla, un rectificador y un bus DC, las cuales se representan en la Figura 5. En este trabajo, el bus de DC se supone constante.

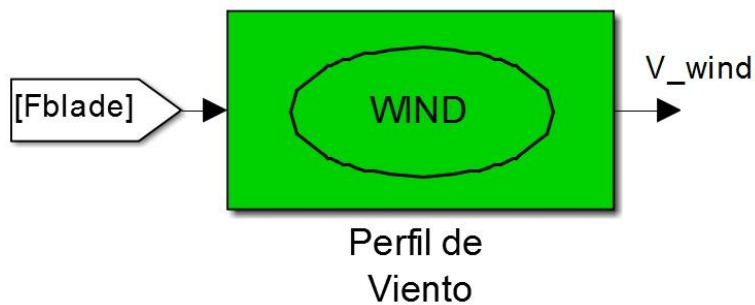
Figura 3. Configuración sistema de conversión de energía eólica.



El sistema de conversión de energía eólica utilizado en este trabajo de grado, se compone de seis subsistemas visibles en la Figura 3, los cuales se representan en bloques funcionales según su propiedad dentro del sistema de acuerdo a la Figura 4, mencionados a continuación.

5.2.1 Fuente de energía. Siguiendo el formalismo EMR en la Figura 2. Se muestra la representación de la fuente de energía mecánica del SCEE estudiado [25], la cual, es la fuerza producida por la velocidad del viento V_{wind} sobre las aspas.

Figura 4. EMR de fuentes de energía.



El perfil de viento utilizado para representar la fuente de energía (Figura 4.) a simular en Matlab/Simulink, se obtuvo de estudios previos realizados por Alain Bouscayrol.

5.2.2 Modelado de las aspas. El torque T_{blade} producido por las aspas debido a la fuerza de la velocidad del viento V_{wind} se representa por la siguiente ecuación:

$$T_{blade} = \frac{1}{2} C_T(\lambda, \beta) \rho S R V_{wind}^2 \quad (1)$$

Donde S es el área de barrido por las aspas, ρ es la densidad del aire. El coeficiente de torque $C_T(\lambda, \beta)$ es función de la relación entre la velocidad tangencial del eje y la velocidad del viento, como se define a continuación,

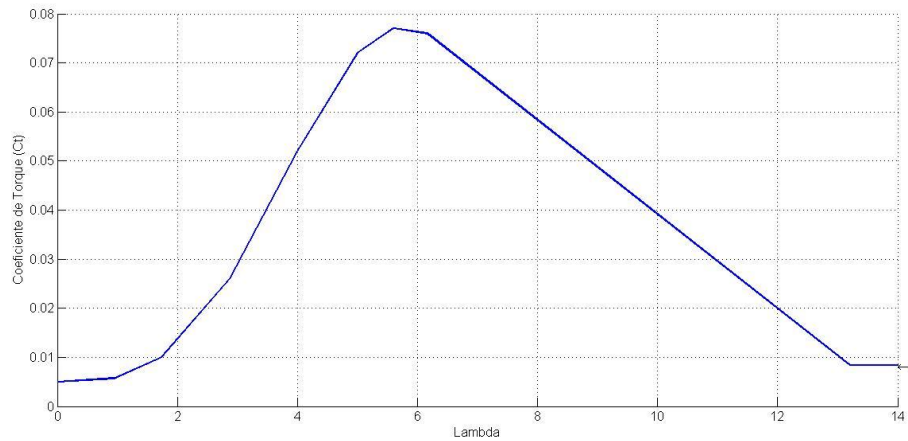
$$\lambda = \frac{R \omega_{shaft}}{V_{wind}} \quad (2)$$

En donde R es el radio de las aspas y ω_{shaft} es la velocidad rotacional del eje.

El coeficiente de torque, ilustrado en la Figura 5, está representado por la ecuación:

$$C_T(\lambda, \beta) = \frac{C_P(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (3)$$

Figura 5. Coeficiente de torque del sistema de conversión de energía eólica.



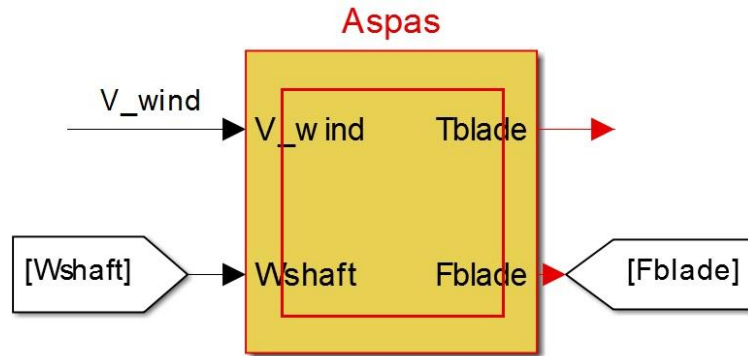
C_p es el coeficiente de potencia y este depende del diseño aerodinámico de la turbina.

Para este trabajo el ángulo de paso de pala β tendrá un valor igual a cero con el cual se obtiene el máximo coeficiente de potencia.

Las ecuaciones del modelado aerodinámico presentadas anteriormente se representan según el formalismo EMR, mediante un bloque de conversión mono-físico observado en el Figura 6.

Siguiendo el principio de acción-reacción del EMR; debido a una fuerza producida por la velocidad del viento sobre las aspas de la turbina (acción) se genera un torque sobre el eje de la misma produciendo una potencia aerodinámica (reacción).

Figura 6. EMR de las aspas.

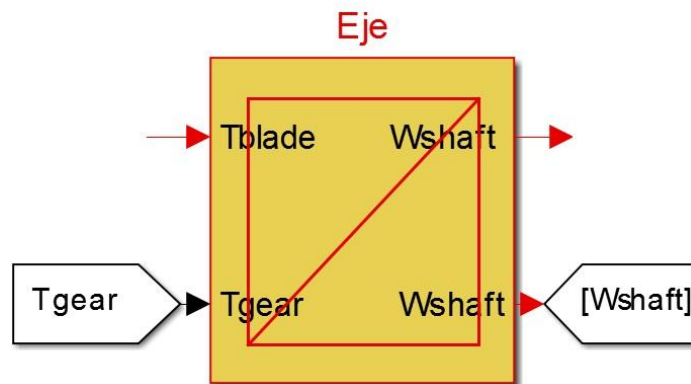


5.2.3 Modelado de las partes mecánicas. Podemos deducir la velocidad de rotación W_{shaft} a partir del torque de la turbina T_{blade} y del torque de la maquina T_{gear} .

$$J \frac{d(W_{shaft})}{dt} = -T_{gear} + T_{blade} - fW_{shaft} \quad (4)$$

En donde J y f son la inercia y el coeficiente de fricción del eje equivalente respectivamente Figura 7.

Figura 7. EMR del eje de la turbina.



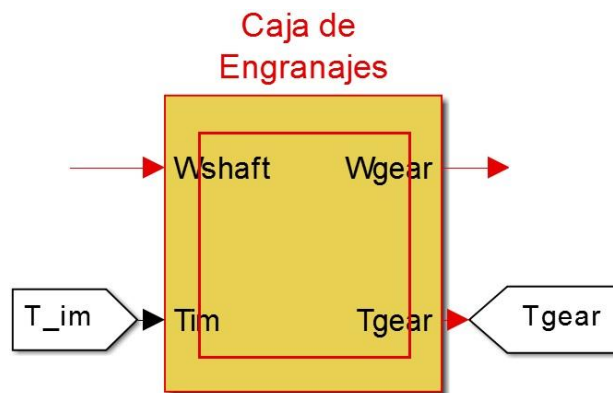
De la caja de cambios se obtiene la velocidad de rotación W_{gear} y el torque T_{gear} por medio de la relación de transmisión K_{gear} :

$$W_{gear} = K_{gear} W_{shaft} \quad (5)$$

$$T_{im} = \frac{T_{gear}}{K_{gear}} \quad (6)$$

El eje y la caja de engranajes son llevados a un sistema equivalente representado por la ecuación (4). La Figura 8 sigue el principio acción-reacción del formalismo EMR. La acción es, producir el torque en el eje de la turbina T_{blade} , generando una potencia aerodinámica y la reacción es, el torque resultante T_{gear} en el eje acoplado entre el generador y la caja de engranajes. Generando la potencia mecánica del generador. En este trabajo se asume una caja de engranajes ideal la cual no representa pérdidas de potencia mecánica entre el eje de la turbina y el eje del generador.

Figura 8. EMR Caja de engranajes.



5.2.4 Modelado Máquina de Inducción. La máquina de inducción tipo jaula de ardilla, es la máquina eléctrica más utilizada en el ámbito industrial, debido a las ventajas que presenta sobre las demás. Estos generadores son muy favorables para aplicaciones en sistemas de conversión de energía eólica, en vista de su simplicidad de construcción, bajo costo, menor tamaño por kilovatio de salida de potencia, mínima necesidad de mantenimiento, alta confiabilidad y robustez.

Este tipo de máquina no puede producir potencia reactiva, la cual es necesaria para mantener el campo magnético del estator. Ésta desventaja se puede solucionar añadiendo un banco de capacitores en sus terminales de estator.

Un modelado clásico dinámico es usado para describir la máquina de inducción [11].

El flujo del rotor ϕ_{rd} esta dado en términos de la corriente i_{sd} ,

$$T_r \frac{d(\phi_{rd})}{dt} = i_{sd} M_{sr} + \phi_{rd} \quad (7)$$

M_{sr} es la inductancia cíclica mutua entre el estator y el rotor;

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$ es la constante de tiempo rotórica, en donde L_r es la inductancia cíclica del rotor y R_r es la resistencia asociada al rotor.

El bloque en forma de rectángulo de la Figura 9 representa una acumulación interna de energía, en el cual encontramos la ecuación (7).

La conversión electromecánica produce el par T_{im} y la f.e.m. esta dada en función de la corriente y la velocidad de rotación como se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$T_{im} = \frac{M_{sr}}{(L_r)} P \phi_{rd} i_{sq} \quad (8)$$

$$e_{sd} = -\frac{d(\theta_{ds})}{dt} L_s i_{sd} \sigma - \phi_{rd} \frac{M_{sr}}{(L_r T_r)} \quad (9)$$

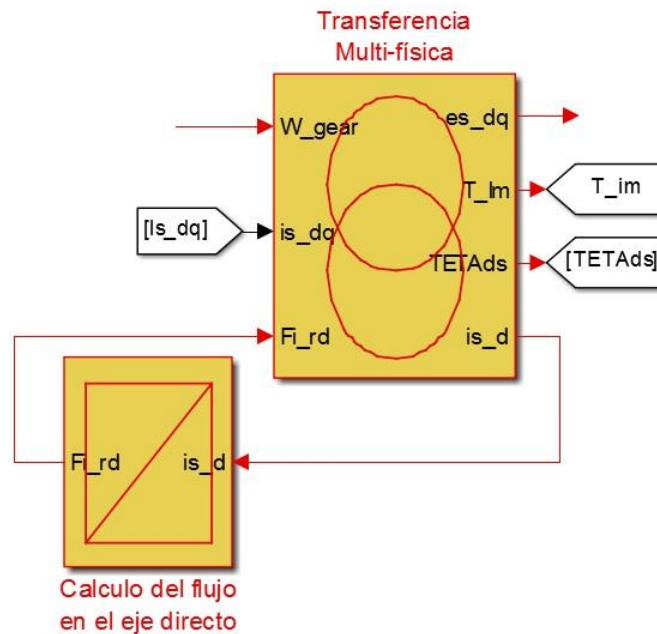
$$e_{sq} = -\frac{d(\theta_{ds})}{dt} L_s i_{sq} \sigma - \phi_{rd} \frac{M_{sr}}{(L_r)} P W_{gear}$$

El bloque de la Figura 9, son dos círculos intersectados, el cual representa una conversión multi-física; convirtiendo la potencia mecánica en el eje del generador en potencia eléctrica en sus terminales.

θ_{ds} es la posición del flujo del rotor en eje directo d, con respecto al estator y se deduce de la siguiente ecuación:

$$\frac{d}{dt} \theta_{ds} = \frac{M_{rs}}{Tr\phi_{rd}} i_{sq} + pW_{gear} \quad (10)$$

Figura 9. EMR transferencia multi-física y flujo en eje directo.

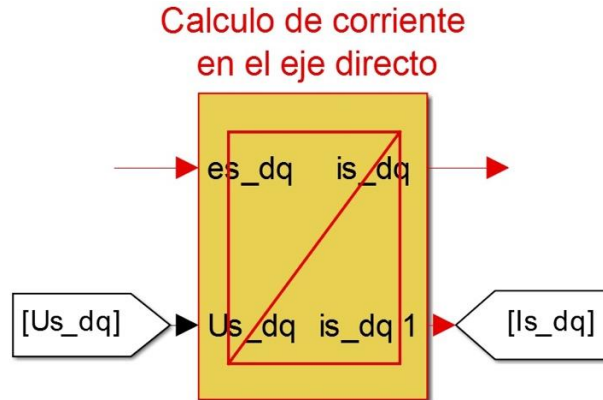


Las corrientes del estator i_{sdq} están representadas en función de las tensiones del estator u_{sdq} y de la fuerza electromotriz e_{sdq} (f.e.m.), esta ecuación está representada por el bloque de la Figura 10.

$$K_1 \frac{d}{dt} i_{sdq} = K_2 (u_{sdq} - e_{sdq}) - i_{sdq} \quad (11)$$

En donde K_1 y K_2 son constantes relacionadas con parámetros constructivos propios de la máquina de inducción.

Figura 10. EMR cálculo de corrientes.



En la Figura 11 observamos un bloque de forma cuadrada, el cual representa una conversión mono-física. Este bloque representa la transformada de Park y la transformada de Concordia.

Los coeficientes de las ecuaciones que modelan la máquina de inducción son variantes en el tiempo. Dada la complejidad de análisis de estas ecuaciones se realiza unas transformaciones de variables a un marco de referencia invariantes en el tiempo.

En la Figura 11 se observa que solo se tiene en cuenta dos tensiones

$u_{rect} = [u_{rect13}, u_{rect23}]^T$ de fase y dos corrientes de línea $i_{im} = [i_{im1}, i_{im2}]^T$, debido a que el tercer valor es una combinación lineal de los otros dos.

Las ecuaciones de transformación de tensiones de línea u_{abc} a tensiones de fase u_{rect} y de corrientes de fase i_{abc} a corrientes de línea i_{im} , son las siguientes:

$$u_{abc} = K_{uv} * u_{rect} \quad ; \quad K_{uv} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$i_{im} = K_{ii} * i_{abc} \quad ; \quad K_{ii} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

La transformación de Concordia permite cambiar las variables de tensión y corriente desde un sistema de referencia trifásico en estacionario (“a” “b” “c”) a un sistema estacionario (“α” “β”).

$$\text{Transformada de concordia: } C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

$$u_{albe} = C * u_{abc} \quad (14)$$

$$\text{Transformada inversa de concordia: } C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

$$i_{abc} = C^{-1} * i_{albe} \quad (15)$$

La transformada de Park $[T(\theta_{ds})]$ expresa tensiones u_{albe} y corrientes i_{albe} en un eje de referencia estacionario a un eje de referencia giratorio d, q .

$$u_{sdq} = [T(\theta_{ds})] u_{albe} \quad (16)$$

$$i_{albe} = [T(\theta_{ds})]^{-1} i_{sdq} \quad (17)$$

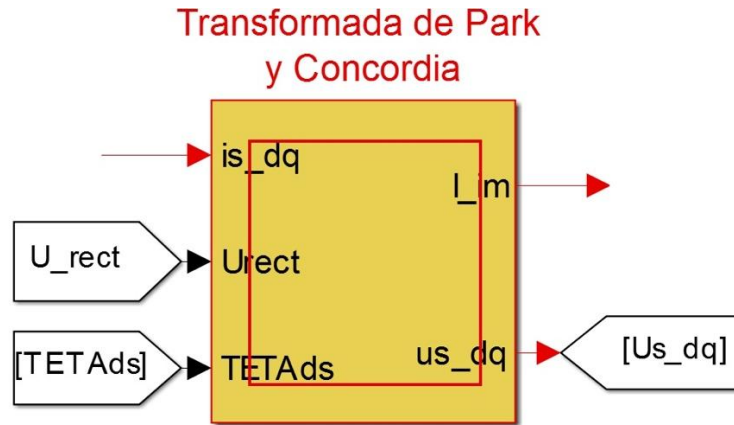
$$\text{donde: } [T(\theta_{d/s})] = \begin{bmatrix} \cos \theta_{ds} & \sin \theta_{ds} \\ -\sin \theta_{ds} & \cos \theta_{ds} \end{bmatrix}$$

Una de las propiedades algebraicas de la transformada de Park dice que la matriz transpuesta de Park es igual a la matriz inversa de Park: $[T(\theta_{ds})]^{-1} = [T(\theta_{ds})]^t$

Por tanto, la transformada inversa de Park es:

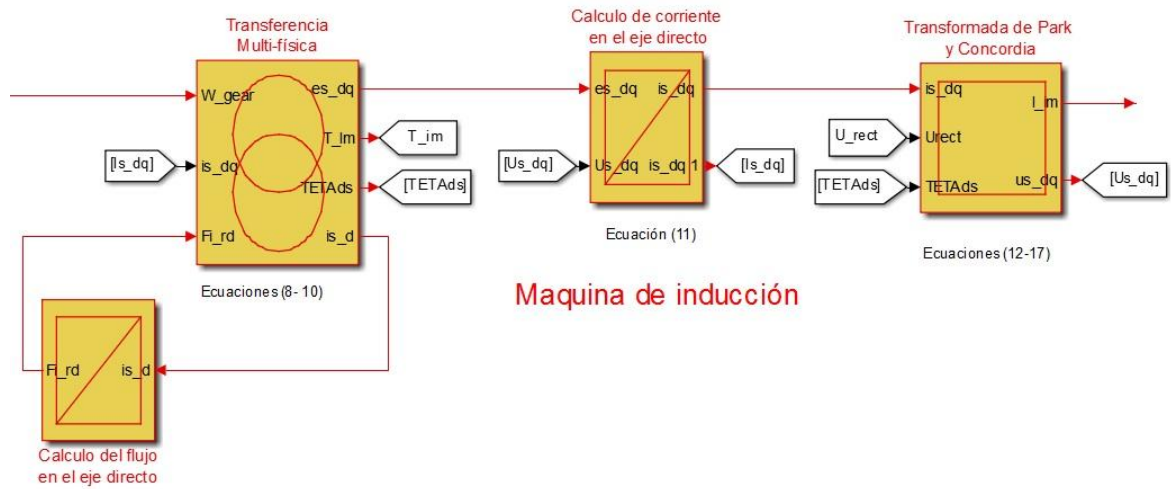
$$[T(\theta_{d/s})]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{ds} & -\sin \theta_{ds} \\ \sin \theta_{ds} & \cos \theta_{ds} \end{bmatrix}$$

Figura 11. EMR Transformada de Park y Concordia.



En la Figura 12 podemos observar la unión de los bloques mencionados anteriormente, representando en conjunto, el modelado de la Máquina de Inducción en donde debido a la potencia mecánica de entrada producida por el torque aplicado en el eje del generador genera una potencia eléctrica en los terminales del generador.

Figura 12. EMR de la Máquina de Inducción.

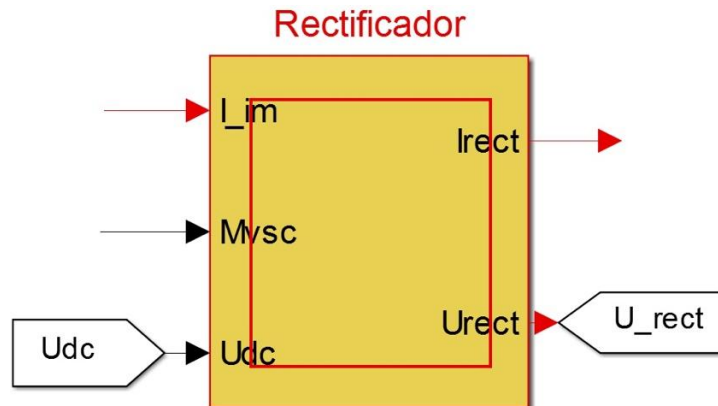


5.2.5 Rectificador de tensión y corriente. La Figura 13 representa otra conversión eléctrica en la cual las señales i_{im} , U_{dc} se modulan con la señal m_{vsc} obteniendo u_{rect} y i_{rect} respectivamente, generando así la Potencia Eléctrica que entrega el generador al barraje DC.

$$U_{rect} = m_{vsc} * u_{DC} \tag{18}$$

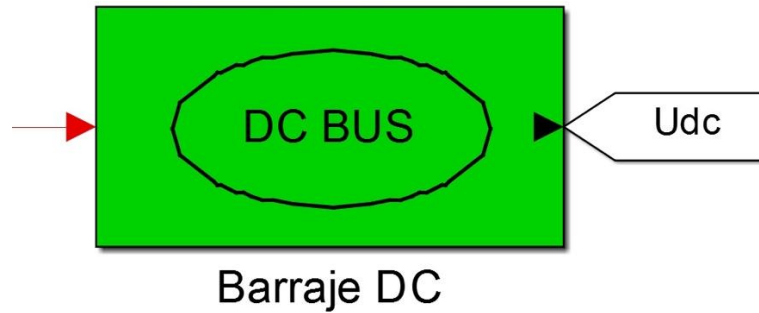
$$i_{rect} = m_{vsc} \cdot i_{im} \tag{19}$$

Figura 13. Rectificador.



5.2.6 Bus DC Los terminales del bloque de la Figura 14 representan el entorno del sistema de conversión de energía eólica estudiado, el cual se asume U_{dc} como un barraje ideal en DC y la corriente rectificadora obtenida por el sistema de potencia I_{rect} .

Figura 14. EMR del Bus DC.



6. MÉTODO DE CONTROL

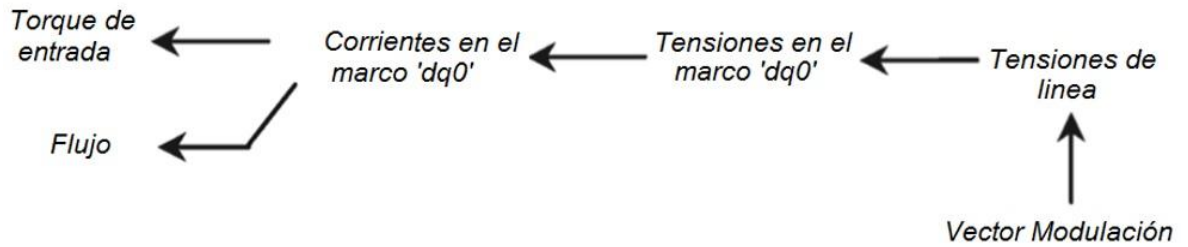
A continuación, se describen los bloques de control utilizando el formalismo EMR y las ecuaciones propuestas por Alain Bouscayrol en [26] para controlar de manera independiente el flujo y el torque en la máquina de inducción jaula de ardilla. Basados en la estrategia de seguimiento del punto de extracción de máxima potencia (MPPT) y controladores PI clásicos (proporcional integral), para garantizar la tensión modulada en bornes del generador.

Esta sección se divide en cuatro subsecciones: estrategia de seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT), lazo de ajuste, estructura de control y estimación de variables no medibles.

6.1 LAZO DE AJUSTE.

El lazo abierto de ajuste (Figura 15), representa la secuencia para controlar de forma directa el torque de entrada del generador y el flujo del rotor en eje directo (T_{im} y ϕ_{rd}) de manera independiente. Manipulando el vector modulación m_{vsc} , el cual se encarga de modular la tensión en el estator del generador impuesta por el bus de dc (1500 v). Con esta tensión modulada y utilizando la transformada de Park, se obtienen las tensiones y corrientes en el marco de referencia “dq0” (u_{sdq} y i_{sdq}); donde i_{sd} permite controlar el flujo e i_{sq} controlar el torque.

Figura 15. Lazo de ajuste del SCEE.



6.1.1 Estrategia de seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT). El MPPT se utiliza para extraer la mayor cantidad de energía a partir del viento, con los datos del fabricante de la turbina, se traza (Figura 17.) teniendo en cuenta la potencia para cada velocidad del viento y la velocidad de rotación. La potencia máxima, que puede extraerse para cada velocidad del viento, se deduce a partir de esta nueva curva. La cual, se construye expresando en una tabla el T_{im_ref} par de la máquina desde la velocidad de rotación W_{gear_medido} medida en el rotor de turbina. Por otra parte, un valor máximo de la velocidad de rotación se superpone a esta curva óptima [21]. Esta estrategia MPPT (Figura 16) sencilla sólo requiere un sensor del número de revoluciones.

Figura 16. EMR Bloque del MPPT.

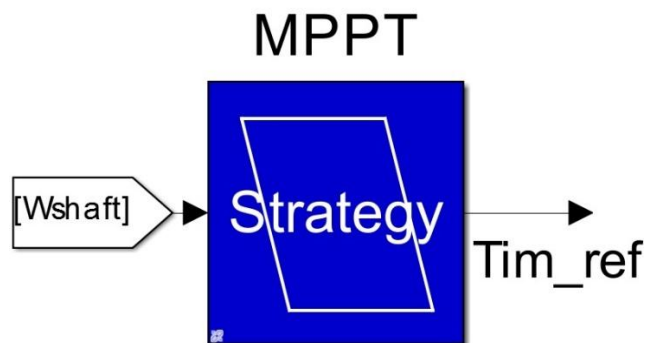
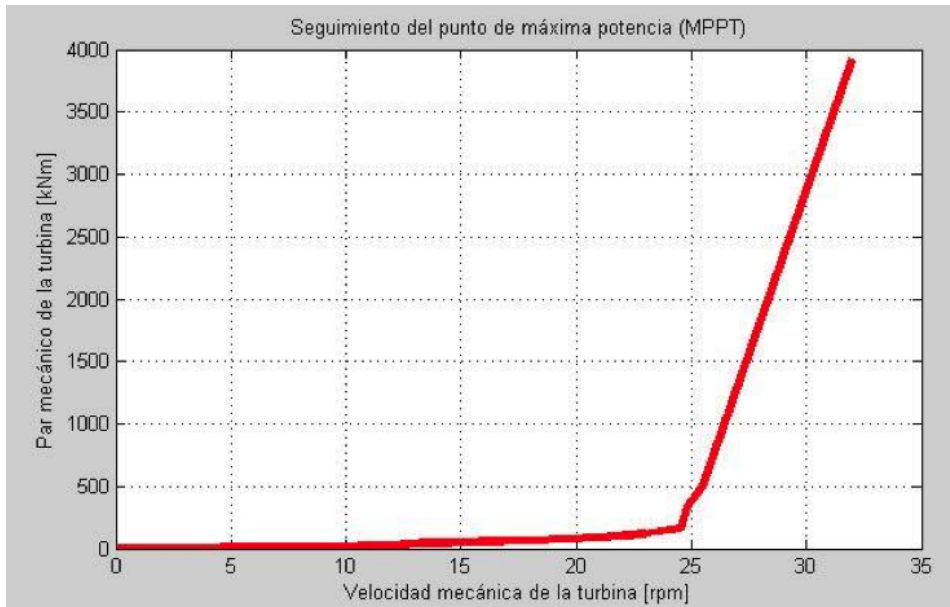


Figura 17. Perfil par mecánica vs velocidad de la turbina [21].



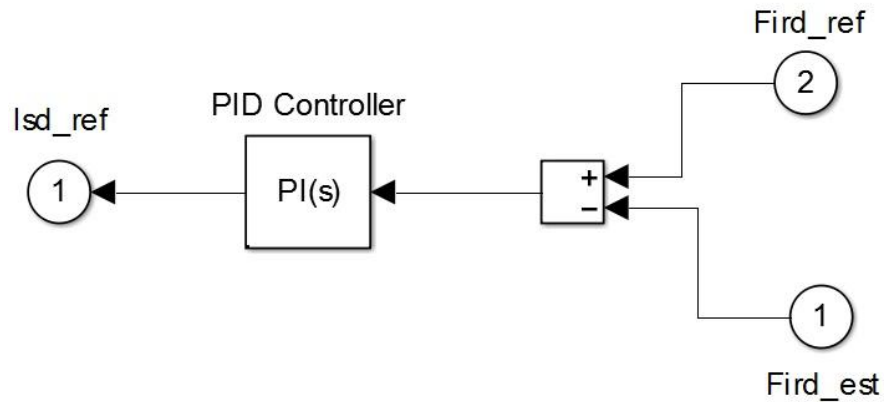
6.1.2 Estructura de control. Para la conversión de un elemento (sin acumulación de energía), se utilizan inversiones directas Figura 19. (paralelogramos simples): sin necesidad de mediciones ni controladores. Para la inversión de los elementos de acumulación, es necesario un controlador (paralelogramos cruzados - Figura 20.) y también se necesitan algunas mediciones.

La inversión de (7) requiere un regulador de flujo para proporcionar la corriente del estator en eje directo de referencia i_{sd_ref} , desde el flujo ϕ_{rd_ref} y la medida (o estimada) de flujo ϕ_{rd_ref} .

$$i_{sd_ref} = C_1 [\phi_{rd_ref} - \phi_{rd_estimado}] \quad (20)$$

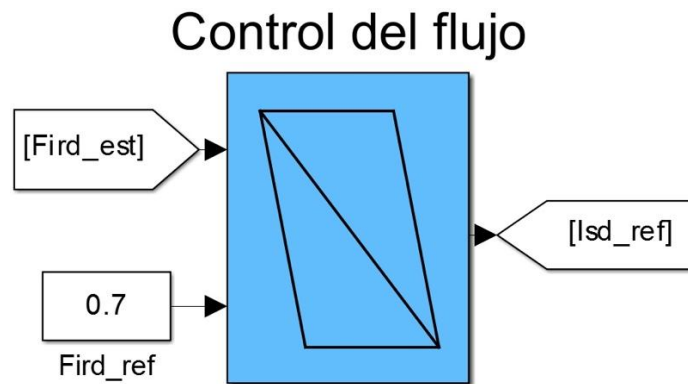
Donde $C_1 [\phi_{rd_ref} - \phi_{rd_estimado}]$ es un controlador PI (proporcional integral) ver figura 20.

Figura 18. Controlador de flujo Matlab-Simulink.



Para el controlador PI, se utilizó la toolbox de Matlab-Simulink “PID Controller”, la cual se sintonizó para obtener los parámetros: proporcional = 212.170486705628 e integral = 8.52905540337755.

Figura 19. EMR control de flujo.

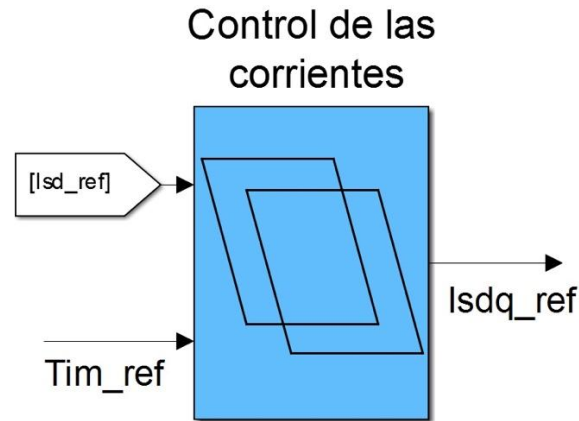


La inversión de (8) y (9) conduce a la corriente de referencia en el estator i_{sq_ref} , la cual dependerá del par de referencia T_{im_ref} y el flujo en el eje director del estator de referencia ϕ_{rd_ref} .

$$i_{sq_ref} = T_{im_ref} \frac{L_r}{PM_{sr} \phi_{rd_ref}} \quad (21)$$

La Figura 20. siguiendo el principio de acción-reacción del EMR; me permite hallar la corriente en eje directo y eje de cuadratura del estator de referencia i_{sdq_ref}

Figura 20. EMR inversión con controlador (elementos acumuladores)



La inversión de (11) conduce a las tensiones en el estator de referencia en los ejes (d, q) u_{sdq_ref} Figura 23. con dos controladores de corriente en el estator (Figura 21, Figura 22), uno de referencia i_{sdq_ref} y otro estimado $i_{sdq_estimado}$ en los ejes (d, q), con una f.e.m. $e_{sdq_estimado}$ de compensación.

$$u_{sd_ref} = C_2 [i_{sd_ref} - i_{sd_estimado}] + e_{sd_estimado} \quad (22)$$

$$u_{sq_ref} = C_3 [i_{sq_ref} - i_{sq_estimado}] + e_{sq_estimado} \quad (23)$$

Figura 21. Controlador PI de corriente en eje directo del estator.

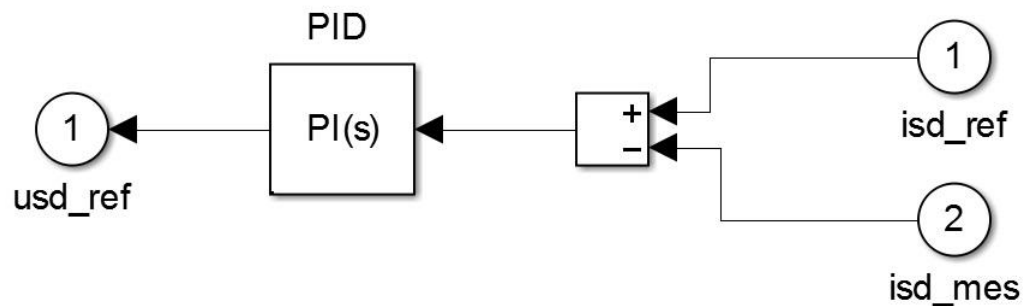


Figura 22. Controlador PI de corriente en eje de cuadratura del estator

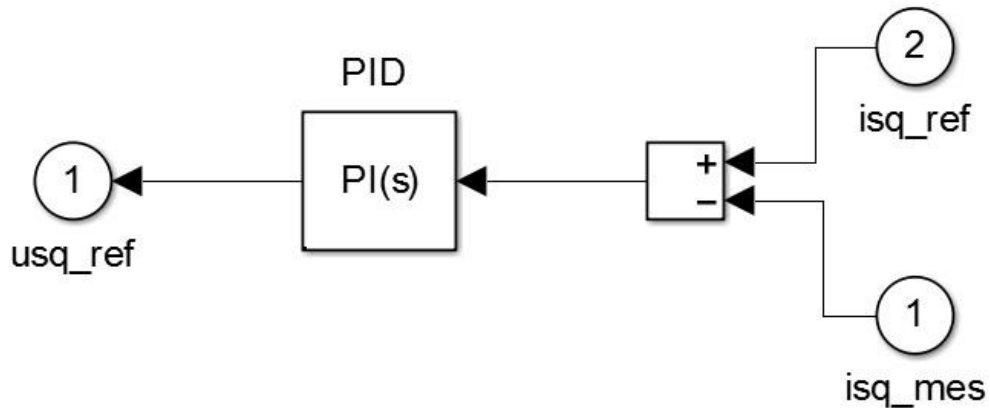
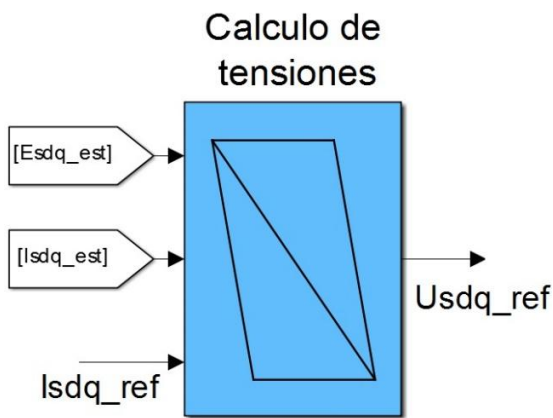


Figura 23. EMR tensión referida de referencia del estator en los ejes (d, q).



La inversión directa de las ecuaciones (16) y (17) conduce a la tensión de referencia rectificadora y de fase u_{rect_ref} . Esta se obtiene al aplicar las transformadas inversas de Park y Concordia como se explica en el Anexo1.

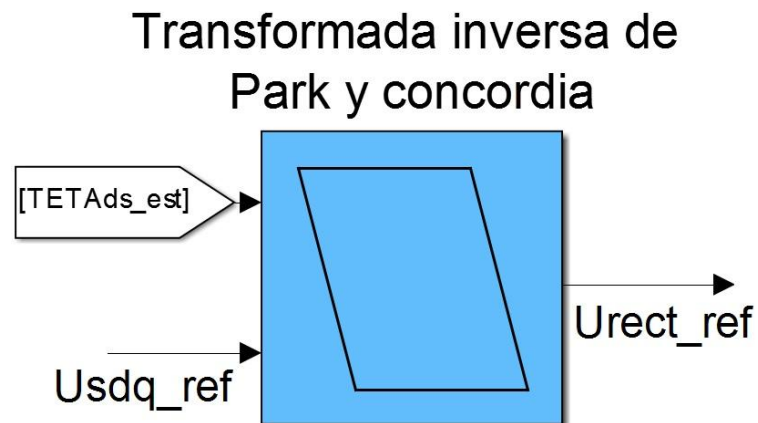
$$u_{rect_ref} = K_{vu} C^{-1} T(\theta_{ds})^{-1} [u_{sdq}] \quad (24)$$

K_{vu} es la matriz de transformación de tensión $K_{vu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$ y C^{-1} es la

transformada inversa de concordia $C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$.

La Figura 24, es la tensión referida en bornes del generador de inducción jaula de ardilla.

Figura 24. EMR tensión de referencia en el estator del generador.

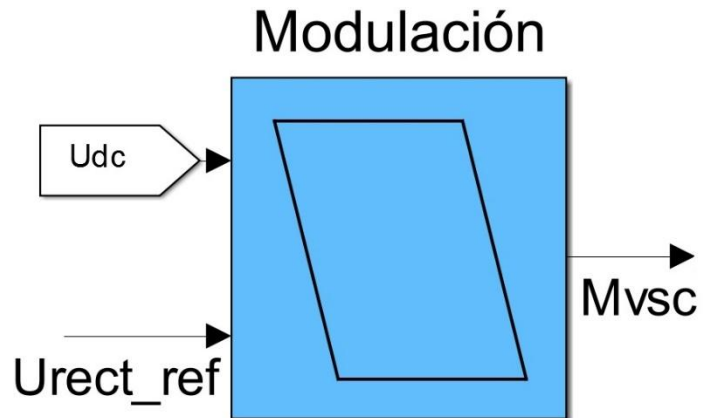


Finalmente, la inversión de (18) y (19) produce la referencia del vector modulación m_{vsc} . El cual, convierte la tensión de DC a tensión AC en el estator de la máquina de inducción jaula de ardilla teniendo como referencia la tensión de 1500V dispuesta por el Bus DC U_{DC} .

En la figura 25 se representa el modelo grafico segundo el EMR del vector modulación:

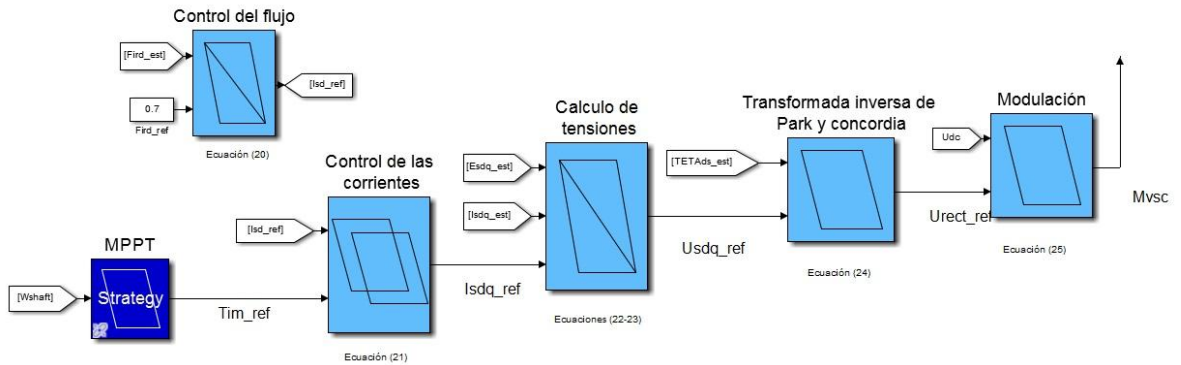
$$m_{vsc} = u_{rect_ref} \frac{1}{U_{DC}} \quad (25)$$

Figura 25. EMR vector modulación.



En la Figura 26. se acoplan los bloques de asignación del formalismo de EMR, para cada etapa de control según [26]. El cual generará como acción de control, un torque de comando o de referencia T_{im_ref} . El objetivo de este método es controlar el torque de entrada T_{im} y el flujo en el eje directo del rotor ϕ_{rd} del generador. Lo cual implica tener un flujo de referencia constante ϕ_{rd_ref} 0,7 [Webber], obtenido a partir de pruebas en la máquina de inducción a funcionamiento continuo y condiciones nominales. Un torque de referencia T_{im_ref} variable, el cual garantiza la máxima extracción de potencia a partir de la velocidad del viento (tabla velocidad del viento vs torque aerodinámico). El esquema de control se presenta mediante el formalismo EMR usando reglas basadas en inversión [16] [17].

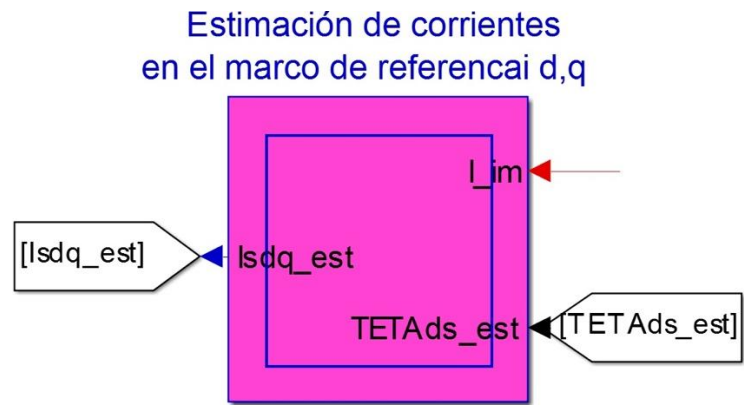
Figura 26. Estructura de control del SCEE.



6.1.3 Estimación de variables no medibles. Como algunas variables no son medibles físicamente, debido a características constructivas de la máquina de inducción jaula de ardilla, la cual no requiere de una conmutación mecánica a parte de su misma excitación. Debido a que la corriente eléctrica del rotor necesaria para producir torque, es inducida electromagnéticamente por el campo de la bobina del estator (Figura 30).

El flujo del rotor en eje directo $\phi_{rd_estimado}$, corriente en el estator $i_{sdq_estimada}$ y tensión inducida en el estator del generador $e_{sdq_estimada}$ en eje directo y de cuadratura se estiman utilizando las relaciones obtenidas a través del modelo [24] a partir, de las variables medibles del sistema de potencia (i_{im} , W_{gear} y W_{shaft}).

Figura 27. EMR estimación de corriente Isdq



El $\phi_{rd_estimado}$ flujo estimado se obtiene de la corriente $i_{sd_estimado}$ usando (7).

$$\phi_{rd_estimado} = i_{sd_estimado} M_{sr} - T_r \frac{d(\phi_{rd})}{dt} \quad (26)$$

Las ecuaciones (7) y (9) del numeral 4.2.4, se utilizan para realizar el cálculo estimado de: corrientes equivalentes (Figura 27), tensiones inducidas (Figura 28) y flujo en un marco de referencia (d, q) (Figura 29) A partir de medidas reales de la corriente de salida y velocidad rotacional de la máquina de inducción jaula de ardilla.

$$i_{sdq_estimado} = CT(\theta_{ds}) K_{ii_inv} * i_{im} \quad (27)$$

$$i_{abc} = K_{ii_inv} * i_{im}$$

$$i_{albe} = C * i_{abc}$$

$$i_{sdq_est} = [T(\theta_{ds})] i_{albe}$$

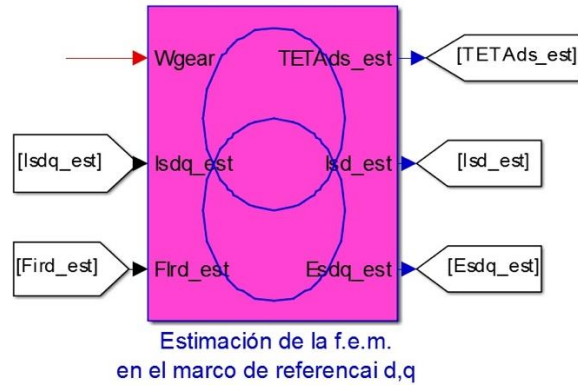
Donde C es la matriz de transformada de concordia $C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$.

K_{ii_inv} es la matriz inversa de transformación de corriente $K_{ii} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$.

$$e_{sd_estimado} = -\frac{d(\theta_{ds_estimado})}{dt} L_s i_{sd_estimado} \sigma - \phi_{rd_estimado} \frac{M_{sr}}{(L_r T_r)} \quad (28)$$

$$e_{sq_estimado} = -\frac{d(\theta_{ds_estimado})}{dt} L_s i_{sq_estimado} \sigma - \phi_{rd_estimado} \frac{M_{sr}}{(L_r)} PW_{gear} \quad (29)$$

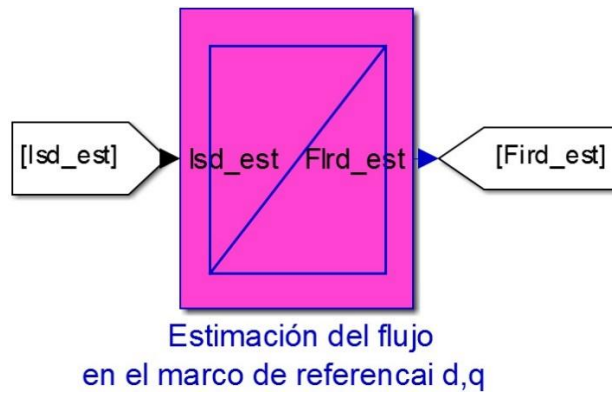
Figura 28. EMR tensiones inducidas ejes d-q.



La estimación de $\theta_{ds_estimado}$ se realiza a partir de la ecuación (10):

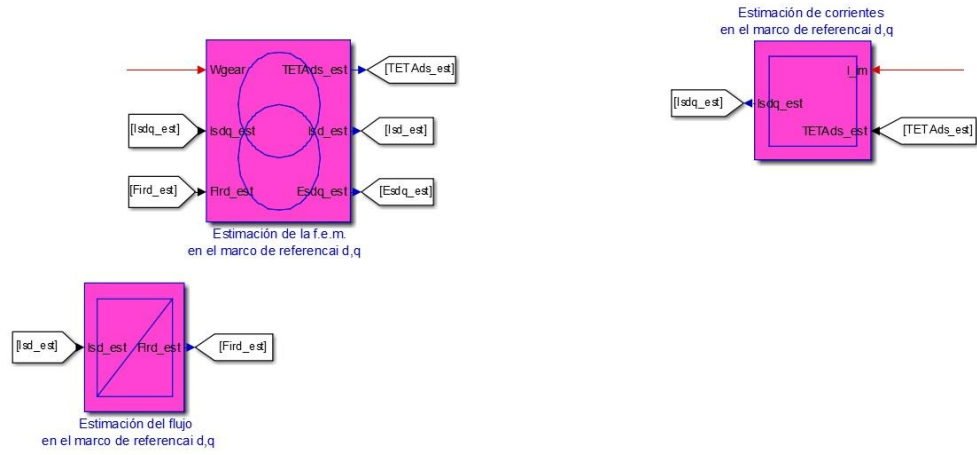
$$\frac{d}{dt} \theta_{ds_estimado} = \frac{M_{rs}}{Tr\phi_{rd_estimado}} i_{sq_estimado} + pW_{gear} \quad (30)$$

Figura 29. EMR estimación de flujo.



Donde $\sigma =$ coeficiente de dispersión

Figura 30. EMR variables estimadas.

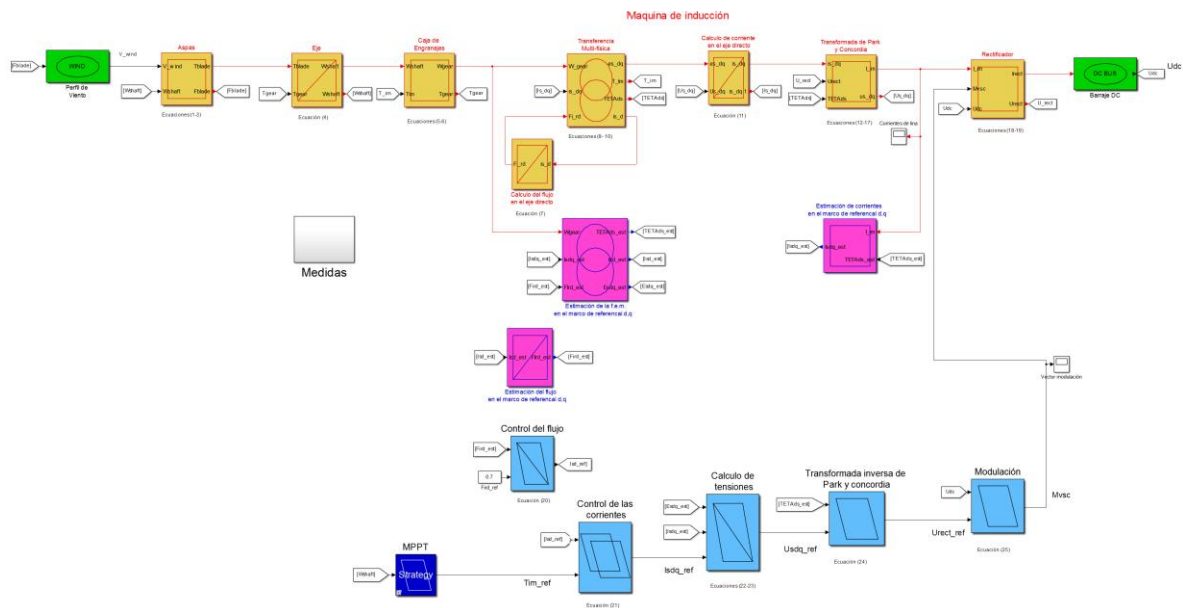


7. SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA.

Agrupando todos los subsistemas presentados en los capítulos anteriores se obtiene el sistema de conversión de energía eólica presentado en la Figura 31 (ver Anexo C).

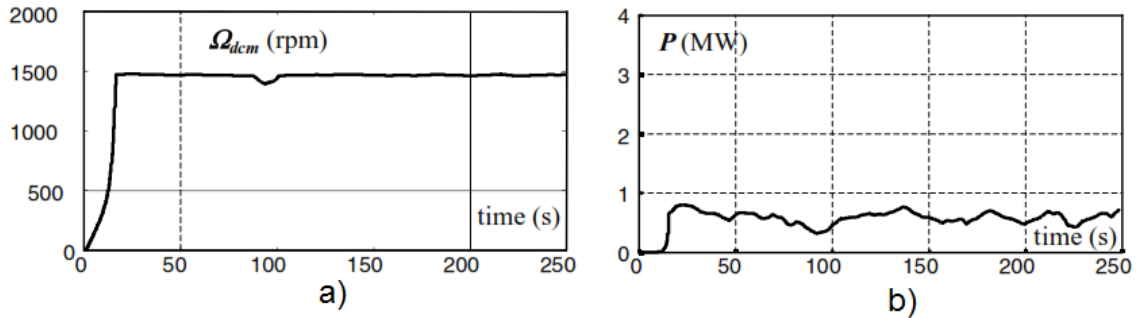
En la simulación se agrega un bloque llamada “Medidas” en el cual se encuentran los resultados de simulación analizados en la sección 6.1.

Figura 31. Sistema de generación de energía eólica implementado en Matlab-Simulink.



Algunos de los resultados propuestos por [25] con los cuales se puede comprobar el funcionamiento de la simulación son presentados en la Figura 32.

Figura 32. a) Velocidad de rotación. b) Potencia Mecánica [25].



Los parámetros de la máquina de inducción, turbina y caja de engranajes son propuestos en los artículos [25] [26] con los cuales se implementaron las ecuaciones de los capítulos cuatro (4) y cinco (5) en paralelo con el formalismo de la representación energética macroscópica EMR por medio de la herramienta computacional Matlab/Simulink (Figura 33) se presentan a continuación:

Tabla 1. Parámetros de la máquina de inducción.

Parametros de la máquina de inducción		
Tipo	Jaula de ardilla	
Par de polos	p	2
Resistencia estatórica	R_s	6 [mΩ]
Resistencia rotórica	R_r	5 [mΩ]
Inductancia del estator	L_s	2.5 [mH]
Inductancia del rotor	L_r	1.99 [mH]
Inductancia Mutua	M_{sr}	2.2 [mH]
Coeficiente de dispersión	σ	0.0271
Cte de tiempo rotórica	T_r	0.4167
Cte de tiempo estatórica	T_s	0.3980

Tabla 2. Parámetros de la turbina.

Parametros de la turbina		
Velocidad nominal	V_{asp_nom}	25 [m/s]
Radio de las aspas	R	24 [m]
Densidad del aire	ρ	1.22 [Kg/m ³]
Coefficiente de fricción	f	1 [Nms]
Coefficiente de inercia	J	1600 [Kg/m ²]

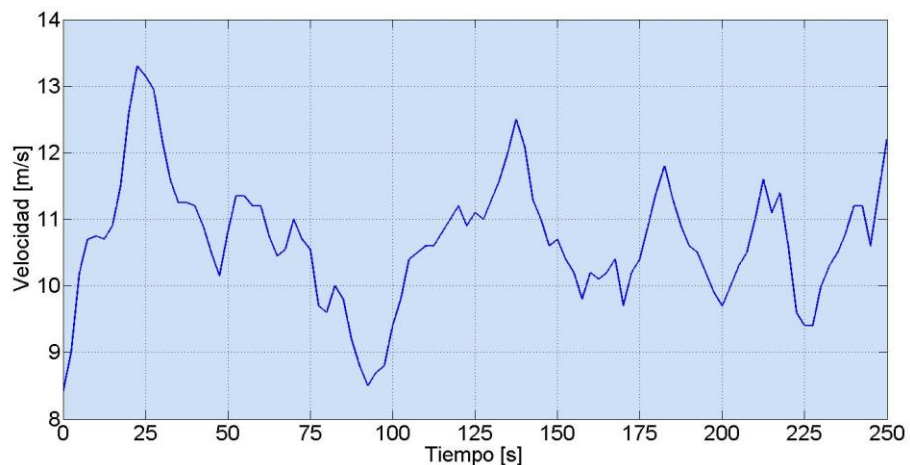
Tabla 3. Parámetros de la caja de engranajes.

Parametros de la caja de engranajes		
Relacion de transmisión	K_{gear}	1000/25

7.1 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

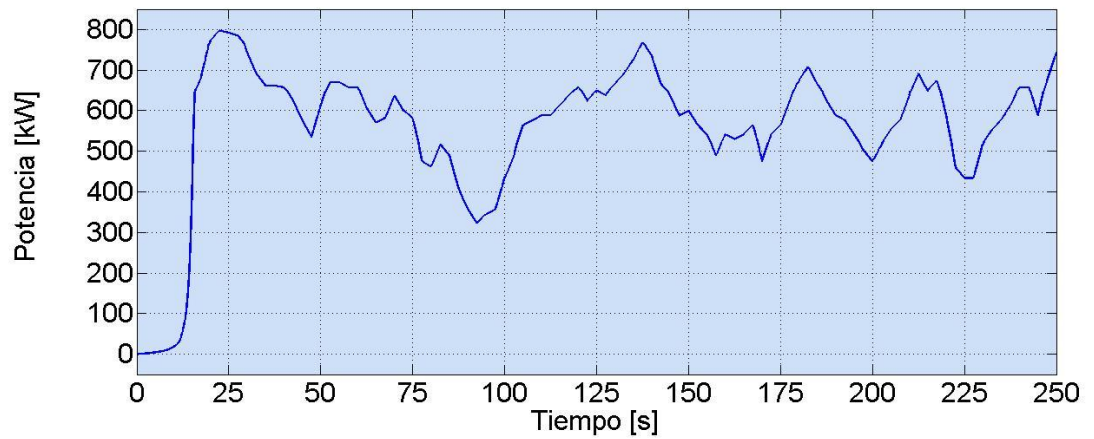
Para obtener las simulaciones del modelo de sistema de conversión de energía eólica se generó un perfil de viento el cual se muestra en la siguiente Figura 33:

Figura 33. Perfil del Viento



La Figura 34 muestra el comportamiento de la potencia mecánica que la turbina extrae del viento.

Figura 34. Potencia mecánica extraída del viento.

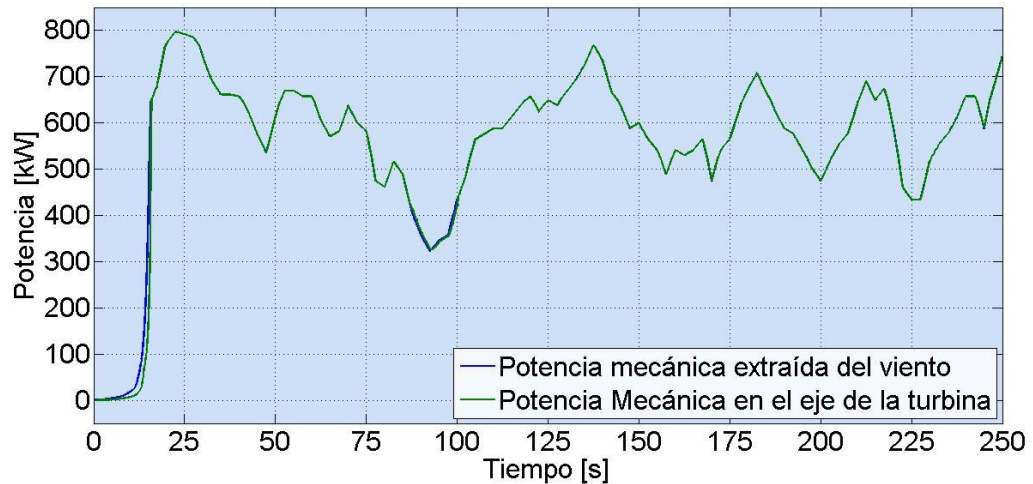


En la Figura 35 se observa la comparación de la potencia mecánica extraída del viento y la potencia mecánica transferida al eje de la turbina.

Se presenta una pérdida de potencia mecánica entre 0 y 16 [s] y entre 90 y 100 [s]. Estas pérdidas son debido al coeficiente de inercia que presenta el eje. El equivalente del eje de la turbina está representado por la ecuación:

$$J \frac{d}{dt} W_{shaft} = -T_{gear} + T_{blade} - f W_{shaft} .$$

Figura 35. Potencia mecánica extraída del viento y potencia mecánica en el eje de la turbina.



Analizando la gráfica de velocidad del eje (Figura 36) se puede observar que las pérdidas se presentan a grandes variaciones de la velocidad.

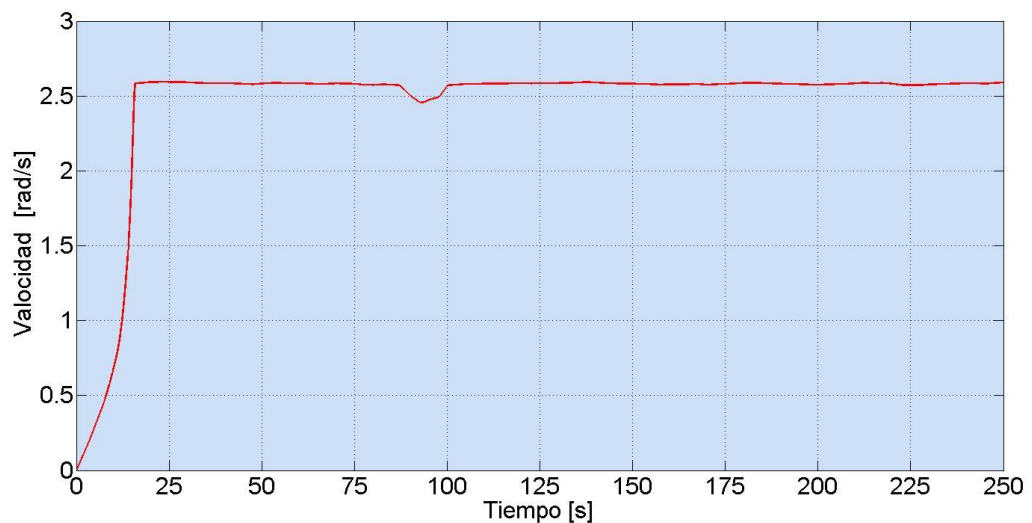
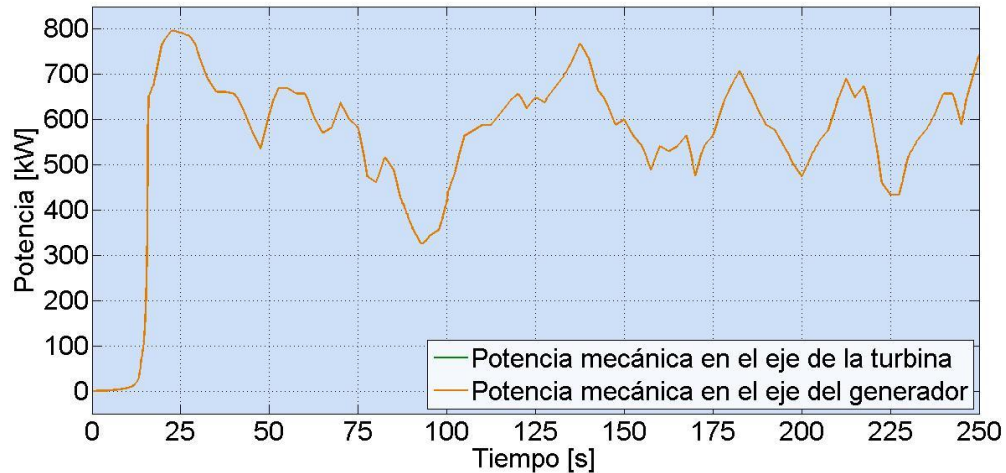


Figura 36. Velocidad del eje.

Como se mencionó en el capítulo anterior, la caja de engranaje se asume que es ideal lo cual no genera pérdidas entre el acoplamiento del eje de la turbina y el eje

del generador. En la Figura 37. se puede comprobar que estas potencias mecánicas son iguales.

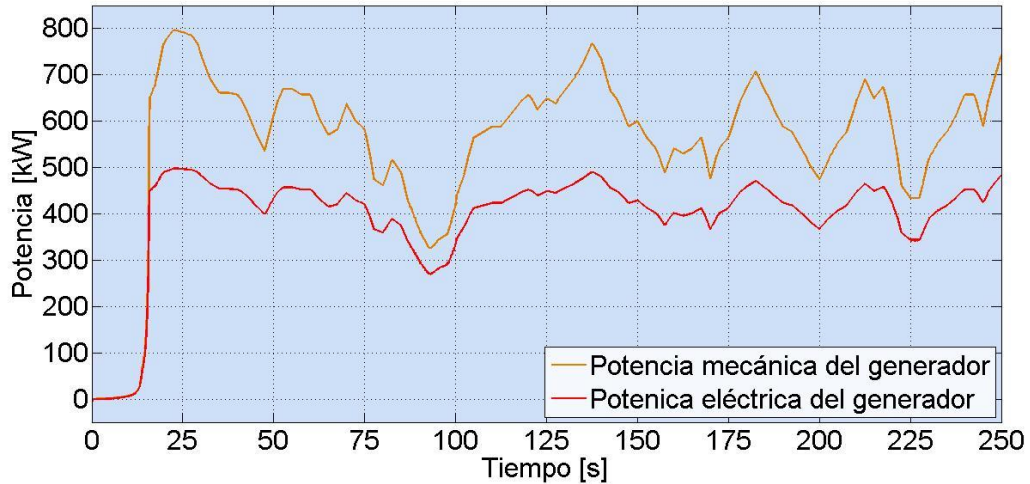
Figura 37. Potencias mecánicas en el eje de la turbina y potencia mecánica en el eje del generador.



Después de obtener la corriente que entrega el generador podemos calcular la Potencia Eléctrica entregada por el generador. En la Figura 38 podemos observar la comparación entre la Potencia Mecánica de entrada del generador y la Potencia Eléctrica de salida.

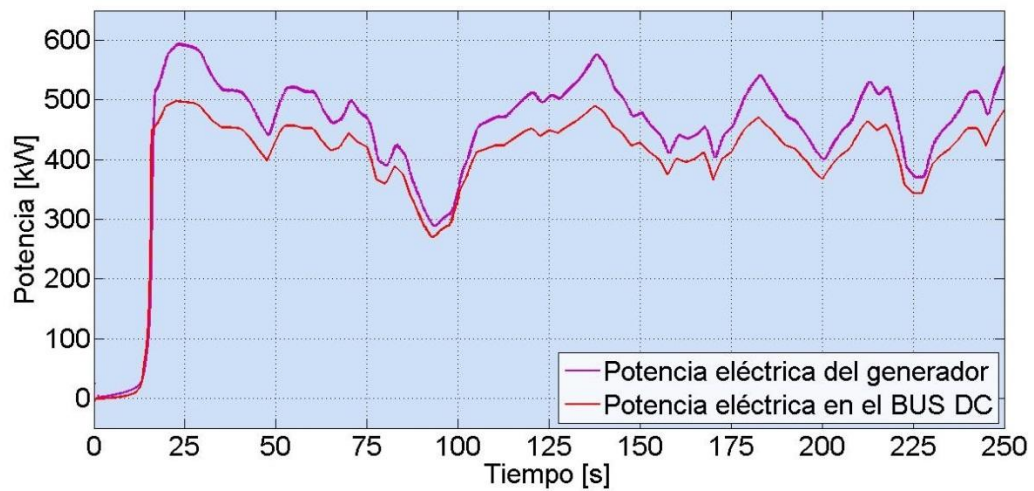
Estas pérdidas en el generador están asociadas a pérdidas en los bobinados del rotor y estator, a pérdidas por histéresis y corrientes parásitas, pérdidas por rozamiento y fricción a causa del movimiento del rotor y pérdidas diversas.

Figura 38. Potencia mecánica del generador y potencia eléctrica del generador.



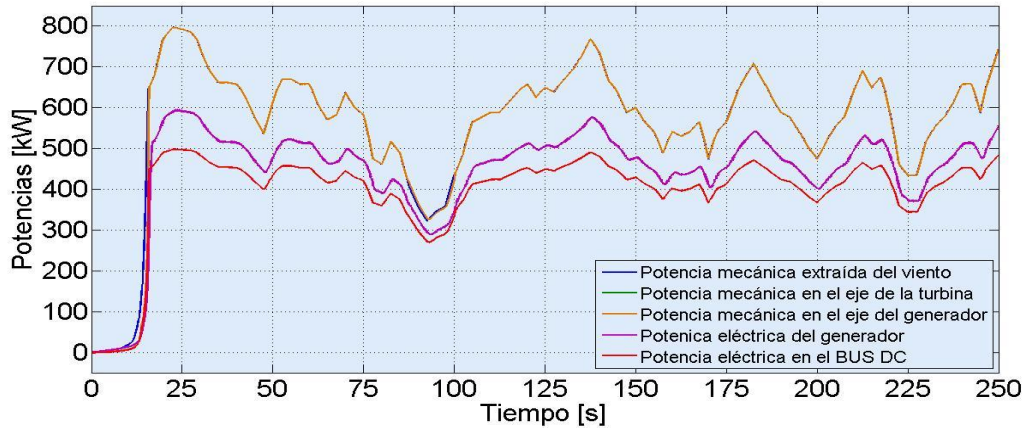
La última etapa del sistema de potencia según el formalismo EMR, en la cual se rectifica la corriente entregada por el generador y el voltaje del bus DC. La potencia de entrada y salida del rectificador se representan en la siguiente Figura 39.

Figura 39. Potencia eléctrica del generador y potencia eléctrica en el bus DC.



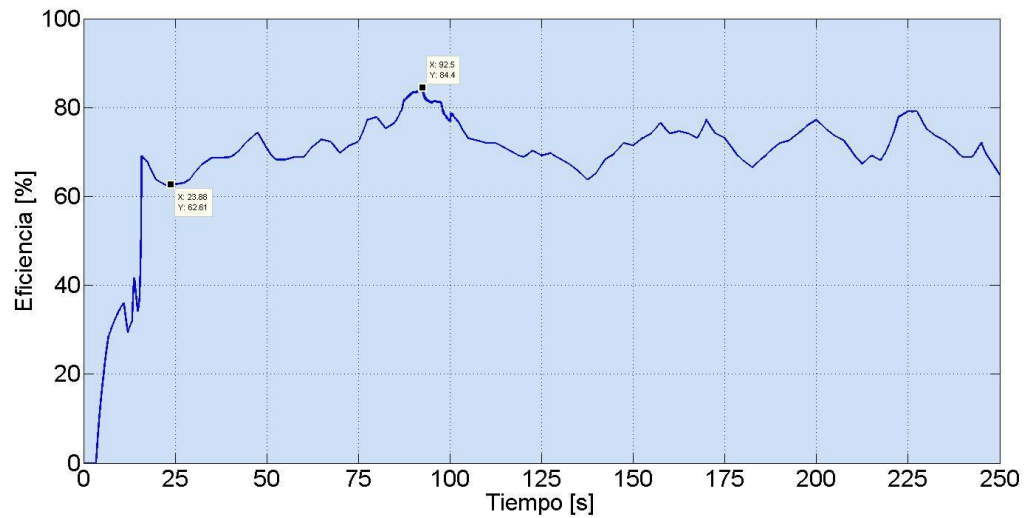
En la Figura 40 se muestra la relación de todas las potencias que intervienen en el sistema de conversión de energía eléctrica.

Figura 40. Potencias del sistema.



Por ultimo en la Figura 41 se presenta la eficiencia del sistema entre la potencia mecánica extraída del viento por la turbina, siendo esta la potencia de entrada al sistema y la potencia eléctrica en el bus DC, potencia de salida del sistema, la cual varía aproximadamente entre 84,43% y 62,61%.

Figura 41. Eficiencia del sistema.



8. CONCLUSIONES

En este trabajo de grado se realizó la identificación de un modelo para un sistema de conversión de energía eólica y su respectiva simulación en Matlab/Simulink utilizando el formalismo de representación energética macroscópica, por lo cual se convierte en un aporte significativo a los modelos de simulación del laboratorio de integración energética y micro redes, que el grupo GISEL de la escuela de Ingeniería Eléctrica, electrónica y Telecomunicaciones (E3T) planea construir.

El formalismo de representación energética macroscópica permite realizar un análisis detallado del sistema de conversión de energía eólica, partiendo de la agrupación de subsistemas básicos y teniendo en cuenta el principio de acción-reacción. Por tanto, es posible representar los flujos de energía que intervienen en el proceso de funcionamiento de dicho sistema.

La representación energética macroscópica permite representar un esquema de control detallado que se basa en la cadena de sintonía siguiendo el principio de inversión. Para ello todas las variables se consideran medibles y las que no son posibles de medir físicamente se realiza una estimación, lo que produce un sistema de control con el mayor número de mediciones y controladores garantizando el buen desempeño de todo el sistema.

Los resultados de simulación obtenidos para la potencia en cada uno de los componentes del sistema de conversión de energía eólica, permite analizar las posibles pérdidas presentes en los subsistemas, identificando en cuál se presenta mayores pérdidas. En las gráficas se puede observar que las pérdidas significativas del sistema están presentes en el generador de inducción, presentado una eficiencia entre el 62% y 84%.

Para futuros trabajos se sugiere que los datos de entrada del viento sean resultado de un estudio realizado en el parque tecnológico Guatiguara de la Universidad Industrial de Santander, lugar donde se pretende construir el laboratorio de integración energética y micro redes. Realizar nuevas simulaciones en las cuales se reemplace algunos de los subsistemas ya que el formalismo utilizado me permite reemplazar cualquiera de los subsistemas sin necesidad de afectar los demás, facilitando el análisis del sistema con nuevos parámetros como: turbina, generador o control.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hongxing Y, Wei Z, Chengzhi L. Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar–wind power generation system. *Applied Energy* 2009;86(2):163169.
- [2] Baroudi JA, Dinavahi V, Knight AM. A review of power Converter topologies for wind Generators, *Renew Energy* 2007; 32(14):2369–2385.
- [3] Chen Z, Guerrero JM, Blaabjerg F. A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines, *IEEE Trans Power Electronics* 2009;24(8):1859-1875.
- [4] P. Ledesma and J. Usaola, “Doubly fed induction generator model for transient stability analysis,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 2, pp. 388–397, Jun. 2005.
- [5] M. E. Haque, K. M. Muttaqi and M. Negnevitsky, “Control of a Stand Alone Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator,” *IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp.1-9, août2008.
- [6] T. Tafticht, K. Agbossou, A. Cheriti, and M.L. Doumbia, “Output Power Maximization of a Permanent Magnet Synchronous Generator Based Stand-alone Wind Turbine,”*IEEE Industrial Electronics*, vol. 3, pp. 2412-2416, July 2006.
- [7] A. Manallah, H. Kumar Sharma, G. Ahuja, R. Bhuvanewari, “Control and dynamic Analysis of grid connected variable speed SCIG based wind energy

conversion system,” in Proc.4th International Conference on computational intelligence and communication 2012,p.588–593.

[8] K. Chen, A. Bouscayrol, W. Lhomme, "Energetic Macroscopic Representation and Inversion-based control: Application to an Electric Vehicle with an electrical differential", *Journal of Asian Electric Vehicles*, Vol. 6, no.1, June issue, pp. 109711-02, 2008.

[9] A. Bouscayrol, P. Delarue, X. Guillaud, "Power strategies for Maximum Control Structure of a wind energy conversion system with a synchronous machine", *Renewable Energy*, vol. 30, May 2005, pp. 2273-2288.

[10] Gonzalo Acevedo, Hernando, Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico. Escuela de Ingenierías eléctricas, electrónica y Telecomunicaciones universidad Industrial de Santander 2008.

[11] P. Vas, "Vector control of ac machines", Clarendon Press, Oxford, 1990.

[12] A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J. P. Hautier, F. Meibody-Tabar, and M. Pietrzak-David, "Multimachine multiconverter system: Application for electromechanical drives," *Eur. Phys. J.—Applied Physics*, vol. 10, no. 2, pp. 131–147, May 2000.

[13] Bang D, Polinder H, Ferreira JA, van Rooij R.P.J.O.M. New active speed stall control compared to pitch control for direct-drive wind turbines. In European wind energy conference & exhibition, EWEC 2007, Milan, Italy; May 7-10, 2007.

[14] Neammanee B, Sirisumranukul S, Chatratana S, Control Performance Analysis of Feedforward and Maximum Peak Power Tracking for Small-and

Medium-Sized Fixed Pitch Wind Turbines. In 9th International Control, Automation, Robotics and Vision Conference, ICARCV '06, Singapore, December 5-8, 2006.

[15] Hilloowala R, Sharaf A. A utility interactive wind energy conversion scheme with an asynchronous DC link using a supplementary control loop. *IEEE Trans Energy Convers* 1994;9(3):558–63.

[16] J. P. Hautier and P. J. Barre, “The causal ordering graph—A tool for modelling and control law synthesis,” *Stud. Inform. Control J.*, vol. 13, no. 4, pp. 265–283, Dec. 2004.

[17] P. J. Barre, A. Bouscayrol, P. Delarue, E. Dumetz, F. Giraud, J. P. Hautier, X. Kestelyn, B. Lemaire-Semail, and E. Semail, “Inversion-based control of electromechanical systems using causal graphical descriptions,” in *Proc. IEEE-IECON*, Paris, France, Nov. 2006, pp. 5276–5281.

[18] P. Delarue, A. Bouscayrol, A. Tounzi, X. Guillaud, and G. Lancigu, “Modelling, control and simulation of an overall wind energy conversion system,” *Renew. Energy*, vol. 28, no. 8, pp. 1159–1324, Jul. 2003.

[19] P. Delarue, A. Bouscayrol, and E. Semail, “Generic control method of multi-leg voltage-source-converters for fast practical implementation,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 2, pp. 517–526, Mar. 2003.

[20] A. Bouscayrol, M. Pietrzak-David, P. Delarue, R. Pena-Eguiluz, P. E. Vidal, and X. Kestelyn, “Weighted control of traction drives with parallel-connected AC machines,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 6, pp. 1799–1806, Dec. 2006.

[21] A. Bouscayrol, X. Guillaud, R. Teodorescu, P. Delarue, and W. Lhomme, “Hardware-in-the-loop simulation of different wind turbines using Energetic

Macroscopic Representation,” in Proc. IEEE-IECON, Paris, France, Nov. 2006, pp. 5338–5343.

[22] Lopez M., Vannier JC., Sadarnac D. “Sistemas de conversión de energía eólica control y diseño. Association Chilienne de Contrôle Automatique, Jan 2007, Temuco, Chile <hal-00243098>.

[23] Mathew, S. (2006). Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Springer, Germany.

[24] González, L. Gerardo, Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores sincrónicos operando en régimen de velocidad variable, Universidad politécnica de Valencia, Departamento de ingeniería electrónica, Mayo 2011.

[25] A. Bouscayrol, P. Delarue, F. Giraud, X. Guillaud, X. Kestelyn, B. Lemaire and W. Lhomme. “Teaching drive control using Energetic Macroscopic Representation - expert level”, Université de Lille Nord de France.

[26] A. Bouscayrol, P. Delarue, X. Guillaud, B. Lemaire “Energetic Macroscopic Representation and Inversion-Based Control Illustrated on a Wind-Energy-Conversion System Using Hardware-in-the-Loop Simulation”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 12, December 2009

[27] A. Bouscayrol, “Energetic Macroscopic Representation (EMR)”, Université de Lille Nord de France, Mayo 2011.

[28] CABRERA RAMÍREZ, Jhon Alexander, Jácome García, Andrés Mauricio. Identificación e implementación de modelos PVP para simulación de un sistema

de generación de energía fotovoltaica. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2015.

[29] DUARTE CARRASCAL, José Luis, Vargas Bernal, Erwin Alexander. Modelado y simulación de un algoritmo de control de potencia de sistemas de generación fotovoltaicos basado en la técnica P&O – MPPT (PERTURB AND OBSERVE MAXIMUM POWER POINT TRACKING). Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2015.

[30] YULY ALEJANDRA, Pérez Ruiz, Yury Karina, Betancur Castro. Identificación e implementación de modelos de baterías para una micro red en el entorno gráfico de simulación Simulink® de MATLAB®.

[31] APARICIO GUTIERREZ, Laura Cristina, Pérez Ospino, Luis Carlos. Implementación y simulación de algoritmos de carga en baterías de NiCd, NiMH e Ion-Litio utilizando la herramienta de simulación Simulink® de MATLAB®.

BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO Gonzalo, Hernando, Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico. Escuela de Ingenierías eléctricas, electrónica y Telecomunicaciones universidad Industrial de Santander 2008.

APARICIO GUTIERREZ, Laura Cristina, PÉREZ OSPINO, Luis Carlos. Implementación y simulación de algoritmos de carga en baterías de NiCd, NiMH e Ion-Litio utilizando la herramienta de simulación Simulink® de MATLAB®.

BANG D, POLINDER H, FERREIRA JA, VAN ROOIJ R.P.J.O.M. New active speed stall control compared to pitch control for direct-drive wind turbines. In European wind energy conference & exhibition, EWEC 2007, Milan, Italy; May 7-10, 2007.

BAROUDI JA, DINAVAHI V, KNIGHT AM. A review of power Converter topologies for wind Generators, Renew Energy 2007; 32(14):2369–2385.

BARRRE P. J., BOUSCAYROL A., DELARUE P., DUMETZ E., GIRAUD F., HAUTIER J. P., KESTELYN X., LEMAIRE-SEMAIL B., and SEMAIL E., “Inversion-based control of electromechanical systems using causal graphical descriptions,” in Proc. IEEE-IECON, Paris, France, Nov. 2006, pp. 5276–5281.

BOUSCAYROL A., “Energetic Macroscopic Representation (EMR)”, Université de Lille Nord de France, Mayo 2011.

BOUSCAYROL A., DAVAT B., FORNEL B. DE, FRANÇOIS B., HAUTIER J. P., MEIBODY-TABAR F., and PIETRZAK-DAVID M., “Multimachine multiconverter

system: Application for electromechanical drives,” Eur. Phys. J.—Applied Physics, vol. 10, no. 2, pp. 131–147, May 2000.

BOUSCAYROL A., DELARUE P., GIRAUD F., GUILLAUD X., KESTELYN X., LEMAIRE B. and LHOMME W.. “Teaching drive control using Energetic Macroscopic Representation - expert level”, Université de Lille Nord de France.

BOUSCAYROL A., DELARUE P., GUILLAUD X., “Power strategies for Maximum Control Structure of a wind energy conversion system with a synchronous machine”, Renewable Energy, vol. 30, May 2005, pp. 2273-2288.

BOUSCAYROL A., DELARUE P., GUILLAUD X., LEMAIRE B. “Energetic Macroscopic Representation and Inversion-Based Control Illustrated on a Wind-Energy-Conversion System Using Hardware-in-the-Loop Simulation”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 12, December 2009

BOUSCAYROL A., GUILLAUD X., TEODORESCU R., DELARUE P., and LHOMME W., “Hardware-in-the-loop simulation of different wind turbines using Energetic Macroscopic Representation,” in Proc. IEEE-IECON, Paris, France, Nov. 2006, pp. 5338–5343.

BOUSCAYROL A., PIETRZAK-DAVID M., DELARUE P., PENA-EGUILUZ R., VIDAL P. E., and KESTELYN X., “Weighted control of traction drives with parallel-connected AC machines,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 6, pp. 1799–1806, Dec. 2006.

CABRERA RAMÍREZ, Jhon Alexander, JÁCOME GARCÍA, Andrés Mauricio. Identificación e implementación de modelos PVP para simulación de un sistema de generación de energía fotovoltaica. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2015.

CHEN K., BOUSCAYROL A., LHOMME W., "Energetic Macroscopic Representation and Inversion-based control: Application to an Electric Vehicle with an electrical differential", Journal of Asian Electric Vehicles, Vol. 6, no.1, June issue, pp. 109711-02, 2008.

CHEN Z, GUERRERO JM, BLAABJERG F. A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines, IEEE Trans Power Electronics 2009;24(8):1859-1875.

DELARUE P., BOUSCAYROL A., and SEMAIL E., "Generic control method of multi-leg voltage-source-converters for fast practical implementation," IEEE Trans. Power Electron., vol. 18, no. 2, pp. 517–526, Mar. 2003.

DELARUE P., BOUSCAYROL A., TOUNZI A., GUILLAUD X., and LANCIGU G., "Modelling, control and simulation of an overall wind energy conversion system," Renew. Energy, vol. 28, no. 8, pp. 1159–1324, Jul. 2003.

DUARTE CARRASCAL, José Luis, VARGAS BERNAL, Erwin Alexander. Modelado y simulación de un algoritmo de control de potencia de sistemas de generación fotovoltaicos basado en la técnica P&O – MPPT (PERTURB AND OBSERVE MAXIMUM POWER POINT TRACKING). Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander 2015.

GONZÁLEZ, L. Gerardo, Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores sincrónicos operando en régimen de velocidad variable, Universidad politécnica de Valencia, Departamento de ingeniería electrónica, Mayo 2011.

HAQUE M. E., MUTTAQI K. M. and NEGNEVITSKY M., "Control of a Stand Alone Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator," IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp.1-9, août2008.

HAUTIER J. P. and BARRE P. J., "The causal ordering graph—A tool for modelling and control law synthesis," Stud. Inform. Control J., vol. 13, no. 4, pp. 265–283, Dec. 2004.

HILLOOWALA R, SHARAF A. A utility interactive wind energy conversion scheme with an asynchronous DC link using a supplementary control loop. IEEE Trans Energy Convers 1994;9(3):558–63.

HONGXING Y, WEI Z, CHENGZHI L. Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar–wind power generation system. Applied Energy 2009;86(2):163169.

LEDESMA P. and USAOLA J., "Doubly fed induction generator model for transient stability analysis," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 2, pp. 388–397, Jun. 2005.

LOPEZ M., VANNIER JC.,SADARNAC D."Sistemas de conversión de energía eólica control y diseño. Asociation Chilienne de Contrôle Automatique, Jan 2007, Temuco, Chile <hal-00243098>.

MANAULLAH A., KUMAR SHARMA H., AHUJA G., BHUVANESWARI R., "Control and dynamic Analysis of grid connected variable speed SCIG based wind energy conversion system," in Proc.4th International Conference on computational intelligence and communication 2012,p.588–593.

MATHEW, S. Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Springer, Germany. 2006

NEAMMANEE B, SIRISUMRANUKUL S, CHATRATANA S, Control Performance Analysis of Feedforward and Maximum Peak Power Tracking for Small-and Medium-Sized Fixed Pitch Wind Turbines. In 9th International Control, Automation, Robotics and Vision Conference, ICARCV '06, Singapore, December 5-8, 2006.

PÉREZ RUIZ Yuly Alejandra, BETANCUR CASTRO, Yury Karina,. Identificación e implementación de modelos de baterías para una micro red en el entorno gráfico de simulación Simulink® de MATLAB®.

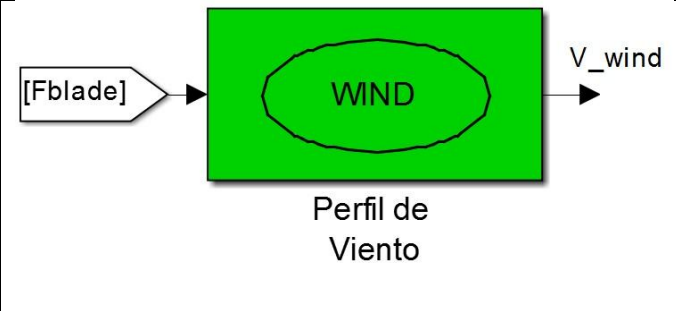
TAFTICHT T., AGBOSSOU K., CHERITI A., and DOUMBIA M.L., "Output Power Maximization of a Permanent Magnet Synchronous Generator Based Stand-alone Wind Turbine,"IEEE Industrial Electronics, vol. 3, pp. 2412-2416, July 2006.

VAS P., "Vector control of ac machines", Clarendon Press, Oxford, 1990.

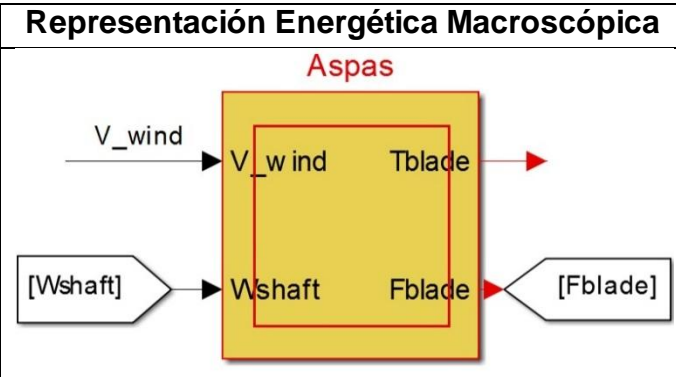
ANEXOS

ANEXO A. Descripción de bloques del EMR en Matlab-Simulink.

Diagrama del viento

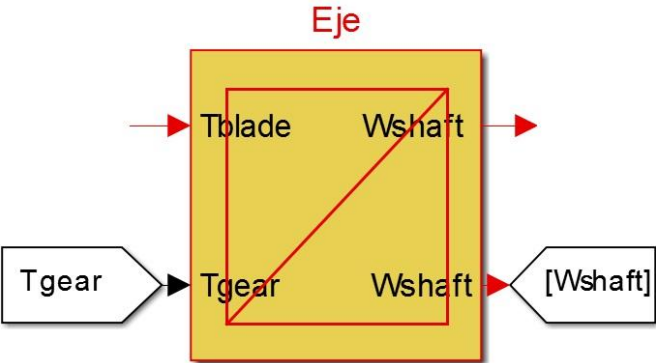
	<p>Tabla característica de tiempo vs. Velocidad predeterminada del SCEE en estudio [25]. Representa la fuente de energía mecánica. Se encuentra en el archivo <i>InicioInicioModelodelsistema.m</i> de la simulación.</p>	<p>V_wind: velocidad del viento. F_{blade}: fuerza producida por la velocidad del viento sobre las aspas de la turbina.</p>
---	---	--

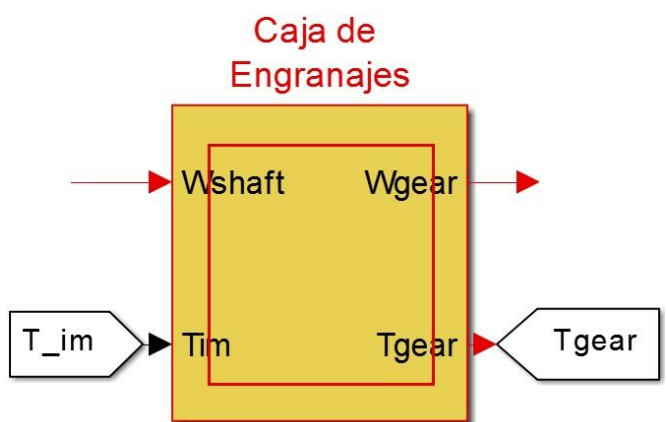
Modelado de Aspas

Representación Energética Macroscópica	Ecuaciones	Descripción
	$T_{blade} = \frac{1}{2} C_T(\lambda, \beta) \rho S R V_{wind}^2 \quad (1)$ $\lambda = \frac{R \omega_{shaft}}{V_{wind}} \quad (2)$	<p>T_{blade}: torque producido por las aspas, debido a la fuerza del viento. Torque en el eje de la turbina. S: área de barrido de las aspas. p: densidad del aire. C_T: coeficiente de torque.</p>

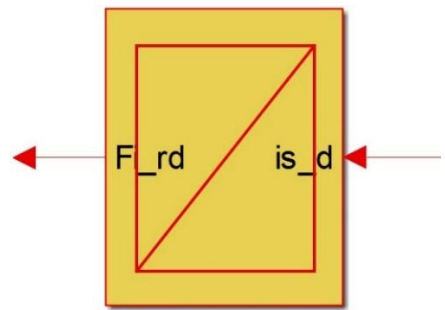
Representación Energética Macroscópica	Ecuaciones	Descripción
	$C_T(\lambda, \beta) = \frac{C_P(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (3)$	<p>λ: relación de deslizamiento. β: ángulo de paso del aspa. R: radio de las aspas. ω_{shaft}: velocidad rotacional del eje de la turbina. C_p: coeficiente de potencia, depende del diseño aerodinámico de la turbina.</p>

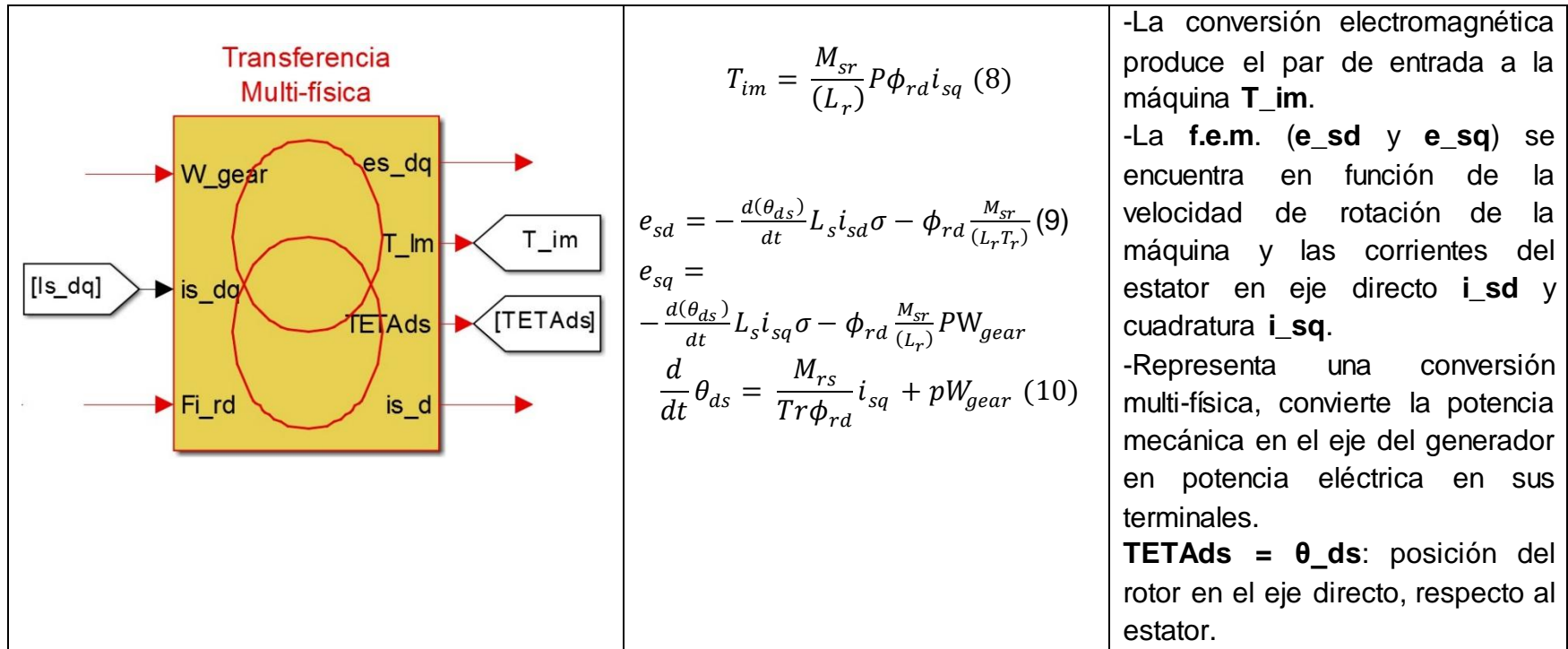
Modelado de partes mecánicas

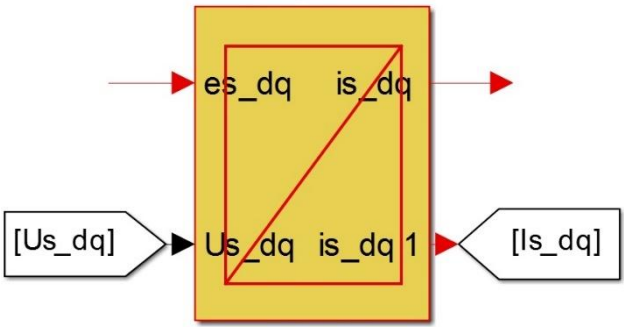
Representación Energética Macroscópica	Ecuaciones	Descripción
	$J \frac{d(W_{shaft})}{dt} = -T_{gear} + T_{blade} - fW_{shaft} \quad (4)$	<p>J: inercia en el eje. f: coeficiente de fricción del eje. T_{gear}: Torque en el eje acoplado al generador y la caja de engranajes.</p>

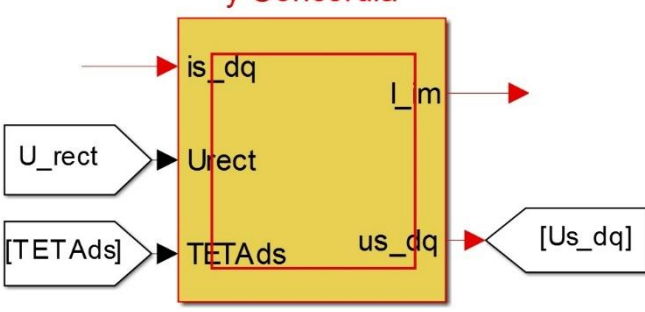
<p style="text-align: center;">Caja de Engranajes</p> 	$W_{gear} = K_{gear} W_{shaft} \quad (5)$ $T_{gear} = K_{gear} T_{im} \quad (6)$	<p>W_{gear}: velocidad rotacional en el eje acoplado al generador y la caja de engranajes.</p> <p>K_{gear}: relación de transmisión de la caja de engranajes.</p> <p>T_{im}: torque eléctrico. Torque que se opone al eje de la máquina.</p>
--	--	---

Máquina de inducción

Representación Energética Macroscópica	Ecuaciones	Descripción
 <p style="text-align: center; color: red;">Cálculo del flujo en el eje directo</p>	$T_r \frac{d(\phi_{rd})}{dt} = i_{sd} M_{sr} + \phi_{rd} \quad (7)$ <p style="text-align: center;">Donde $T_r = \frac{L_r}{R_r}$</p>	<p>φ_{rd}: flujo del rotor en eje directo.</p> <p>i_{sd}: corriente del estator en eje directo.</p> <p>M_{sr}: inductancia cíclica mutua entre el estator y el rotor.</p> <p>T_r: constante de tiempo rotórica.</p> <p>L_r: inductancia asociada del rotor.</p> <p>R_r: resistencia asociada al rotor.</p> <p>-Bloque acumulador de energía.</p>



<p style="text-align: center;">Calculo de corriente en el eje directo</p> 	$K_1 \frac{d}{dt} i_{sdq} = K_2 (u_{sdq} - e_{sdq}) - i_{sdq} \quad (11)$	<p>Rs: resistencia del estator. Ls: inductancia asociada al estator. -Las corrientes del estator en eje directo y de cuadratura i_sdq se expresan en términos de tensión en bornes de la máquina de inducción en eje directo y cuadratura u_sdq y la tensión inducida e_sdq. K1 y K2: constantes relacionadas a parámetros constructivos de la máquina. K1= 0,0056; K2=82,5699.</p>
--	---	--

<p style="text-align: center;">Transformada de Park y Concordia</p> 	$u_{abc} = K_{uv} * u_{rect} \quad (12)$ $u_{albe} = C * u_{abc} \quad (14)$ $u_{sdq} = [T(\theta_{ds})] u_{albe} \quad (16)$ $i_{albe} = [T(\theta_{ds})]^{-1} i_{sdq} \quad (17)$ $i_{abc} = C^{-1} * i_{albe} \quad (15)$ $i_{im} = K_{ii} * i_{abc} \quad (13)$	<p>-Representa una transformación mono-física. -Transformada de Park: permite expresar tensiones u_albe y corrientes i_albe de un eje de referencia estacionario, a un sistema de referencia giratorio d,q (u_sdq y i_sdq). -Transformada de Concordia: permite expresar variables de tensión u_abc y corriente i_abc</p>
--	--	---

		desde un sistema de referencia trifásico estacionario a un sistema de referencia estacionario (u_albe y i_albe).
--	--	--

Las matrices de transformación de tensiones de fase u_{rect} a tensiones de línea u_{abc} y de corrientes de fase i_{abc} a corrientes de línea i_{lm} , utilizadas son las siguientes:

$$K_{uv} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \text{ y } K_{ii} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Transformada de Concordia $C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$ Transformada inversa de Concordia

$$C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

Transformada de Park $[T(\theta_{ds})] = \begin{bmatrix} \cos \theta_{ds} & \sin \theta_{ds} \\ -\sin \theta_{ds} & \cos \theta_{ds} \end{bmatrix}$ Transformada inversa de Park

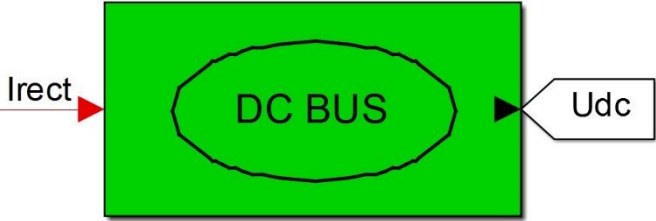
$$[T(\theta_{d/s})]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{ds} & -\sin \theta_{ds} \\ \sin \theta_{ds} & \cos \theta_{ds} \end{bmatrix}$$

Convertidor de Fuente de tensión.

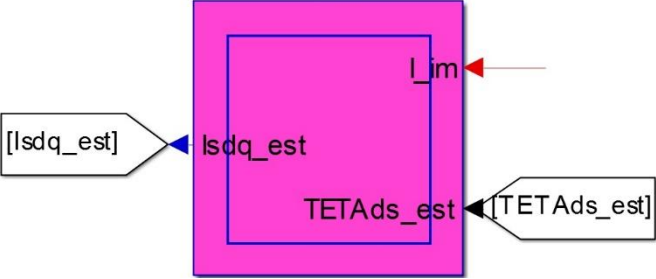
Representación Energética Macroscópica	Ecuaciones	Descripción
	$u_{rect} = m_{vsc} u_{DC} \quad (18)$ $i_{rect} = m_{vsc} i_{im} \quad (19)$	<p>m_vsc: vector modulación, permite variar la tensión en el estator teniendo como referencia una tensión u_DC.</p> <p>u_DC: tensión de continua del bus de DC.</p> <p>i_im: corriente de línea del estator.</p> <p>i_rect: corriente en continua rectificada.</p> <p>U_rect: tensión de fase rectificada en bornes de la máquina de inducción.</p>

El rectificador se basa en una tensión DC fija (1500V), la cual variara para poder manipular EL TORQUE y con este controlar velocidad rotacional de la turbina.

Barraje de DC

Representación Energética Macroscópica	Ecuaciones	Descripción
	$u_{DC} = 1500 V$	-Tensión constante del barraje de DC.

Estimación de variables no medibles

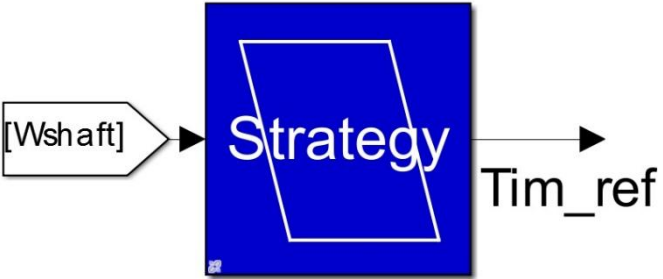
Representación Energética Macroscópica	Ecuaciones	Descripción
<p>Estimación de corrientes en el marco de referenciad,q</p> 	$i_{abc} = K_{ii_inv} * i_{im}$ $i_{albe} = C * i_{abc}$ $i_{sdq_est} = [T(\theta_{ds})] i_{albe} \quad (27)$	<p>-Las corrientes estimadas i_(sdq_est), se obtiene a partir de las corrientes reales de línea i_im del estator de la máquina de inducción.</p> <p>K_(ii_inv): matriz de transformación de corrientes inversa, permite ir de corrientes de línea i_im a corrientes de fase i_abc.</p> <p>TETAds_est = θ_ds: posición del rotor en el eje directo, respecto al estator, valor estimado.</p>

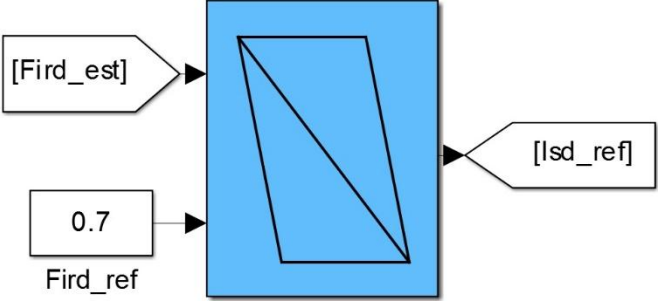
La matriz de transformaciones de corriente inversa $K_{ii_inv} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$.

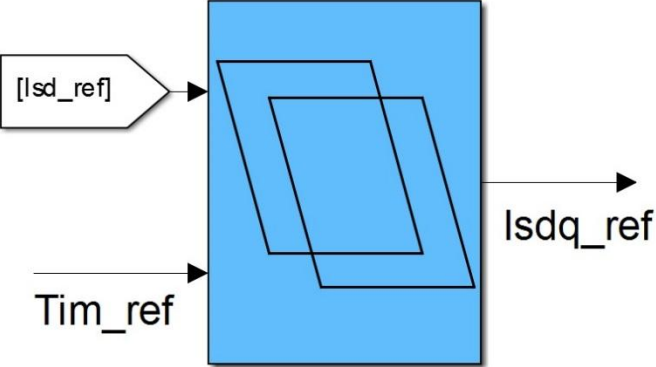
<p>Estimación de la f.e.m. en el marco de referenciad,q</p>	$e_{sd_estimado} = - \frac{d(\theta_{ds_estimado})}{dt} L_s i_{sd_estimado} \sigma - \phi_{rd_estimado} \frac{M_{sr}}{(L_r T_r)} \quad (28)$ $e_{sq_estimado} = - \frac{d(\theta_{ds_estimado})}{dt} L_s i_{sq_estimado} \sigma - \phi_{rd_estimado} \frac{M_{sr}}{(L_r)} P W_{gear} \quad (29)$ $\frac{d}{dt} \theta_{ds_estimado} = \frac{M_{rs}}{Tr \phi_{rd_estimado}} i_{sq_estimado} + p W_{gear} \quad (30)$	<p>σ: coeficiente de dispersión. C1: representa el monitoreo de corrientes. P: número de polos de la máquina Jaula de ardilla. TETAds_est = $\theta_{ds_estimado}$: posición del rotor en el eje directo, respecto al estator, valor estimado.</p>
---	--	--

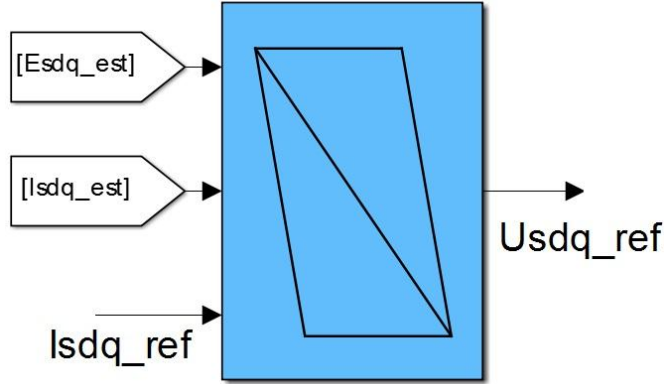
<p>Estimación del flujo en el marco de referenciad,q</p>	$\phi_{rd_estimado} = i_{sd_estimado} M_{sr} - T_r \frac{d(\phi_{rd_ref})}{dt} \quad (26)$	<p>Fird_est = $\phi_{rd_estimado}$: Flujo del rotor en eje directo estimado. ϕ_{rd_ref}: flujo de referencia del rotor en eje directo constante, obtenido a partir de pruebas en la MI a funcionamiento continuo y a condiciones nominales (0,7 Webber)</p>
--	---	---

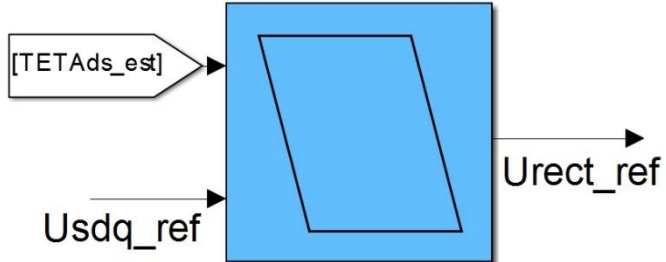
Sistema de control del SCEE

Representación Energética Macroscópica	Ecuaciones	Descripción
<p style="text-align: center;">MPPT</p> 	<p>Tabla característica construida por el fabricante donde expresa el par de entrada de referencia Tim_ref de la máquina de inducción jaula de ardilla, según sea la velocidad de rotación medida en el rotor de la turbina. Wshaft_medido.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Extraer la máxima potencia posible a partir del viento. -Garantiza que la velocidad de la turbina varié para velocidades bajas de viento y para velocidades altas de viento su velocidad permanezca constante. -Manipulando el torque del generador, extraigo la potencia máxima y a su vez garantiza que la velocidad funcione en un rango de operación.

<p style="text-align: center;">Control del flujo</p> 	$i_{sd_ref} = C_1 [\phi_{rd_ref} - \phi_{rd_estimado}] \quad (20)$	<p>-Se utilizó el bloque PID de la toolbox de Matlab-Simulink para sintonizar los valores de las ganancias para los controladores proporcional e integral y poder obtener el valor de referencia para la</p>
---	---	--

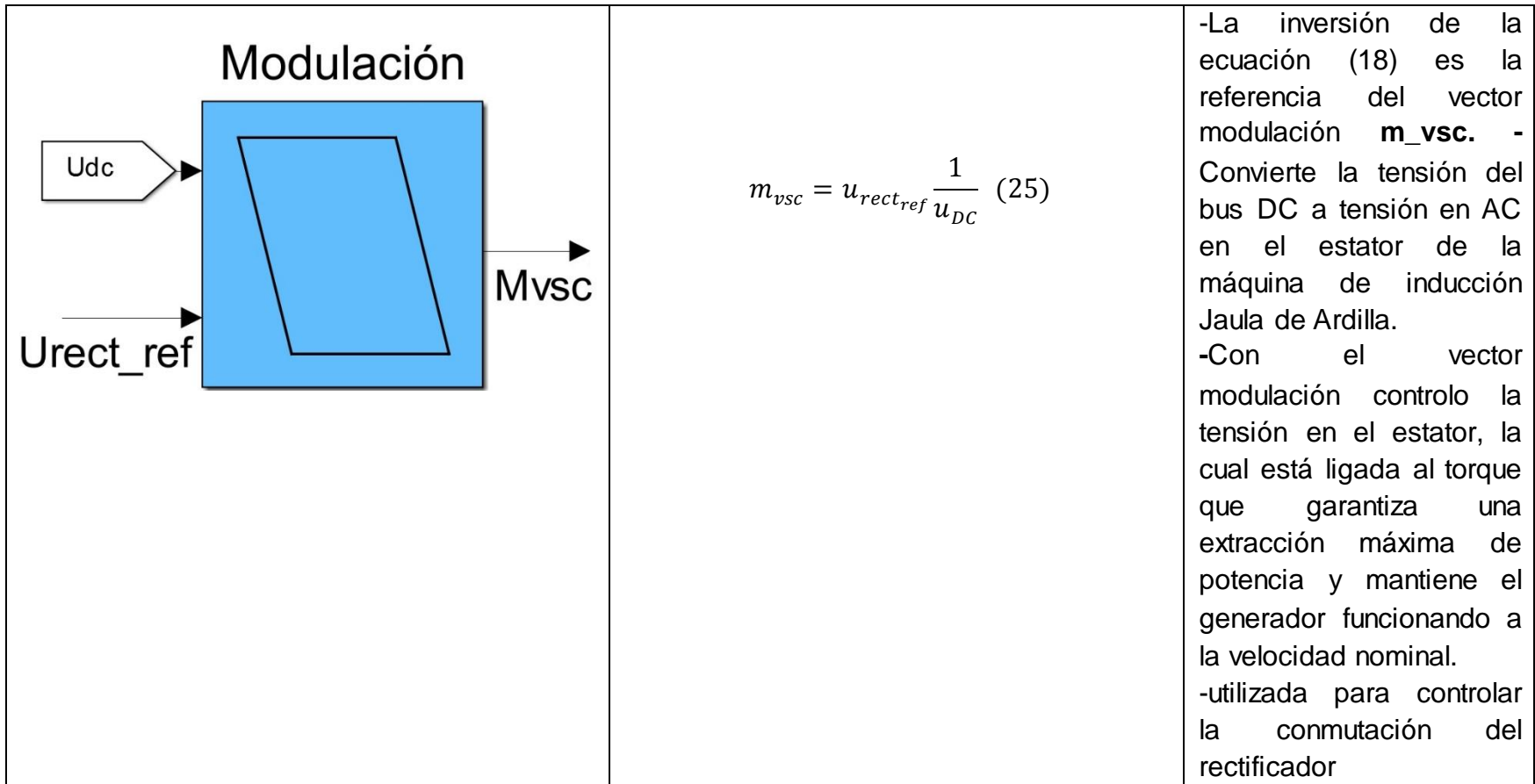
		<p>corriente en el estator en eje directo Isd_ref. C1: controlador PI.</p>
<p style="text-align: center;">Control de las corrientes</p> 	$i_{sq_ref} = T_{im_ref} \frac{L_r}{P M_{sr} \phi_{rd_ref}} (21)$	<p>-La inversión de las ecuaciones (8) y (9) permite hallar la corriente de referencia en eje de cuadratura Isq_ref, la cual depende del par de referencia que extrae la máxima potencia de la velocidad del viento Tim_ref.</p>

<p style="text-align: center;">Calculo de tensiones</p> 	$u_{sd_ref} = C_2 [i_{sd_ref} - i_{sd_estimado}] + e_{sd_estimado} \quad (22)$ $u_{sq_ref} = C_3 [i_{sq_ref} - i_{sq_estimado}] + e_{sq_estimado} \quad (23)$	<p>-La inversión de la ecuación (11) conduce al cálculo de las tensiones de referencia en eje d,q (Usd_ref y Usq_ref) con dos controladores PI para las corrientes de referencia Isdq_ref y estimadas Isdq_estimado en los eje d,q, con una tensión inducida estimada en los eje d,q de compensación</p>
--	---	--

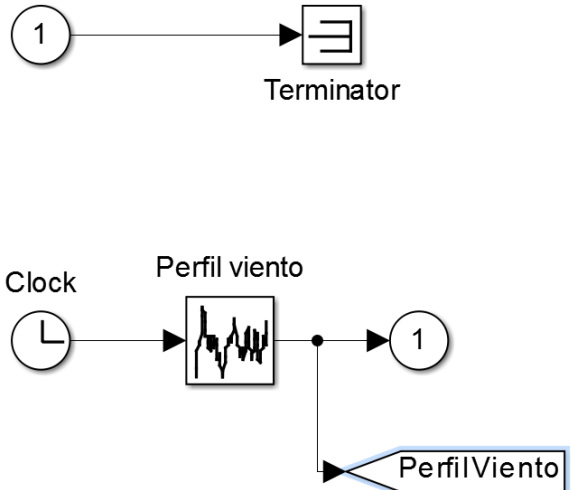
<p style="text-align: center;">Transformada inversa de Park y concordia</p> 	$u_{rect_ref} = K_{vu} C^{-1} T(\theta)^{-1} [u_{sdq}] \quad (24)$ <p>Método de inversión de (24):</p> $u_{rect_ref} = K_{vu} * u_{abc}$ $u_{abc} = C^{-1} * u_{albe}$ $u_{albe} = [T(\theta_{ds})]^{-1} u_{sdq}$	<p>Al tener las tensiones en eje directo y de cuadratura u_sdq, se aplica una inversión directa, usando de referencia para inversión las ecuaciones (16) y (17).</p>
--	---	---

Donde K_{vu} es la matriz de transformación de tensiones de línea u_{abc} , a tensiones de fase rectificadas, para este

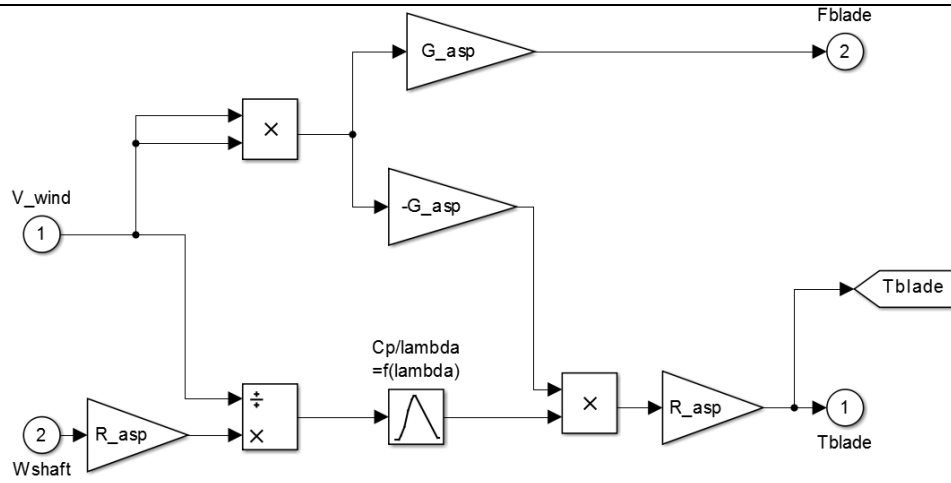
caso de referencia $u_{rect_ref} \cdot K_{vu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$



ANEXO B. Representación de las ecuaciones en Matlab-Simulink

Representación en Matlab	Ecuación
<p>Modelo del viento</p>  <p>The diagram shows a Simulink model for wind profile. It starts with a Terminator block (represented by a square with a horizontal line) connected to a constant input of 1. Below this, a Clock block (represented by a circle with an 'L') is connected to a 'Perfil viento' scope (represented by a square with a waveform). The output of the 'Perfil viento' scope is split: one path goes to a constant input of 1, and the other path goes to a 'PerfilViento' scope (represented by a trapezoidal shape).</p>	<p>Ver Tabla 4 y Figura 33.</p>

Modela de las aspas



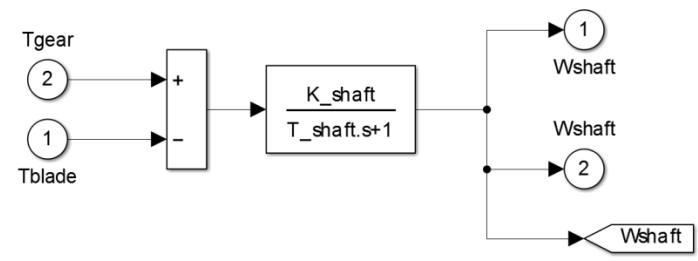
$$T_{blade} = \frac{1}{2} C_T(\lambda, \beta) \rho S R V_{wind}^2 \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{R \omega_{shaft}}{V_{wind}} \quad (2)$$

$$C_T(\lambda, \beta) = \frac{C_P(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (3)$$

$$G_{asp} = \frac{1}{2} \rho S$$

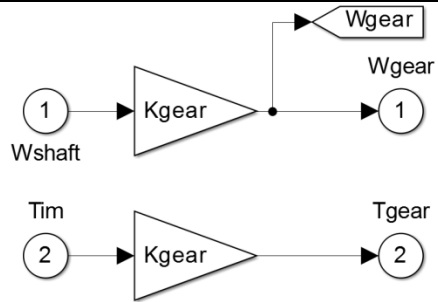
Modelo del eje



$$J \frac{d(W_{shaft})}{dt} = -T_{gear} + T_{blade} - f W_{shaft} \quad (4)$$

$$K_{shaft} = \frac{1}{f} ; \quad T_{shaft} = \frac{J}{f}$$

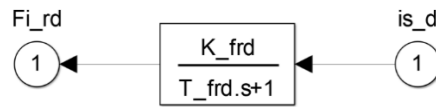
Modelo de la caja de engranajes



$$W_{gear} = K_{gear} W_{shaft} \quad (5)$$

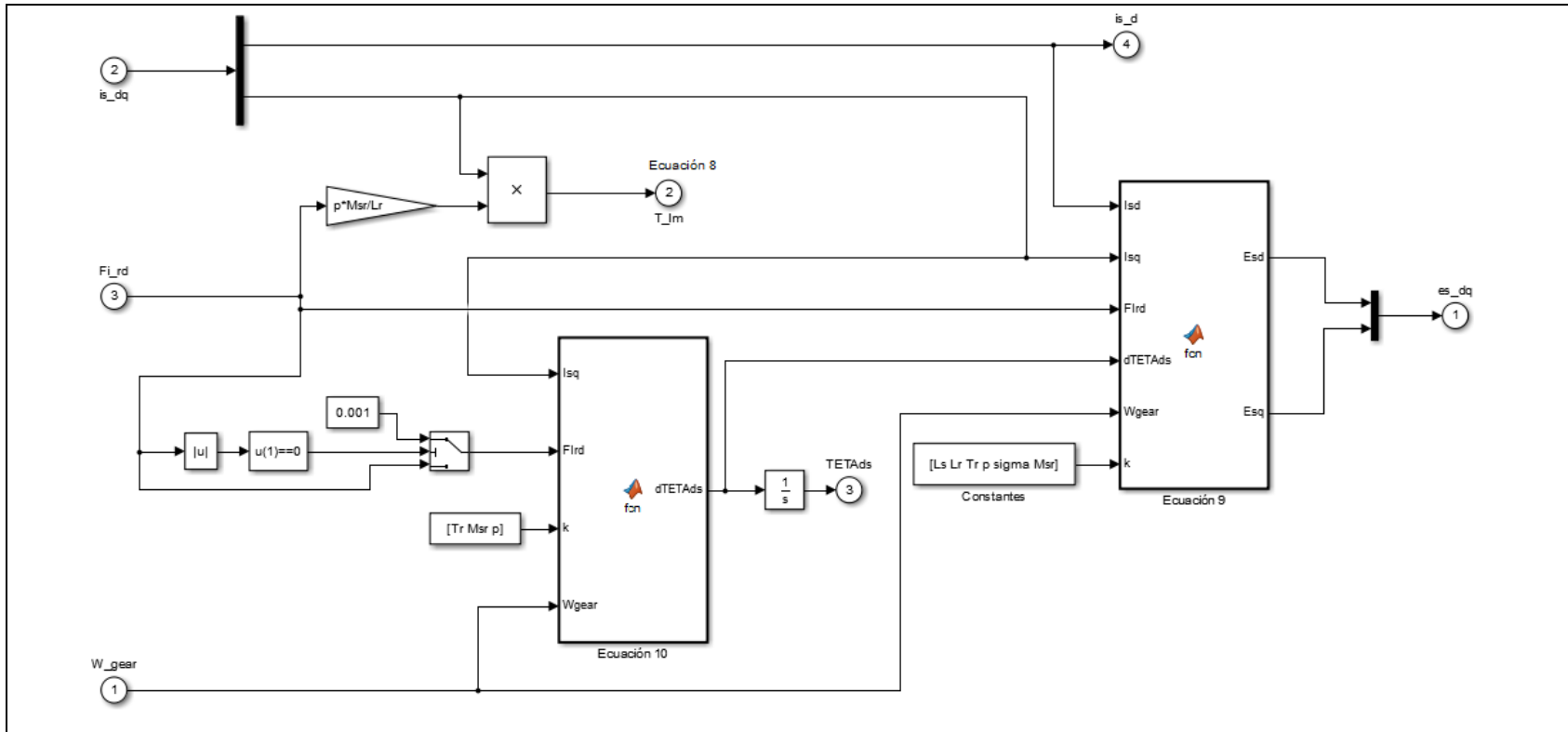
$$T_{im} = \frac{T_{gear}}{K_{gear}} \quad (6)$$

Modelo de la máquina de inducción



$$T_r \frac{d(\phi_{rd})}{dt} = i_{sd} M_{sr} + \phi_{rd} \quad (7)$$

$$K_{frd} = M_{sr}; \quad T_{frd} = T_r$$



$$T_{im} = \frac{M_{sr}}{L_r} P \phi_{rd} i_{sq} \quad (8)$$

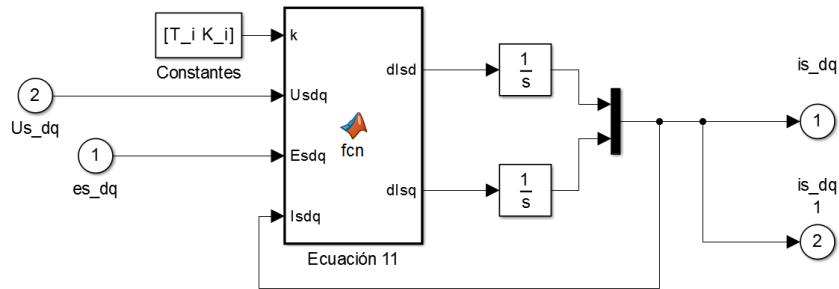
$$e_{sd} = -\frac{d(\theta_{ds})}{dt} L_s i_{sd} \sigma - \phi_{rd} \frac{M_{sr}}{L_r T_r} \quad (9)$$

$$e_{sq} = -\frac{d(\theta_{ds})}{dt} L_s i_{sq} \sigma - \phi_{rd} \frac{M_{sr}}{L_r} P W_{gear} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_{ds} = \frac{M_{rs}}{Tr \phi_{rd}} i_{sq} + p W_{gear} \quad (10) *$$

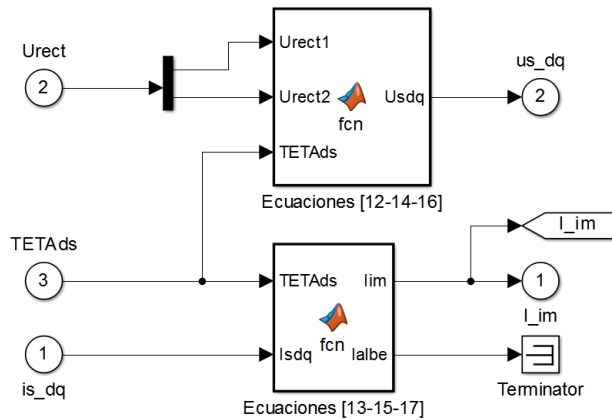
*En esta ecuación se emplea una herramienta de Matlab, con la cual se evita una indeterminación en la división del

primer término.



$$K_1 \frac{d}{dt} i_{sdq} = K_2 (u_{sdq} - e_{sdq}) - i_{sdq} \quad (11)$$

$$K_i = K_1 \quad ; \quad T_i = K_2$$



$$u_{abc} = K_{uv} * u_{rect} \quad (12)$$

$$u_{albe} = C * u_{abc} \quad (14)$$

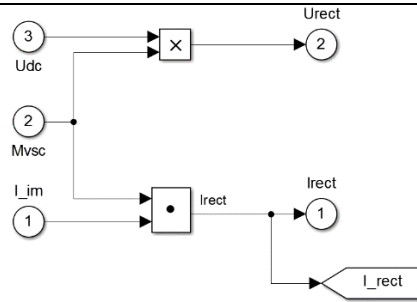
$$u_{sdq} = [T(\theta_{ds})] u_{albe} \quad (16)$$

$$i_{albe} = [T(\theta_{ds})]^{-1} i_{sdq} \quad (17)$$

$$i_{abc} = C^{-1} * i_{albe} \quad (15)$$

$$i_{im} = K_{ii} * i_{abc} \quad (13)$$

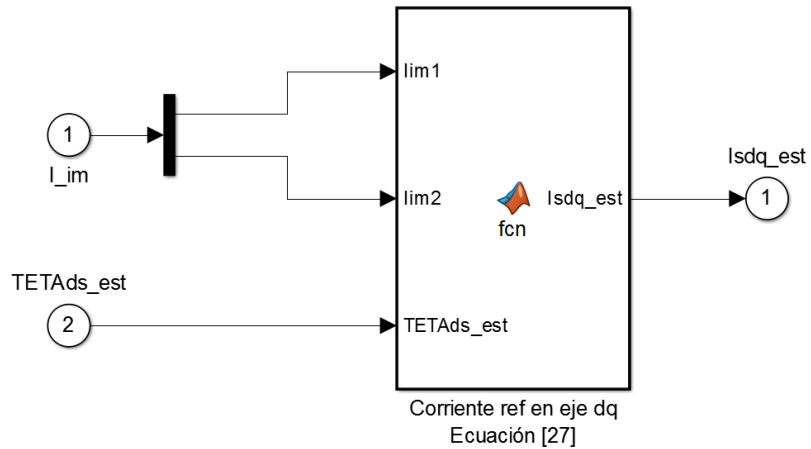
Modelo rectificador



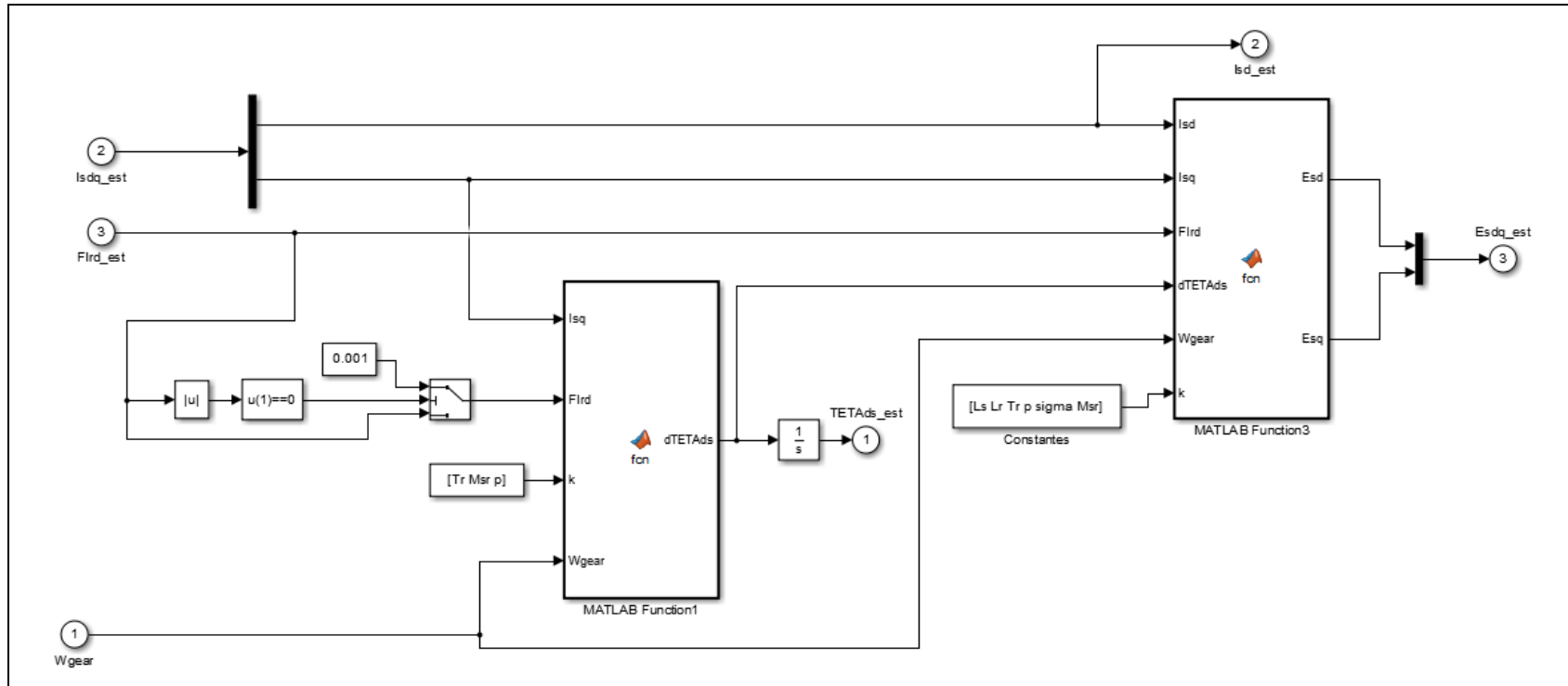
$$U_{rect} = m_{vsc} * u_{DC} \quad (18)$$

$$i_{rect} = m_{vsc} \cdot i_{im} \quad (19)$$

Bloques de estimación



$$i_{sdq_estimado} = C * T[(\theta_{ds})]_{est} * K_{ii_inv} * i_{im} \quad (27)$$

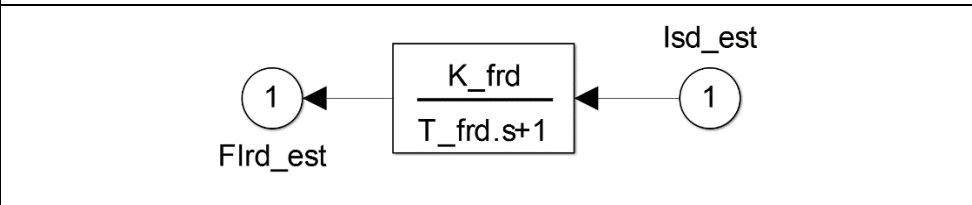
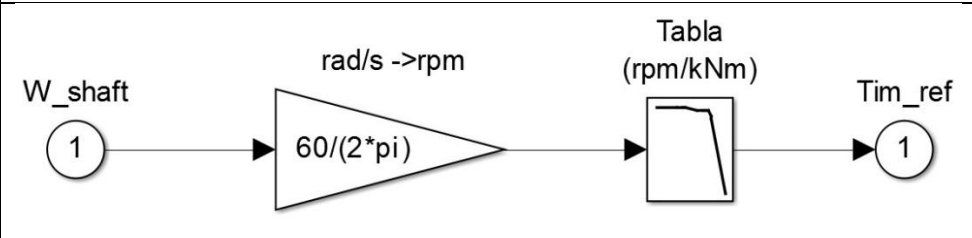
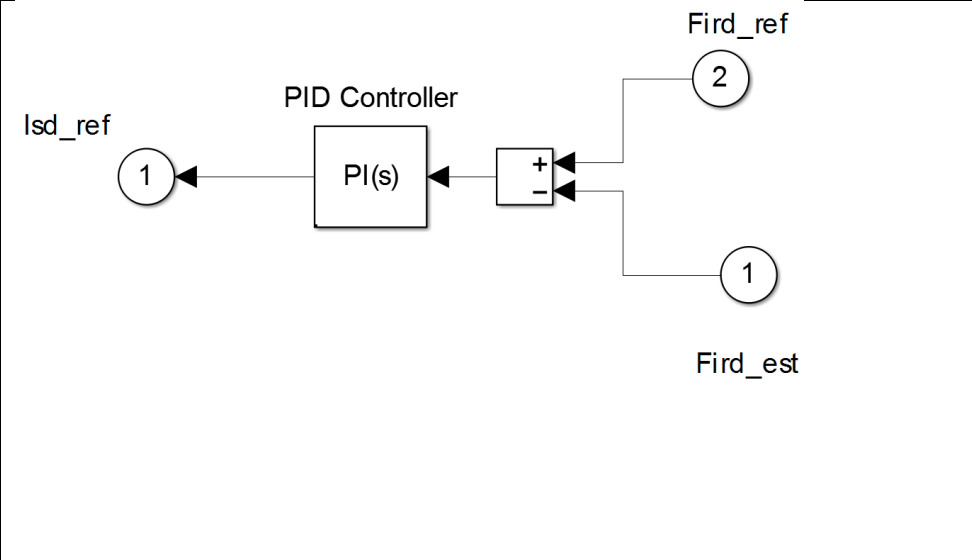


$$e_{sd_estimado} = -\frac{d(\theta_{ds_estimado})}{dt} L_s i_{sd_estimado} \sigma - \phi_{rd_estimado} \frac{M_{sr}}{(L_r T_r)} \quad (28)$$

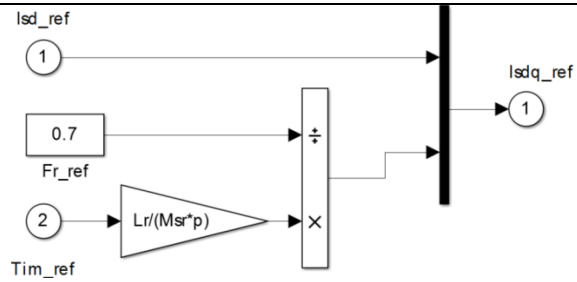
$$e_{sq_estimado} = -\frac{d(\theta_{ds_estimado})}{dt} L_s i_{sq_estimado} \sigma - \phi_{rd_estimado} \frac{M_{sr}}{(L_r)} p W_{gear} \quad (29)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_{ds_estimado} = \frac{M_{rs}}{Tr \phi_{rd_estimado}} i_{sq_estimado} + p W_{gear} \quad (30)^*$$

*En esta ecuación se emplea una herramienta de Matlab, con la cual se evita una indeterminación en la división del primer término.

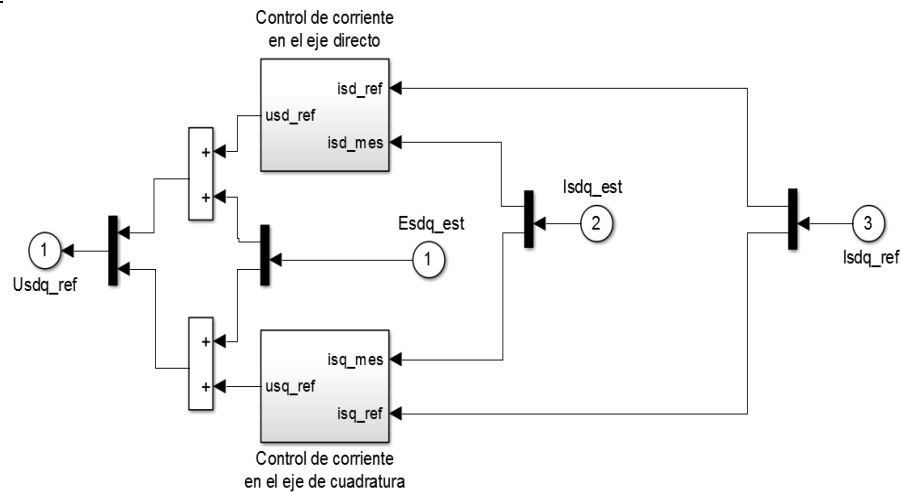
Control de flujo	
	$\phi_{rd_estimado} =$ $i_{sd_estimado} M_{sr} - T_r \frac{d(\phi_{rd_estimado})}{dt} \quad (26)$ $K_{frd} = M_{sr}; T_{frd} = T_r$
Estrategia de control	
	Ver Figura 17.
Control de flujo	
	$i_{sd_ref} = C_1 [\phi_{rd_ref} - \phi_{rd_estimado}] \quad (20)$

Control de corriente



$$i_{sq_ref} = T_{im_ref} \frac{L_r}{PM_{sr} \phi_{rd_ref}} \quad (21)$$

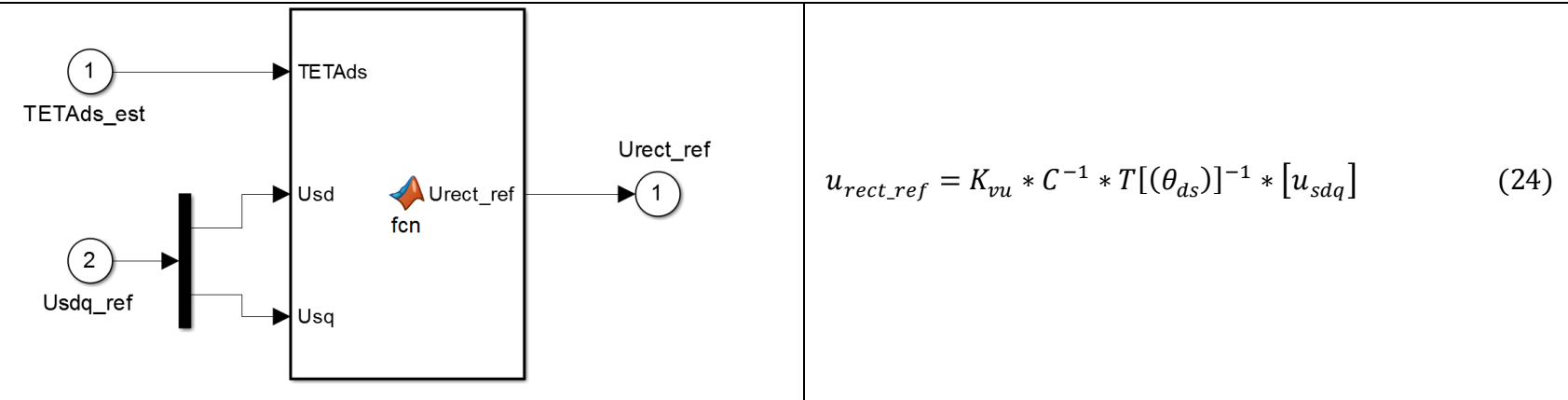
Control de tensiones



$$u_{sd_ref} = C_2 [i_{sd_ref} - i_{sd_estimado}] + e_{sd_estimado} \quad (22)$$

$$u_{sq_ref} = C_3 [i_{sq_ref} - i_{sq_estimado}] + e_{sq_estimado} \quad (23)$$

Transformada inversa de Park de tensión en control



Ecuación vector de modulación

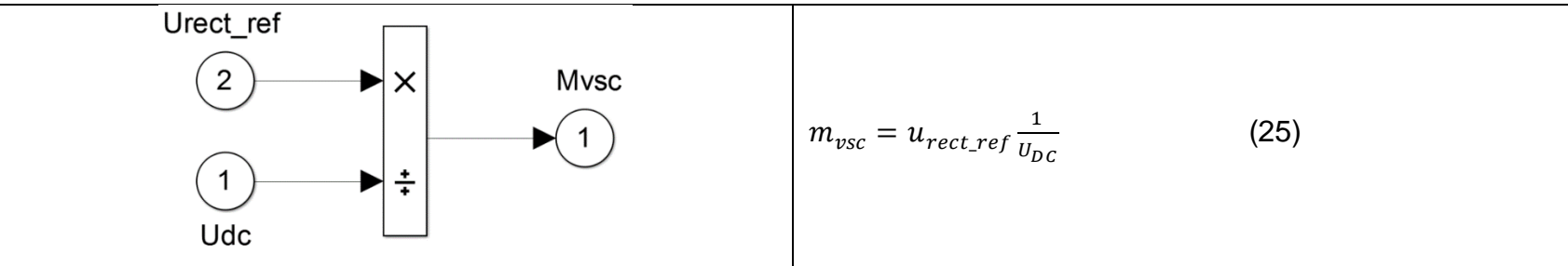


Tabla 4. Perfil del viento.

Tiempo [s]	Velocidad [m/s]
0	8,4
2,5	9
5	10,2
7,5	10,7
10	10,75
12,5	10,7
15	10,9
17,5	11,5
20	12,6
22,5	13,3
25	13,15
27,5	12,95
30	12,2
32,5	11,6
35	11,25
37,5	11,25
40	11,2
42,5	10,9
45	10,5
47,5	10,15
50	10,8
52,5	11,35
55	11,35
57,5	11,2
60	11,2

Tiempo [s]	Velocidad [m/s]
62,5	10,75
65	10,45
67,5	10,55
70	11
72,5	10,7
75	10,55
77,5	9,7
80	9,6
82,5	10
85	9,8
87,5	9,2
90	8,8
92,5	8,5
95	8,7
97,5	8,8
100	9,4
102,5	9,8
105	10,4
107,5	10,5
110	10,6
112,5	10,6
115	10,8
117,5	11
120	11,2
122,5	10,9
125	11,1
127,5	11

Tiempo [s]	Velocidad [m/s]
130	11,3
132,5	11,6
135	12
137,5	12,5
140	12,1
142,5	11,3
145	11
147,5	10,6
150	10,7
152,5	10,4
155	10,2
157,5	9,8
160	10,2
162,5	10,1
165	10,2
167,5	10,4
170	9,7
172,5	10,2
175	10,4
177,5	10,9
180	11,4
	11,8
185	11,3
187,5	10,9
190	10,6
192,5	10,5
195	10,2

Tiempo [s]	Velocidad [m/s]
197,5	9,9
200	9,7
202,5	10
205	10,3
207,5	10,5
210	11
212,5	11,6
215	11,1
217,5	11,4
220	10,6
222,5	9,6
225	9,4
227,5	9,4
230	10
232,5	10,3
235	10,5
237,5	10,8
240	11,2
242,5	11,2
245	10,6
247,5	11,4
250	12,2

ANEXO C Sistema de generación de energía eólica implementado en Matlab-Simulink.

(Ver documento adjunto)