



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**DISEÑO DE UNA TURBINA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA EN
EL DOMINIO FÍSICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Presenta:

Carlos Patiño Silva

Director de tesis:

Dr. Roberto Tapia Sánchez

Sinodales:

Dr. Claudio Rubén Fuerte Esquivel

Dr. Juan Anzures Marín

Dr. J Aurelio Medina Ríos

Dr. Fernando Martínez Cárdenas



Morelia, Michoacán

Marzo 2016



DISEÑO DE UNA TURBINA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA EN EL DOMINIO FÍSICO

Los Miembros del Jurado de Examen de Grado aprueban la Tesis de Maestría en Ciencias
en Ingeniería Eléctrica de *Carlos Patiño Silva*

Dr. Claudio Rubén Fuerte Esquivel
Presidente del Jurado

Dr. Roberto Tapia Sánchez
Director de Tesis

Dr. J. Aurelio Medina Rios
Vocal

Dr. Juan Anzures Marín
Vocal

Dr. Fernando Martínez Cárdenas
Revisor Externo

Dr. Félix Calderón Solorio
*Jefe de la División de Estudios de Posgrado
de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. UMSNH
(Por reconocimiento de firmas).*

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Marzo 2016

Agradecimientos

Gracias a mi familia que siempre me ha apoyado en todo momento, en especial a mi madre Angélica por su apoyo y paciencia incondicional, la cual fue de enorme ayuda en este capítulo de mi vida, así como en todos los anteriores. Con el soporte que ella me ha brindado durante toda mi vida ha hecho posible todo logro que he completado.

Agradezco a Conacyt por brindarme su apoyo económico con el cual fue posible mis estudios de postgrado.

Gracias al Departamento de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UMSNH por permitirme y apoyarme para el desarrollo de mis estudios de postgrado.

Y agradezco a mi asesor de tesis, al Dr. Roberto Tapia por su enorme ayuda y apoyo brindado desde incluso antes de ser mi asesor. Sobre todo su paciencia y su constante motivación para superar cualquier traba que este proceso presentó.

Resumen

En la presente tesis se presenta el modelado y control de una turbina eólica de levitación magnética.

Se exponen conceptos del modelado y control utilizando un método gráfico. Se aborda la metodología de Bond Graph, la cual explica dicha metodología por medio de dos ejemplos en dos distintos dominios físicos, el eléctrico y el mecánico.

Utilizando la metodología de bond graph se presenta un modelo de una y dos masas. En el correspondiente a dos masas se toma en cuenta dos inercias: la etapa mecánica y la correspondiente a la etapa eléctrica. Para el modelo de dos masas se considera el análisis de vibraciones del aerogenerador el cual se encuentra presente en la palas de la turbina. Por otra parte se incluye en este modelo un sistema de levitación magnética actuando sobre el rotor.

Se presenta a detalle el control derivado de la inversión del bond graph, en la obtención de la ley de control para cada uno de los diferentes modelos, así como también para el modulo que permite la levitación magnética.

Palabras Clave: Bond graph, aerogenerador, modelado, control, levitación magnética.

Abstract

This thesis presents the modelling and control of a wind turbine with magnetic levitation.

Concepts of modelling and control using a graphic methodology are exposed. The bond graph methodology is addressed, which is explained by using two examples with two different physical domains, i.e. electrical and mechanical.

Using the bond graph methodology a model of one and two masses is presented, corresponding to the two masses model it takes in account two inertias: the present in the mechanic stage and the one in the electric stage. For the two masses model the wind turbine vibrations analysis is considered which it takes place in the blades of the turbine. Moreover, a model of the magnetic levitation system acting on the rotor is included.

The inverse bond graph model is used in order to obtain the control law, for each model as well as the magnetic levitation module.

Key words: Bond graph, wind turbine, modelling, control, magnetic levitation.

I. Índice

Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	V
I. Índice.....	VII
II. Lista de Figuras	XI
III. Lista de Tablas	XV
IV. Lista de Abreviaturas y Símbolos.....	XVII
Capítulo 1	1
1. Introducción.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Objetivos particulares	3
1.4. Metodología.....	3
1.5. Justificación	4
1.6. Estado del arte	5
1.7. Descripción de Capítulos	9
Capítulo 2	11
2. Modelado en Bond Graph	11
2.1. Introducción.....	11
2.2. Conceptos Básicos.....	12
2.3. Elementos del Sistema.....	14
2.3.1. Elementos Pasivos Puerto-1.....	14
2.3.2. Elementos Activos Puerto-1	15

2.3.3.	<i>Elementos Ideales Puerto-2</i>	15
2.3.4.	<i>Elementos de Unión Puerto-3</i>	16
2.3.5.	<i>Elementos de almacenamiento multibond</i>	17
2.4.	Modelado de Sistemas Físicos	20
2.4.1.	<i>Procedimiento para modelar sistemas eléctricos</i>	20
2.4.2.	<i>Procedimiento para modelar sistemas mecánicos</i>	23
2.5.	Causalidad	25
2.5.1.	<i>Procedimiento para la asignación de la causalidad</i>	27
2.6.	Modelado Matemático	28
2.6.1.	<i>Trayectorias Causales</i>	28
2.7.	Conclusiones	32
Capítulo 3		35
3.	Modelado del aerogenerador	35
3.1.	Introducción	35
3.2.	Modelado tradicional del aerogenerador	35
3.3.	Modelado en bond graph del aerogenerador	40
3.3.1.	<i>Modelo del aerogenerador considerando una sola masa</i>	40
3.3.2.	<i>Modelo del aerogenerador considerando dos masas</i>	43
3.3.3.	<i>Modelo del aerogenerador para análisis de vibraciones</i>	45
3.4.	Principios de la levitación magnética	51
3.5.	Levitación magnética en bond graph	52
3.6.	Modelo del aerogenerador de levitación magnética en bond graph	54
3.6.1.	<i>Modelo estructural de la transmisión</i>	55
3.6.2.	<i>Modelo roto-traslacional de la transmisión</i>	57
3.6.3.	<i>Modelo de la turbina de levitación magnética considerando la estructura de la transmisión</i>	57
3.7.	Conclusiones	59
Capítulo 4		61
4.	Control y Simulación	61

4.1. Introducción.....	61
4.2. Control inverso por medio de inversión gráfica del bond graph	61
4.2.1. <i>Formulación del bond graph inverso para la obtención de la ley de control</i>	<i>63</i>
4.3. Control del modelo básico del aerogenerador	67
4.3.1. <i>Simulación del aerogenerador de una sola masa</i>	<i>72</i>
4.4. Control del modelo de dos masas	75
4.4.1. <i>Simulación del aerogenerador de dos masa</i>	<i>78</i>
4.5. Control del módulo de levitación magnética.....	83
4.5.1. <i>Simulación del módulo de levitación magnética</i>	<i>86</i>
4.6. Control del aerogenerador de levitación magnética.....	88
4.6.1. <i>Simulación del aerogenerador de levitación magnética</i>	<i>89</i>
4.7. Conclusiones	95
Capítulo 5.....	97
5. Conclusiones y Trabajos Futuros	97
5.1. Conclusiones	97
5.2. Trabajos futuros.....	99
Bibliografía	101

II. Lista de Figuras

Figura 2.1 Representación de un bond con las variables de potencia esfuerzo y flujo.	12
Figura 2.2 Representación del elemento R.....	14
Figura 2.3 Representación del elemento C.....	14
Figura 2.4 Representación del elemento I.	14
Figura 2.5 a) Fuente de esfuerzo, b) Fuente de flujo.....	15
Figura 2.6 Representación de un Transformador en bond graph.	16
Figura 2.7 Representación de un Girador en bond graph.....	16
Figura 2.8 Unión 0	16
Figura 2.9 Unión 1.	17
Figura 2.10 Combinación de flechas de señal.....	18
Figura 2.11 Representación de un elemento C con dos puertos de potencia.....	18
Figura 2.12 Esquema del circuito eléctrico RL.....	21
Figura 2.13 Procedimiento para el modelado del circuito RL, donde 2) representa los nodos del sistema, 3) acoplamiento de uniones I y elementos sometidos a un diferencial de potencial, 4) elección de un nodo de referencia, 5) supresión del nodo de referencia y 6) simplificación del modelo.	22
Figura 2.14 Comparación gráfica del circuito RL.....	23
Figura 2.15 Esquema de sistema mecánico.....	24
Figura 2.16 Procedimiento para el modelado del circuito mecánico, donde 1) asignación de uniones I por cada velocidad del sistema, 2) colocación de uniones 0 y elementos presentes en los nodos, c) elección de nodo de referencia, 3) simplificación del modelo.	24
Figura 2.17 Comparación gráfica del sistema mecánico.....	25
Figura 2.18 Causalidad en un trazo y su diagrama a bloques asociado.	26
Figura 2.19 Bond graph causal del circuito RL.....	28
Figura 2.21 Motor de CD en bond graph.	30
Figura 2.22 Bond graph con lazos abiertos.	31

Lista de Figuras

Figura 2.23 Bond graph de la Figura 2.22 con un detector D_f sensando la salida f_7	31
Figura 3.1 Evolución de C_p en función de λ y β	37
Figura 3.2 Representación de la turbina con una masa	38
Figura 3.3 Diagrama de bloques del modelo aerodinámico de una masa	40
Figura 3.4 Modelo bond graph del aerogenerador de una sola masa	41
Figura 3.5 Esquema del aerogenerador de dos masas	43
Figura 3.6 Bond graph de la turbina eólica de dos masas	44
Figura 3.7 Representación de la pala.....	46
Figura 3.8 Bond graph de la estructura de una pala	46
Figura 3.9 Modelo bond graph de la pala considerando dos secciones.....	47
Figura 3.10 Lazos causales en la estructura de la pala	49
Figura 3.11 Modelo del aerogenerador considerando la estructura de las palas	50
Figura 3.12 Circuito esquemático de la levitación magnética.....	52
Figura 3.13 Bond graph del levitador magnético de la Figura 3.12	53
Figura 3.14 Elemento C multipuerto para la transformación magneto-mecánica.....	54
Figura 3.15 Diagrama esquemático de la levitación de la transmisión de la turbina eólica.....	55
Figura 3.16 Modelo estructural de la transmisión mecánica del aerogenerador	55
Figura 3.17 Modelo de la flecha levitada magnéticamente.....	56
Figura 3.18 Conexión roto-traslacional para un sistema mecánico – a) Esquemático – b) Bond graph....	57
Figura 3.19 Bond graph de una turbina eólica levitada magnéticamente, A) se muestra el rotor de la parte mecánica y B) resalta el rotor del generador.	58
Figura 4.1 a) Relaciones causales, b) relaciones bicausales en un bond graph.....	62
Figura 4.2 Bicausalidad en los a) detectores y b) fuentes.	62
Figura 4.3 Control de corriente en un circuito RL, a) circuito eléctrico, b) Bond graph inverso.....	64
Figura 4.4 Esquema a bloques de la ley de control obtenida del bond graph inverso.....	66
Figura 4.5 Modelo bond graph de la turbina eólica considerando una sola masa.....	67
Figura 4.6 Bond graph inverso del aerogenerador de una masa.....	68

Figura 4.7 Diagrama a bloques del control de la velocidad para el modelo de una masa	70
Figura 4.8 Bond graph inverso para el control del ángulo de orientación de las palas	70
Figura 4.9 Modelo de simulación para el aerogenerador de una masa	73
Figura 4.10 Respuestas de la simulación y control del modelo de una masa – a) Viento – b) Ángulo de orientación – c) Potencia generada – d) Velocidad del generador	74
Figura 4.11 Respuestas de la simulación y control del modelo de una masa – a) Angulo de orientación – b) Coeficiente de potencia – c) Velocidad especifica	75
Figura 4.12 Bond graph inverso del aerogenerador de dos masas	76
Figura 4.13 Modelo de simulación para el aerogenerador de dos masas	78
Figura 4.14 Respuestas de la simulación y control del modelo de dos masas – a) Viento – b) Angulo de orientación – c) Potencia	79
Figura 4.15 Modelo de dos masas – a) Velocidad de la turbina – b) Rigidez transmisión – c) Velocidad del generador	80
Figura 4.16 Comparación de resultados de los modelos de una y dos masas - a) perfil de viento – b) ángulo beta – c) Potencia obtenida por el generador.....	81
Figura 4.17 Comparación de resultados de los modelos de una y dos masas – a) Velocidad de la turbina – b) Rigidez transmisión – c) Velocidad del generador	82
Figura 4.18 Modelo bond graph del levitador magnético	83
Figura 4.19 Bond graph inverso para el control de la posición.....	84
Figura 4.20 Diagrama de simulación del módulo de levitación magnética	86
Figura 4.21 Simulación del módulo de levitación, a) Fuerza magneto-motriz, b) Fuerza, c) posición, d) flujo magnético, e) Derivada del flujo, f) Velocidad.....	87
Figura 4.22 Esquema de la transmisión con el módulo de control para la levitación magnética.....	88
Figura 4.23 Aerogenerador levitado magnéticamente viento constante a) velocidad viento, b) potencia generada	90
Figura 4.24 Aerogenerador levitado magnéticamente viento constante a) velocidad angular generador, b) velocidad angular turbina, c) rigidez.....	91
Figura 4.25 Respuestas de la parte traslacional del aerogenerador levitado magnéticamente viento constante a) velocidad lineal eje turbina, b) desplazamiento eje turbina, c) velocidad lineal eje generador, d) desplazamiento eje generador	92
Figura 4.26 Aerogenerador levitado magnéticamente viento variable a) velocidad viento, b) potencia generada	93

Lista de Figuras

Figura 4.27 Aerogenerador levitado magnéticamente viento variable a) velocidad angular generador, b) velocidad angular turbina, c) rigidez 94

Figura 4.28 Respuestas de la parte traslacional del aerogenerador levitado magnéticamente viento variable a) velocidad lineal eje turbina, b) desplazamiento eje turbina, c) velocidad lineal eje generador, d) desplazamiento eje generador 95

III. Lista de Tablas

Tabla 2.1 Variables generalizadas en distintos dominios de energía.	13
Tabla 2.2 Ecuaciones representativas de los elementos pasivos puerto-1	15
Tabla 2.3 Reglas de afectación de causalidad.	27
Tabla 2.4 Lazos planos y sus ganancias de lazo.....	31
Tabla 3-1 Parámetros estructurales de la pala	48
Tabla 3-2 Frecuencias de los lazos y trayectorias causales de la pala.....	49
Tabla 4-1 Parámetros para modelo de una masa	73
Tabla 4-2 Parámetros para modelo de dos masas.....	83
Tabla 4-3 Parámetros para la simulación del módulo de levitación magnética	87
Tabla 4-4 Parámetros del modelo de la estructura de la transmisión y del control de levitación magnética	89

IV. Lista de Abreviaturas y Símbolos

UML	Unified Modelling Language
WWEA	World Wind Energy Association
GW	Gigawatts
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
Manglev	Magnetic Levitation
N_p	Número de dientes
N_g	Numero de dientes de engranes
WT	Wind Turbine
WTGS	Wind Turbine Generator System
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MSU	Michigan State University
IMACS	International Association for Matematics and Computers in Simulation
$e(t)$	Esfuerzo
$f(t)$	Flujo
$p(t)$	Variable de momento
$q(t)$	Variable de desplazamiento
R	Resistencia
C	Capacitancia
I	Inductancia
$v(t)$	Voltaje
$i(t)$	Corriente
$F(t)$	Fuerza
$V(t)$	Velocidad
Se	Fuente de esfuerzo
Sf	Fuente de flujo
TF	Transformador
GY	Girador
L	Inductor
m	Masa

Lista de Abreviaturas y Símbolos

B	Constante de Damper
k	Constante de resorte
x	Vector de estado en causalidad integral
$\dot{x}$	Vector de las derivadas de x en función del tiempo con causalidad integral
z	Vector de estado coenergía con causalidad integral
x_d	Vector de estado con causalidad derivativa
$\dot{x}_d$	Vector de las derivadas de x en función del tiempo con causalidad derivativa
z_d	Vector de estado de coenergía con causalidad derivativa
u	Vector de la fuente de salida
D_{in}	Vector de entrada al campo R
D_{out}	Vector de salida del campo R
MIMO	Multiple-in Multiple-out
P_t	Potencia máxima generada por el viento
λ	Velocidad específica
ρ	Densidad del aire
β	Angulo de orientación de palas
C_p	Coefficiente de potencia
J	Inercia
T_{em}	Torque electromagnético
T_t	Torque aerodinámico
ω_t	Velocidad angular de la turbina
S	Superficie creada por las palas
MSf	Fuente modulada de flujo
MSe	Fuente modulada de esfuerzo
MGY	Girador modulado
Df	Sensor de flujo
De	Sensor de esfuerzo
b	Constante de amortiguación
BEM	Blade Element Momentum Theory

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Introducción

El mundo se encuentra en una encrucijada crítica para el futuro, en lo que a generación y consumo de energía se refiere. El cambio climático, el incremento de la dependencia de combustibles fósiles, el crecimiento de importaciones, el aumento de los costos de producción de energía eléctrica, están causando que el desarrollo del mundo se encuentre en su estado más vulnerable. Estos problemas hacen un llamado para una comprensiva y ambiciosa respuesta.

El sector de las energías renovables es un sector prometedor, que ha sido visualizado como parte de las respuestas a los problemas expuestos en el párrafo anterior. Esto es debido a su habilidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación, así como explotar y descentralizar las fuentes de generación de energía eléctrica. Dichas fuente de generación son: la solar, eólica, hidroeléctrica, mareomotriz, geotérmica y biomasa, principalmente. Este tipo de energías se encuentran inmunes a la volatilidad de los mercados de los combustibles fósiles y estimulan el crecimiento de empleos, el desarrollo tecnológico, así como el crecimiento económico en general [Barbut, 2009]. Por lo cual, no existe duda de que las energías renovables constituyen una pieza fundamental para un futuro sustentable.

Dentro de las diferentes fuentes de energía renovables que se pueden visualizar, la energía eólica se ha convertido en una de las más atractivas. Esto es debido a su notable producción de energía eléctrica a pequeña y mediana potencia, su virtual carencia de contaminación (si el ruido que producen es despreciado como contaminante), así como las abundantes zonas, que se han identificado, alrededor del mundo para su aprovechamiento [Green Tech, 2013].

Como resultado de estas propiedades, una gran cantidad de investigación se ha centrado en el desarrollo de nuevos diseños de turbinas para reducir los costos de producción de energía y para producir turbinas más económicas y eficientes [Yang et al. 2009], [Zhang et al. 2008], [Zhang, 2007]. La investigación de sistemas de generación eléctrica eólica involucra simuladores de turbinas eólicas de alto desempeño, especialmente para el desarrollo de soluciones de control óptimas [Xin y Dingfag, 2011].

El uso de técnicas previamente desarrolladas (analítico o heurístico, UML, bond graph, entre otros) y la complejidad de una turbina eólica, debido a que se encuentran incluidos diferentes dominios de la física, hacen posible visualizar aun diferentes enfoques para su estudio y análisis. Bajo este contexto, para analizar el sistema la metodología de bond graph puede representar una buena alternativa. Esto es debido a que la metodología de bond graph presenta propiedades que pueden ser aplicadas directamente al modelo, las cuales pueden ser utilizadas en el diseño del control.

El modelado en bond graph comienza con un enfoque intuitivo y físico de un sistema dinámico, es decir que se buscan los componentes, elementos básicos o subsistemas que realizan un intercambio de energía en el sistema general.

En general, la metodología de bond graph se enfoca en la transferencia de energía entre los subsistemas, la cual se encuentra habilitada por medio de enlaces de ingeniería, por ejemplo, ejes mecánicos, cables eléctricos, conductos hidráulicos, mangueras o cables de fibra óptica. Debido a que los subsistemas, componentes y elementos se encuentran representados por elementos del bond graph y su interacción energética por bonds de potencia, la interacción de ambos reflejan la estructura física de un sistema, es decir, el modelo en bond graph es diseñado a partir de la constitución real del sistema. Es por esto, que la metodología puede ser llamada “dominio físico”.

El intercambio de energía entre subsistemas se encuentra asociada a un intercambio de cantidades físicas, por ejemplo, momento, masa, carga eléctrica, o entropía. Los principios de estas cantidades físicas y de conservación de potencia, se ven reflejadas en la representación en bond graph.

1.2. Objetivo

Realizar el modelado y análisis de una turbina eólica de levitación magnética utilizando la metodología de bond graph. De manera particular se desarrolla un modelo detallado, el cual permite

realizar análisis de vibraciones en la estructura, así como también desarrollar un esquema de control aplicable al sistema de estudio.

1.3. Objetivos particulares

Los objetivos particulares del presente trabajo son:

- Realizar el modelo del aerogenerador considerando la estructura de las palas.
- Incluir los elementos magnéticos necesarios con el fin de modelar la levitación de la estructura.
- Realizar un análisis del modelo propuesto.
- Desarrollar una ley de control que permita regular la potencia generada por el aerogenerador.

1.4. Metodología

La metodología aplicada en el presente trabajo, se desarrolla de la siguiente manera:

Se comienza con la investigación acerca de la metodología de bond graph, con el objetivo de obtener las bases teóricas necesarias para la concepción de modelos que incluyan diferentes dominios físicos. Adicionalmente, se realiza una investigación sobre la teoría electromagnética, con el objetivo de sustentar las bases necesarias para realizar el análisis de la turbina eólica levitada magnéticamente.

Posteriormente, la metodología de bond graph es utilizada para realizar el modelo de la turbina de viento.

Una vez obtenido el modelo se realiza el análisis del mismo, considerando las características tomadas en cuenta para su diseño. El diseño de una ley de control se hace evidente, debido a que se tiene que controlar la velocidad del generador y el ángulo de incidencia del viento sobre la estructura de las palas. Para esta última parte, se utiliza el mismo modelo gráfico de la turbina de viento para desarrollar la ley o leyes de control. Por último se realiza una comparación de resultados obtenidos con el modelo de la turbina eólica propuesta, en comparación con el modelo de una turbina eólica convencional.

1.5. Justificación

Debido a la creciente demanda de energía, la generación de energía renovable es un tema muy discutido alrededor del mundo. La industria de la energía eólica ha tenido un gran crecimiento en la última década, por lo que en la actualidad se encuentra como el sector de energía renovable más popular.

De acuerdo con información preliminar obtenida por la World Wind Energy Association (WWEA), en el año 2014 se obtuvo un nuevo record en instalaciones de energía eólica: más de 50 Gigawatts (GW) de capacidad fueron añadidos durante el 2014, para obtener un total de una capacidad de potencia eólica cercano a los 370 GW. El crecimiento de la capacidad de potencia eólica fue de un 40% mayor que en 2013, y significativamente mayor a los 44.6 GW registrados previamente en el 2012, donde doce países (China, EU, Alemania, España, India, Reino Unido, Canadá, Francia, Italia, Brasil, Suecia y Dinamarca) contribuyeron instalando 44.8 GW de nuevas plantas de energía eólica, más de la mitad de ellas añadidas por China con 23.3 GW. [wwindea]

A razón del crecimiento que tiene este tipo de energía, el desarrollo de la tecnología en la fabricación de los aerogeneradores ha tenido una gran evolución, la cual comenzó con la utilización de cajas de engranes que permiten el acoplamiento tanto del torque como de la velocidad del generador y la parte mecánica de la turbina eólica. Dicha estructura ha sido la más utilizada hasta finales de las décadas pasadas (2000).

Esta estructura presenta comúnmente problemas debido a desgastes o fallas en las cajas de engranes [Adam y Magdi, 2010], por tal motivo se comenzó a explorar nuevas maneras de fabricar turbinas eólicas más eficientes. Debido a lo anterior, varias empresas se enfocaron en la fabricación de turbinas directamente acopladas [Enercon], es decir que el rotor de la turbina se encuentra directamente acoplado con el generador, así minimizando el desgaste mecánico, reducción de tensión debido a su velocidad variable, etc.

Con el desarrollo de la presente tesis, se pretende realizar un modelo de un aerogenerador que permita eliminar el problema existente en la caja de engranes, agregando un sistema de levitación magnética. Adicionalmente, se pretende que el modelo refleje una generación de energía eléctrica con velocidades de viento muy bajas, esto debido a la eliminación de pérdidas mecánicas de rozamiento o vibraciones existentes en los soporte mecánicos con los que comúnmente cuenta un aerogenerador comercial.

1.6. Estado del arte

La revisión del estado del arte del presente trabajo es expuesta en cuatro partes principales: la energía eólica, la turbina eólica, la levitación magnética y el modelado en bond graph. Estos son descritos a continuación.

1.6.1. Energía Eólica

El viento es conocido por ser otra forma de energía solar, debido a que es el resultado del calentamiento no uniforme en la atmosfera, a la radiación solar y el sustrato topográfico de la superficie de la Tierra.

El viento puede ser clasificado en diferentes tipos, por ejemplo: vientos locales y planetarios, de los cuales los planetarios son los vientos que se toman en cuenta cuando se estudian las turbinas eólicas, debido a que son estos vientos los que influyen en las dimensiones de fabricación de los aerogeneradores. Es importante remarcar que el viento planetario es el más importante y el de mayor peso para decidir el sitio donde la turbina eólica será más efectiva.

Existen varias razones del porque usar la energía eólica para producir potencia eléctrica. Una de ellas es que la potencia del viento disponible en la atmosfera es mucho mayor que el consumo energético mundial en la actualidad [Yang, 2001]. La explotación de la potencia eólica se encuentra solamente limitada por factores económicos y ambientales, debido a que el recurso disponible es mucho mayor que cualquier medio práctico para desarrollarlo. La energía renovable producida por el viento ha atraído bastante la atención y el apoyo en los últimos años. Sin embargo, este tipo de energía es continuamente criticada por baja potencia de salida y falta de confiabilidad.

Los modelos creados en relación al viento son principalmente de pronósticos, teniendo cuatro diferentes horizontes: a muy corto plazo (pocos segundos a 30 minutos), corto plazo (30 min. A 6 hrs.), medio plazo (6 a 24 hrs.), y largo plazo (1-7 días) [Zack, 2003], [Soman et al. 2010]. Donde existen distintas técnicas de enfoque como lo son: el físico, estadístico y probabilístico para predicciones, y una combinación de diferentes enfoques, aprovechando las ventajas de cada tipo [Jung y Broadwater, 2014].

1.6.2. Turbina Eólica

Los principios básicos del funcionamiento de una turbina eólica (WT por sus siglas en inglés) han sido descritos a lo largo del tiempo, por lo que existen numerosas fuentes en la literatura donde se explica y presentan las ecuaciones matemáticas que gobiernan el comportamiento de una turbina eólica [Freris y Infield, 2008], [Johnson, 1994], [Golding, 1976].

El principio básico del funcionamiento de una turbina eólica consiste en la captura de la energía cinética del viento por las palas de la turbina; dicha energía cinética es formada por el rápido movimiento del aire. En general, existen dos tipos de turbinas eólicas de acuerdo del movimiento del eje: turbinas eólicas de ejes horizontales (HAWT por sus siglas en inglés), en las cuales el rotor principal y el generador eléctrico se encuentran en la parte superior de la torre y en dirección del viento. La mayoría de estos aerogeneradores poseen una caja de engranes que convierte la lenta rotación de las palas de la turbina en una rotación de mayor velocidad, la cual es más adecuada para el funcionamiento de un generador eléctrico. En cuanto a la turbina eólica de eje vertical (VAWT por sus siglas en inglés) consiste de un generador y una caja de engranes colocados en el suelo de manera horizontal a éste, por lo que no hay necesidad de una torre que los sostenga como ocurren en una HAWT. El rotor principal se encuentra posicionado verticalmente para permitir que las palas de las turbinas roten sin posicionarse a la dirección del viento.

Dentro de la literatura, se pueden encontrar diversos trabajos en relación a las HAWT como es el caso de [Manyonge et al. 2012], [Ochieng et al. 2010], [Anderson y Anjan, 1983], [Singh y Santoso, 2011]; en donde se tratan los modelos matemáticamente. Para el caso de [Lydia et al. 2013] se utilizan técnicas de computación evolutiva para el modelado del aerogenerador.

En lo que respecta a las turbinas VAWT, el análisis y modelos de este tipo de turbinas es un poco más escaso. Por ejemplo en [Kadam y Patil, 2013] se presenta un modelo matemático del funcionamiento de un rotor tipo Savonius, el cual es utilizado para determinar el funcionamiento con diferente número de palas para mayor eficiencia. Por otra parte en [Berg et al. 1990] se realiza un estudio, diseño y fabricación de una pala de rotor, haciendo énfasis en el modelo SAN 0018/50, y se compara el desempeño medido con las predicciones en el desempeño del mismo.

1.6.3. Levitación Magnética

La levitación magnética (maglev por sus siglas en inglés) es un fenómeno en el cual un objeto es suspendido por campos magnéticos. La fuerza magnética producida es usada para contrarrestar el efecto de la fuerza gravitacional, lo cual levanta el objeto.

Posicionando dos imanes encarándose uno al otro con sus polaridades iguales, la repulsión magnética será lo suficientemente potente para mantener ambos imanes distanciados uno del otro. La fuerza creada por esta repulsión puede ser usada para propósitos de suspensión y es suficientemente fuerte como para balancear el peso de un objeto dependiendo del umbral de los imanes.

Existen muchas ventajas para la utilización de la levitación magnética, como lo es: minimizar la fricción, o realizar mediciones de fuerza. Recientemente, esta tecnología es aplicada en sistemas de transporte en los vehículos sin contacto que viajan a altas velocidades mientras se encuentran suspendidos, guiados, y propulsados por debajo por un camino de campos magnéticos [Powell y Danby, 2005]. El concepto de vehículos levitados magnéticamente ha estimulado el desarrollo de útiles aplicaciones en varios campos, como lo es la generación de energía.

Este fenómeno no sólo ha sido aplicado en los trenes, se tienen estudios presentados en suspensiones automotrices [Javawant, 1981] y en motores, como es el caso de los *magnetics bearings* [Yonnet y Lemarquand, 1991]. Por otra parte es importante remarcar que también ha sido aplicado en turbinas eólicas, pero principalmente en turbinas VAWT, como es el caso de las referencias [Pinedo y Ramirez, 2009] [Aravind et al. 2012].

1.6.4. Modelado en bond graph

Cuando se trata de un sistema de control de una turbina eólica (WT por sus siglas en inglés), el modelo de la turbina se convierte en una parte importante del problema, debido a la complejidad del sistema, donde distintas áreas técnicas se encuentran involucradas (mecánica, aeronáutica, eléctrica, entre otras). Se pueden encontrar diversas publicaciones en la literatura, en donde se describe como modelar con precisión una turbina eólica. En esta sección se realiza una pequeña síntesis de dichos modelos utilizando la metodología de bond graph.

A lo largo de los años se han tenido importantes aportaciones referentes al modelado de una turbina eólica, ya sea como un conjunto, o el modelado de las diferentes partes que conforman el sistema (palas, cajas de engranes, generador, etc.).

Un modelo en bond graph de una pala es propuesto por Agarwal [Agarwal et al. 2012], el cual considera la pala como un haz Rayleigh compuesto de un número de secciones sometidas a fuerzas aerodinámicas, calculadas usando la teoría del momento del elemento de la pala (Blade Elementum Momentum Theory), y la teoría del modelo de haz Rayleigh ([Mukherjee et al. 2000], [Hasen et al. 2006]), que permiten obtener un modelo dinámico en el cual se puede realizar un análisis modal. Por lo que, la pala se sintetiza en dos partes principales: la estructural y la aerodinámica.

En cuanto a la caja de engranes, se encuentra compuesta normalmente por tres etapas. Estas etapas son: un engranaje planetario y dos etapas paralelas (para incrementar la velocidad angular). Modelos en bond graph de cajas de engranes han sido publicados en [Coudert et al. 1993], [Joško et al. 2012]. La manera más simple de modelar una caja de engranes es mediante una sola estructura, es decir, el radio de conversión (N_p/N_g , donde N_p es el número de dientes y N_g el número de dientes de engranes) puede ser introducido directamente en un transformador (elemento TF).

El modelo del generador o máquina de inducción, pueden ser representado de dos formas generales:

- Utilizando el marco de referencia en cuadratura y directa, comúnmente conocido como marco de referencia de Park [Sahm, 1979], [Junco, 1999], [Karnopp, 1991];
- Utilizando un marco de referencia natural o arbitrario (tres señales senoidales) [Mukherjee, 1999].

En lo que respecta a la metodología de bond graph, el modelo de la máquina de inducción ha sido presentado en diferentes publicaciones, por citar alguna, se tiene que en [Dauphin-Tanguy, 2000] es presentado un modelo en el marco de referencia natural, considerando las siguientes suposiciones: despreciando la histéresis magnética y la saturación magnética, la unión del estator está distribuido sinusoidalmente a través de un hueco de aire, y los espacios del estator no causan variaciones significativas de las inductancias del rotor con respecto a la posición del mismo.

En [Tamura et al. 2001] y [Zubia et al. 2001] se realiza un análisis de un modelo de una masa, en [Petru y Thiringer, 2002] y [Akhmatov y Knudsen, 1999] se examina un modelo de dos masas. Para [Martins et al. 2007] se usan datos de mediciones de una WT y son comparados con los modelos de una

masa y de dos masas. El modelo es validado usando un caso obtenido con velocidad fija. En [Muyeen et al. 2007] modelos de seis, tres y dos masas son comparados. Se concluye que el modelo de seis masas es necesario para el análisis preciso del transitorio del sistema generador de la turbina eólica (WTGS), y se desarrolla una forma de transformar el modelo de seis masas en un modelo de dos masas.

El modelo en bond graph de una turbina de viento ha sido presentados anteriormente [Bakka et al. 2011] y [Bakka et al. 2013]. En [Bakka et al. 2011] se presenta un modelo de tres masas considerando el buje del rotor, la caja de engranes y el generador, estos elementos se analizan con el movimiento de la torre. En [Bakka et al. 2013] se presenta un modelo de cuatro masas, en el cual se incluye el ángulo de las palas, rotor, el movimiento de la torre y el generador.

1.7. Descripción de Capítulos

La presente tesis se encuentra organizado de la siguiente manera: en el Capítulo 2 se explica el análisis y construcción de un modelo utilizando la metodología de bond graph. En el Capítulo 3 se desarrollan diferentes modelos de la turbina de viento, desde el modelo básico hasta la formulación del modelo de levitación magnética propuesto, así como también un análisis de dichos modelos. En el Capítulo 4, la ley de control deducida de la inversión gráfica de los modelos previamente obtenidos es presentada. Finalmente el Capítulo 5 presenta las conclusiones de la presente tesis.

Capítulo 2

2. Modelado en Bond Graph

2.1. Introducción

Entre los años 1949 y 1950, Henry M. Paynter (1923-2003), profesor del MIT (Massachusetts Institute of Technology), en base a su experiencia en proyectos multidisciplinarios, los cuales incluyeron plantas hidroeléctricas, computación analógica y digital, la dinámica no lineal y control, observó que formas similares a las ecuaciones son generadas por los sistemas dinámicos en una amplia variedad de dominios (por ejemplo, eléctrico, mecánico e hidráulico), es decir, son sistemas análogos. Paynter incorporó la noción de un puerto de energía a su metodología, y con esto se desarrolló la herramienta de análisis Bond Graph [Borutzky, 2010].

Posteriormente sus estudiantes Dean C. Karnopp, profesor de UC Davis, y Rnald C. Rosenberg, profesor de la MSU (Michigan State University), desarrollaron más ampliamente esta herramienta, así mismo diseñaron la primera herramienta computacional (ENPORT) que soporta simulaciones bajo modelos obtenidos mediante diagramas de bond graph. En los años setenta J. Van Dixhoorn (1982), J. Thomas (1975) y Dransfiel P., contribuyeron sustancialmente a la difusión de esta metodología en toda Europa

J. Van Dixhoorn fundó IMACS (International Association for Mathematics and Computer in Simulation), además presentó un primer prototipo de diagramas de bloques basado en el software TUTSIM, el cual se pudo utilizar para ingresar diagramas causales simples de bond graph, y ha sido utilizado como base para desarrollar nuevas herramientas computacionales personales, como lo es la famosa herramienta 20-sim de la Universidad de Twente.

En los últimos años, el modelado de sistemas dinámicos utilizando bond graph se ha reportado en una serie de conferencias como es la conferencia de IMACS, primera conferencia internacional SCS dedicada específicamente a los modelos de bond graph en 1993 en San Diego, CA. En esta conferencia se invitó a una sesión plenaria para el modelado en bond graph dada por Cellier, en la edición de 1990 de la segunda parte del libro de texto de Karnopp y Rosenberg y el nuevo libro de texto de J. Thomas, publicado también en 1990, se impartieron múltiples seminarios en la industria, y un creciente número de empresas implementa el modelado en bond graph, especialmente en Francia.

2.2. Conceptos Básicos

A diferencia de los diagramas a bloques, los cuales representan el flujo de señales y su procesamiento, el modelado de bond graph representa el intercambio de energía de los subsistemas, componentes o elementos básicos que conforman físicamente un sistema dinámico.

El modelado en bond graph comienza con la identificación de características esenciales y de mecanismos inherentes de un sistema dinámico.

Un bond en un bond graph es dibujado como una media flecha, mostrada en la Figura 2.1 y representa un flujo de energía instantánea. En una observación general cada dominio de energía, una cantidad de potencia transferida es igual al producto de dos cantidades físicas. Estas son llamadas esfuerzo y flujo y son denotadas por e y f . Estas variables también son conocidas como variables generalizadas debido a que pueden ser utilizadas en todos los dominios de la energía.

$$\text{Potencia} = \text{Esfuerzo} \times \text{Flujo}$$

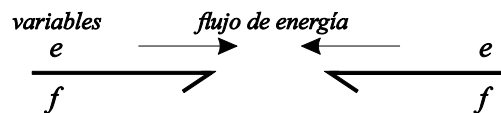


Figura 2.1 Representación de un bond con las variables de potencia esfuerzo y flujo.

La dirección de esta media flecha indica la dirección positiva del flujo de energía. Las partes principales de un sistema son llamadas subsistemas y las partes no reducibles son llamadas componentes y

básicamente, un subsistema es una parte de un sistema que es modelado como un sistema en sí mismo, donde un componente es modelado como una entidad.

Los lugares en los cuales se interconectan los subsistemas son llamados puertos. Los sistemas multipuertos son denotados por puertos- n , donde n es el número de puertos.

En sistemas almacenadores de energía es necesario definir variables que representen el estado del sistema, llamados variables de energía, denominados momento $p(t)$ o esfuerzo $e_a(t)$ y desplazamiento $q(t)$ o flujo acumulado $f_a(t)$, están dadas por,

$$p(t) = e_a(t) = \int_t e(\tau) d\tau \quad (2.1)$$

$$q(t) = f_a(t) = \int_t f(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

En la Tabla 2.1 se pueden observar las variables generalizadas para distintos dominios de energía.

Tabla 2.1 Variables generalizadas en distintos dominios de energía.

Dominio Físico	Eléctrico	Hidráulico	Mecánica de Rotación	Mecánica de Traslación
Esfuerzo (e)	Voltaje $v(t)$	Presión $p(t)$	Par $M(t)$	Fuerza $F(t)$
Flujo (f)	Corriente $i(t)$	Caudal $Q(t)$	Velocidad angular $w(t)$	Velocidad $v(t)$
Momento (p)	Flujo Magnético $F(t)$	Momento $P(t)$	Momento angular $H(t)$	Momento rotacional $P(t)$
Desplazamiento (q)	Carga $Q(t)$	Volumen $V(t)$	Ángulo $\theta(t)$	Distancia $x(t)$

2.3. Elementos del Sistema

2.3.1. Elementos Pasivos Puerto-1

Se le conoce como elementos pasivos debido a que pueden convertir la energía con la que se alimentan, ya sea disipada en forma de calor o almacenada. Se les llama de puerto-1, ya que se caracterizan por una ley escalar y reciben energía a través de un enlace único. Debido a que la energía es suministrada a los elementos la semiflecha es orientada hacia el elemento.

Elemento- R (resistivo). Transforma la potencia que se les proporciona en energía disipada bajo forma de calor, su representación se observa en la Figura 2.2.

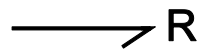


Figura 2.2 Representación del elemento R .

Elemento- C . Elemento de almacenamiento para una variable tipo q , su representación se muestra en la Figura 2.3.

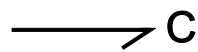


Figura 2.3 Representación del elemento C .

Elemento- I . Elemento de almacenamiento de variable de tipo p , cuya representación se ilustra en la Figura 2.4.

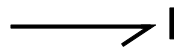


Figura 2.4 Representación del elemento I .

En la Tabla 2.2 se puede observar los elementos R , C , I para sistemas eléctricos y mecánicos [Dauphin-Tanguy, 2000].

Tabla 2.2 Ecuaciones representativas de los elementos pasivos puerto-1

Elemento	Eléctrico	Mecánico
R	$v(t) = Ri(t)$	$F(t) = bV(t)$
C	$v(t) = \frac{1}{c} \int i dt$	$F(t) = k \int v dt$
I	$i(t) = \frac{1}{L} \int v dt$	$v(t) = \frac{1}{M} \int F dt$

2.3.2. Elementos Activos Puerto-1

Fuentes: Se puede dividir el elemento de fuente en dos tipos, fuente de esfuerzo y fuente de flujo. La fuente de esfuerzo provee un esfuerzo al sistema, después el sistema proporciona el flujo. Para la fuente de flujo es exactamente lo contrario, la fuente subministra un flujo y el sistema aporta el esfuerzo, la Figura 2.5 muestra su representación.

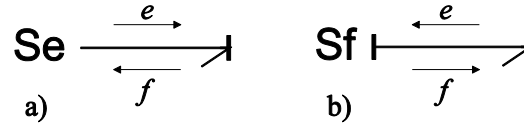


Figura 2.5 a) Fuente de esfuerzo, b) Fuente de flujo.

2.3.3. Elementos Ideales Puerto-2

Existen dos elementos ideales del Puerto-2, transformador (*TF*) y girador (*GY*), que son sistemas lineales que cambian la relación entre las variables de flujo y esfuerzo.

Transformador. Este elemento puede trabajar de dos maneras, ya sea transformado un flujo en otro flujo o un esfuerzo en otro esfuerzo. La Figura 2.6 ilustra su representación.



Figura 2.6 Representación de un Transformador en bond graph.

Girador. El girador puede trabajar de dos formas, ya sea transformando un flujo en un esfuerzo o transformando un esfuerzo en un flujo, en la Figura 2.7 se observa su representación.



Figura 2.7 Representación de un Girador en bond graph.

2.3.4. Elementos de Unión Puerto-3

Existen dos tipos de uniones que conectan diferentes partes de un subsistema (las cuales representan en forma de multipuertos) y que corresponden a los dos tipos de conexiones: en serie y paralelo, llamadas unión-0 y unión-1.

En la unión-0 el esfuerzo de todos los bonds conectados a él es el mismo, en la Figura 2.8 se puede observar su representación, por lo que solo un bond decide este esfuerzo. Las relaciones de interconexión se encuentran descritas por,

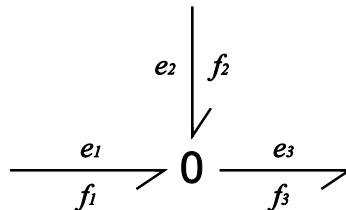


Figura 2.8 Unión 0

$$\begin{aligned} e_1 &= e_2 = e_3 \\ f_3 &= f_1 + f_2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Por el contrario en la unión-1 los flujos son iguales, representada en la Figura 2.9, por lo que ésta cantidad es determinada solo por un bond, donde sus relaciones de interconexión se encuentran expresadas por,

$$\begin{aligned} f_1 &= f_2 = f_3 \\ e_3 &= e_1 + e_2 \end{aligned} \quad (2.4)$$

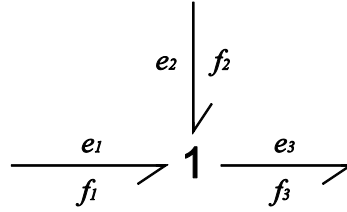


Figura 2.9 Unión 1.

Los puertos de conexión de esfuerzo y flujo se pueden extender a puertos de 3 o más puertos [Dauphin-Tanguy, 2000].

2.3.5. Elementos de almacenamiento multibond

Dentro de la teoría de modelado de bond graph, se pueden combinar bonds en elementos llamados multibonds, con el objetivo de simplificar la estructura o representación del sistema. Por otra parte, se ha observado que los vértices de un bond graph pueden tener múltiples puertos de potencia. En este caso, estos son llamados elementos multipuerto (unión-1 y unión-0). El hecho de que otros elementos básicos puedan tener también múltiples puertos de potencia y estos puertos puedan estar conectados por multibonds fue usada por primera vez por Bonderson [Bonderson, 1975] para modelos unidimensionales de sistemas con parámetros distribuidos, los cuales llamo bond graph de vectores. Posteriormente, para

evitar la asociación con la orientación de cantidades físicas, fue remplazado el término de bond de vector por multibond.

El concepto de multibond graph se ha usado para la descripción de sistemas de movimiento tridimensionales con cuerpos rígidos en una forma clara y compacta [Tiernego y Bos, 1985]. Sin embargo, los modelos con multibonds no recaen exclusivamente a esta aplicación como se describe en [Fahrenthold y Wargo, 1991], donde han sido aplicados a otra área, como la termodinámica.

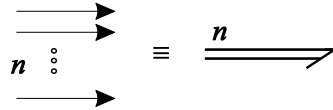


Figura 2.10 Combinación de flechas de señal

La Figura 2.10 muestra la ejemplificación de la combinación de varias flechas de señales en una sola. Dicha combinación es utilizada cuando los elementos multibond son utilizados.

La combinación de elementos del mismo tipo, no une variables a diferentes bonds. Es decir, sólo el *n-ésimo* esfuerzo y el *n-ésimo* flujo de salida de las variables de potencia de un multibond se encuentran relacionados por una ecuación constitutiva de un puerto de potencia pasivo. Si fuentes independientes se encuentran combinadas en un arreglo de fuentes, entonces no existe relación entre ellas. Por otra parte, ecuaciones constitutivas para dispositivos en diferentes áreas, por ejemplo, un haz se asume que no tiene masa, bobinas interactuando mutuamente, o un cilindro lleno con gas, indican la necesidad de introducir elementos de almacenaje de energía con múltiples puertos de potencia, donde las variables del puerto están relacionadas con la energía almacenada. En bond graph con bond unidimensionales, se necesitan tantos bonds como sean necesarios para simplemente unirlos a un elemento de almacenaje. En un multibond graph, todos los bond adyacentes son combinados en un multibond. Si un multibond de dimensión *n* es conectado a un puerto de potencia, se dice que este puerto de es de dimensión *n*. Para hacer una diferenciación elemento multibond se representa como muestra la Figura 2.11.

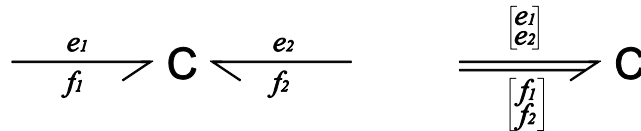


Figura 2.11 Representación de un elemento C con dos puertos de potencia

Si todos los esfuerzos de un multibond unidos a un elemento C de almacenamiento de energía se agrupan a un vector e y correspondientemente todos los flujos en un vector f , entonces la potencia P almacenada en el multipuerto se puede expresar como,

$$P = e^T f \quad (2.5)$$

donde T es la transpuesta del vector. Como equivalente a los elementos de almacenamiento C de puerto-1. Un elemento C con n , puertos de un bond unidimensional se caracteriza por n funciones que establecen las relaciones entre un solo esfuerzo con todos los desplazamientos generalizados. Puede ocurrir una combinación de causalidades integrativa y derivativa, ese caso no puede ser expresado con un solo multibond. En lugar, el multibond debe de ser separado en dos multibond de diferentes dimensiones y con diferentes causalidades asignadas. En el caso cuando todos los puertos tienen causalidad derivativa, la ecuación constitutiva del elemento C se expresa como

$$q = \Phi_c(e) \quad (2.6)$$

donde q representa el vector de los desplazamientos generalizados. Si E denota la energía almacenada en el elemento multipuerto C , entonces esta es una función del desplazamiento generalizado, como sucede en el elemento puerto-1 C .

$$E = E_0 + f_E(q) \quad (2.7)$$

donde E_0 representa la energía almacenada en el tiempo inicial t_0 . El esfuerzo de cada puerto de potencia i es obtenido por la diferenciación de la función de estados (Ecuación (2.7)) con respecto del tiempo.

$$e_i = \frac{\partial E}{\partial q_i} \quad (2.8)$$

donde $i = 1, \dots, n$.

Debido a que un almacenador de energía es conservador de energía, se puede mostrar que las ecuaciones constitutivas de un elemento C con puertos unidimensionales debe obedecer a la condición de reciprocidad de Maxwell.

$$\frac{\partial e_i}{\partial q_j} = \frac{\partial e_j}{\partial q_i} \quad (2.9)$$

donde $i \neq j$, $i, j = 1, \dots, n$.

Para una relación constitutiva lineal, la condición de reciprocidad de Maxwell dice que la función ϕ_C en la ecuación (2.6) deber ser representada por un matriz simétrica.

$$e = C^{-1}q \quad (2.10)$$

Similarmente, un elemento I de almacenamiento de energía con n puertos de potencia, es caracterizado por n ecuaciones constitutivas que relacionan el flujo del puerto i con todos los momentos generalizados. De igual manera algunos puertos de un elemento multipuerto I puede tener causalidad integral mientras que otros puede tener causalidad derivativa. Si todos los puertos se le asignan causalidad derivativa, la ecuación constitutiva es de la forma,

$$p = \Phi_I(f) \quad (2.11)$$

donde p es el vector de momento generalizado. Por el principio de energía de conservación, la condición de reciprocidad de Maxwell resulta en la forma,

$$\frac{\partial f_i}{\partial q_j} = \frac{\partial f_j}{\partial p_i} \quad (2.12)$$

2.4. Modelado de Sistemas Físicos

2.4.1. Procedimiento para modelar sistemas eléctricos

Para construir un bond graph, es necesario seguir el procedimiento correspondiente al dominio que le corresponde.

Procedimiento para los sistemas eléctricos:

1. Fijar el sentido de la corriente. Este será tomado como sentido de la transferencia de la potencia.
2. Buscar todo los nodos, y colocar una unión 0 por cada uno.
3. Colocar una unión 1 entre dos uniones 0 , y agregar los elementos que se encuentren sometidos a una diferencia de potencial.
4. Acoplar las uniones por medio de trazos, respetando el sentido de transferencia de la potencia.
5. Escoger un nodo de referencia (o varios según sea el caso) y suprimir (o suprimirlos) la unión (uniones) 0 que están asociadas a dicho nodo, así como todos los trazos que se encuentran unidos a esta unión. Simplificar si es posible como sigue:

$$\longrightarrow 1 \longrightarrow = \longrightarrow \quad \longrightarrow 0 \longrightarrow = \longrightarrow$$

Para mostrar cada una de las etapas del procedimiento para los sistemas eléctricos, se presenta el ejemplo básico de un circuito eléctrico RL en serie (Figura 2.12).

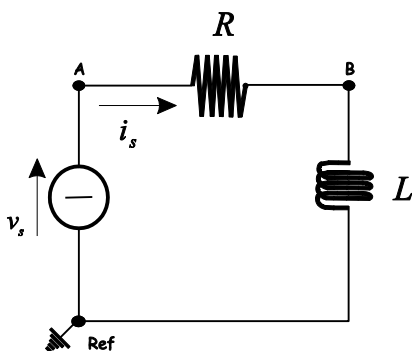


Figura 2.12 Esquema del circuito eléctrico RL .

Para obtener el bond graph del circuito eléctrico, se aplica el procedimiento descrito anteriormente. La Figura 2.13 muestra gráficamente la aplicación de dicho procedimiento.

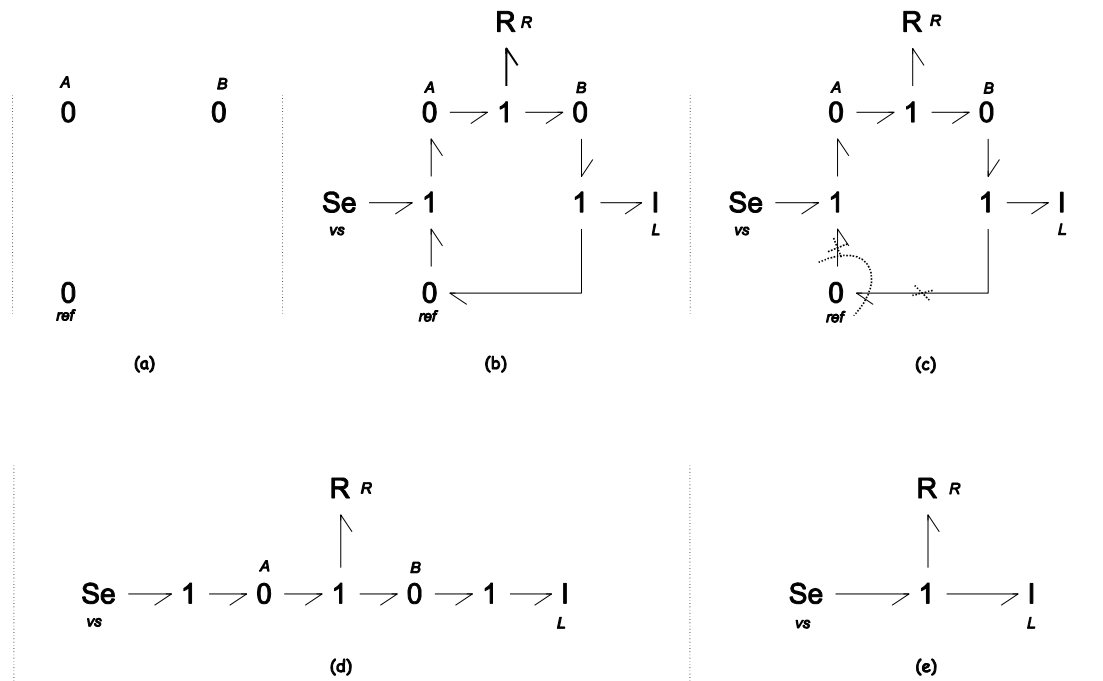


Figura 2.13 Procedimiento para el modelado del circuito RL, donde a) representa los nodos del sistema, b) acoplamiento de uniones I y elementos sometidos a un diferencial de potencial, c) elección de un nodo de referencia, d) supresión del nodo de referencia y e) simplificación del modelo.

En la Figura 2.13a se representan los nodos del sistema con una unión 0 respectivamente, que corresponden al punto 2 del procedimiento. En la Figura 2.13b se agregan los elementos que presentan diferencial de potencial y se acoplan mediante uniones 1 siguiendo el sentido de la potencia (paso 3 del procedimiento). En la Figura 2.13c se escoge un nodo de referencia (paso 4 del procedimiento) que corresponde a la tierra del circuito. La Figura 2.13d se elimina el nodo de referencia y se redibuja el bond graph y finalmente en la Figura 2.13e se simplifica el modelo (paso 5 del procedimiento).

La Figura 2.14 muestra una comparación grafica del esquema y del bond graph.

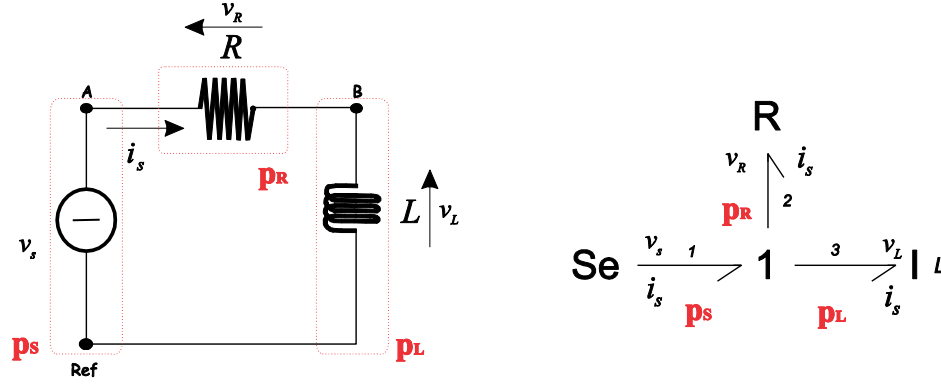


Figura 2.14 Comparación gráfica del circuito RL.

Se puede observar en la Figura 2.14 que en el esquema eléctrico se tienen los 3 elementos que corresponden a los tres elementos Se , R , I del bond graph. Una potencia instantánea está asociada en cada trazo. La unión 1 permite hacer un balance de la potencia $p_s - p_R - p_L = 0$.

2.4.2. Procedimiento para modelar sistemas mecánicos

El procedimiento para el modelado de sistemas mecánicos es similar al método al descrito para un circuito eléctrico.

Procedimiento para los sistemas mecánicos:

1. El tipo de uniones que le corresponden, son las uniones I , las cuales son asignadas para cada velocidad distinta.
2. Insertar uniones 0 por cada elemento puerto-1 del sistema, entre sus correspondientes uniones-1. Añadir inercias a sus respectivas uniones I .
3. Asignar el nodo particular de tierra, que en este caso, es cualquier velocidad cero (unión I).
4. Se simplifica el modelo.

Para mostrar cada etapa del procedimiento para el modelado de un sistema mecánico, se presenta un sistema mecánico de masa resorte amortiguador (Figura 2.15).

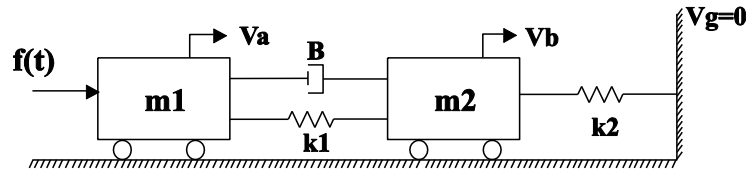


Figura 2.15 Esquema de sistema mecánico.

Para obtener el modelo en bond graph se utiliza los pasos, los cuales son ejemplificados gráficamente en la Figura 2.16.

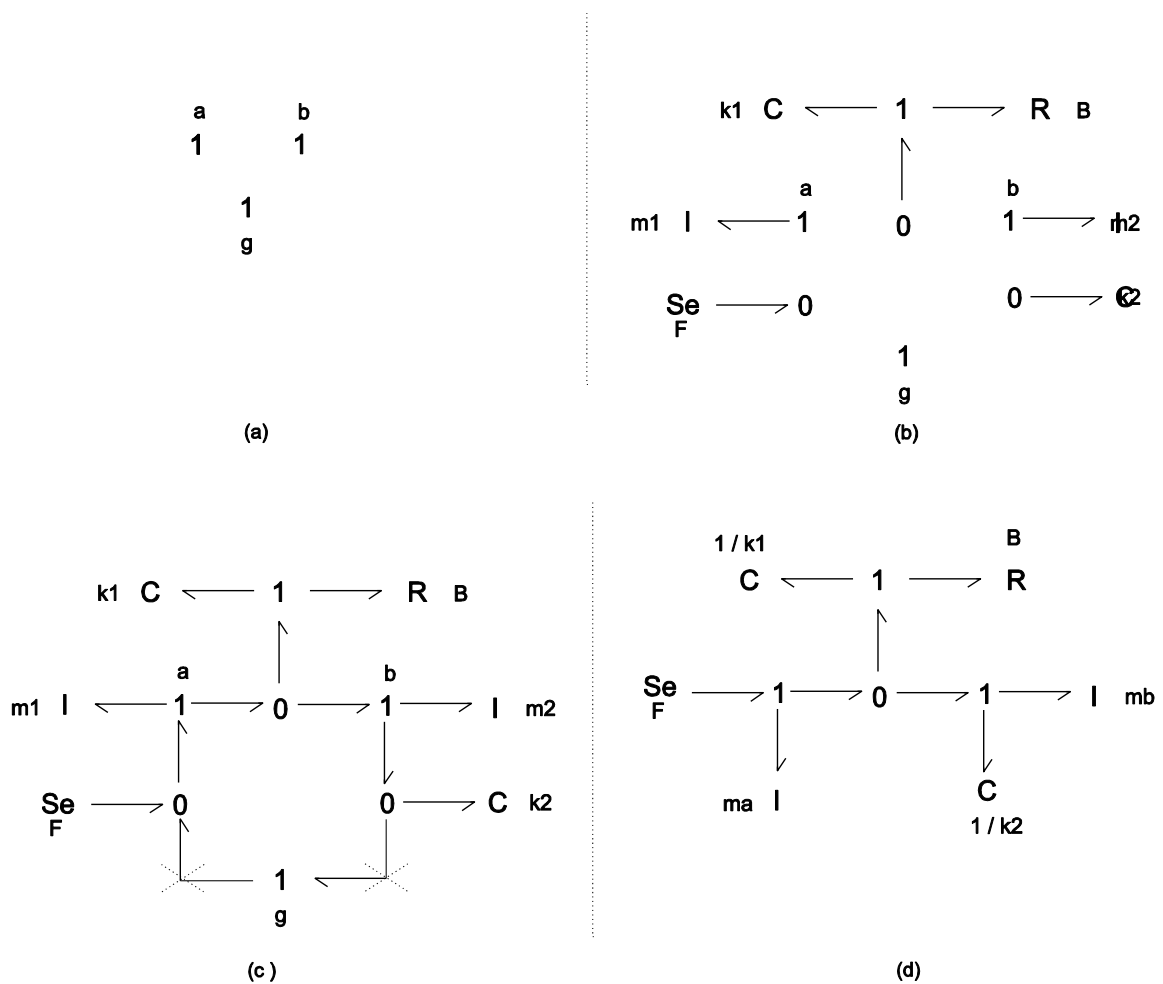


Figura 2.16 Procedimiento para el modelado del circuito mecánico, donde a) asignación de uniones 1 por cada velocidad del sistema, b) colocación de uniones 0 y elementos presentes en los nodos, c) elección de nodo de referencia, d) simplificación del modelo.

En la Figura 2.16a se representan los nodos del sistema con una unión 1 que indican una velocidad diferente en cada punto del sistema mecánico (paso 1 del procedimiento para sistemas mecánicos). En la Figura 2.16b se agregan los elementos que presentan diferencial de potencial y se acoplan mediante uniones 0, así como también las inercias son colocadas en las uniones 1 previamente asignadas (paso 2 del procedimiento para sistemas mecánicos). En la Figura 2.16c se escoge un nodo de referencia correspondiente a una velocidad cero (paso 3 del procedimiento). La Figura 2.16d se elimina el nodo de referencia y se simplifica el modelo.

Se puede observar una comparación grafica entre el esquema y el modelo en bond graph, la cual se ilustra en la Figura 2.17.

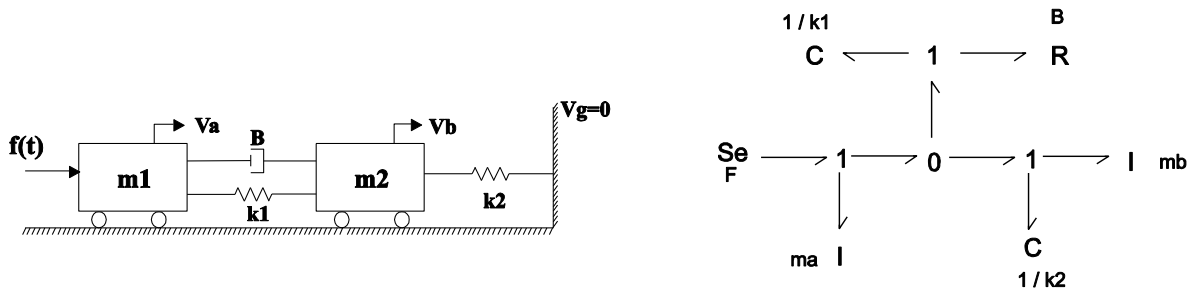


Figura 2.17 Comparación gráfica del sistema mecánico.

En la Figura 2.17 se puede observar que en el esquema mecánico se encuentran seis elementos incluyendo la fuerza inicial $f(t)$, los cuales corresponden a los seis elementos mostrados en el modelo de bond graph.

2.5. Causalidad

El concepto de causalidad es lo que representa las relaciones de causa y efecto.

Convención: la línea causal (trazo perpendicular más grueso) que aparece CERCA (LEJOS) del elemento para indicar un ESFUERZO (FLUJO) dado, corresponde a los diagramas mostrados en la Figura 2.18. En otras palabras, en la Figura 2.18a, el esfuerzo es la salida del sistema de A y una entrada para el sistema B y viceversa para el flujo.

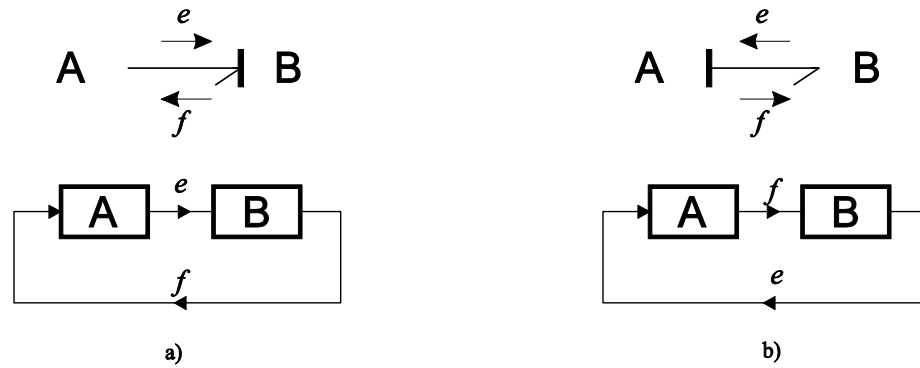


Figura 2.18 Causalidad en un trazo y su diagrama a bloques asociado.

La causalidad es asignada en relación a las siguientes reglas para los elementos y las uniones:

- Causalidad obligatoria para las fuentes.
- Causalidad obligatoria para los elementos R que contenga leyes no invertibles,
- Causalidad preferencial integral para los elementos C y I (elementos de almacenamiento).
- Restricciones de la causalidad para las uniones:
 - Unión 0: un sólo trazo causal cerca del 0, esto quiere decir que un sólo elemento impone su esfuerzo a los otros elementos acoplados a esta unión.
 - Unión 1: un sólo trazo causal lejos del 1, esto quiere decir que un sólo elemento impone su flujo a los otros elementos acoplados a esta unión.
- Causalidad arbitraria para los elementos R lineales para respetar las restricciones de la causalidad en las demás uniones.

La Tabla 2.3 muestra las reglas de afectación de la causalidad.

Tabla 2.3 Reglas de afectación de causalidad.

Causalidad	Simbolo	Ley	Causalidad	Simbolo	Ley
Restricciones de Causalidad		$e_1 = e_i$ $e_2 = e_i$ $\vdots$ $e_n = e_i$	Obligatoria	Se	<i>e impuesto por Se</i>
				Sf	<i>f impuesto por Sf</i>
		$f_1 = f_i$ $f_2 = f_i$ $\vdots$ $f_n = f_i$	Integral (preferencial)		$e = \Psi_c \left(\int f(\tau) d\tau \right)$
					$f = \Psi_i \left(\int e(\tau) d\tau \right)$
		$e_1 = m \cdot e_2$ $f_2 = m \cdot f_1$	Derivativa		$f = \Psi_c^{-1} (de/dt)$
		$e_2 = 1/m \cdot e_1$ $f_1 = 1/m \cdot f_2$	Arbitratia (lineal)		$e = \Psi_i^{-1} (df/dt)$
		$e_1 = r \cdot f_2$ $e_2 = r \cdot f_1$	No arbitraria (no lineal)		$e = R \cdot f$
		$f_1 = 1/r \cdot e_2$ $f_2 = 1/r \cdot e_1$			$f = 1/R \cdot e$
					$e = \Psi_s(f)$
					$f = \Psi_s^{-1}(e)$

De la misma manera que existe un procedimiento para la obtención del bond graph, también existe un procedimiento para la asignación de la causalidad.

2.5.1. Procedimiento para la asignación de la causalidad

Proceso:

1. Colocar la causalidad (obligatoria) a las fuentes y los elementos R no lineales.
2. Colocar a los elementos I y C una causalidad integral preferencial.
3. Colocar la causalidad en los elementos R lineales, respetando las restricciones de causalidad en las uniones.
4. En caso de conflicto en una unión, buscar el elemento I o C causante de dicho conflicto y colocarlo en causalidad derivativa.

De acuerdo al procedimiento y las reglas de afectación de la causalidad, el bond graph sin causalidad asignada de la Figura 2.14, se transforma en el bond graph causal mostrado en la Figura 2.19.

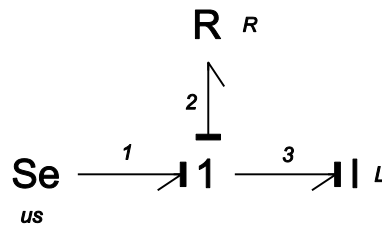


Figura 2.19 Bond graph causal del circuito RL.

La causalidad en un bond graph permite obtener las ecuaciones de estado y la función de transferencia de manera sistemática, y de realizar diferentes tipos de análisis estructurales.

2.6. Modelado Matemático

En el modelado en bond graph existen dos maneras diferentes de obtener las variables de estado. Estos métodos son: a través de la Matriz de estructura de unión y por medio de las Trayectorias causales.

En esta sección sólo se describirá el método de Trayectorias causales

2.6.1. Trayectorias Causales

Una vez determinado el estado estable de un sistema, se puede linealizar el modelo de ecuaciones y permite desarrollars un análisis de pequeña señal. A pesar que la matriz de función de transferencia puede ser obtenida analíticamente mediante la transformada de Laplace del sistema de ecuaciones diferenciales linealizadas, las funciones de transferencia relacionando una entrada con una salida pueden ser obtenidas directamente de un bond graph de un sistema lineal invariante en el tiempo con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Esto puede ser obtenido por medio de la regla de lazos originalmente presentada por Shannon en 1941 y redescubierta por Mason en 1955 [Mason, 1956]. La regla de lazo aplica a diagramas de señales de flujo, sin embargo, como Brown [Brown, 1992] mostro, esta puede ser aplicada directamente a un bond graph sin necesidad de convertir un bond graph a diagrama de señales de flujo.

Primeramente para poder aplicar la regla de lazo de Mason, deben identificarse los lazos en un bond graph. Existen dos tipos de lazos: los lazos planos asociados con las trayectorias causales entre los elementos pasivos de puerto-1 y los lazos abiertos, asociados con los lazos causales. De acuerdo con el tratado de estos lazos, Brown provee una serie de reglas en términos de bond graph.

- Los lazos planos son tocados unos entre ellos sí y solo si sus trayectorias causales correspondientes tienen en común una unión-0 o unión-1. Si la trayectoria causal entre dos elementos pasivos de puerto-1 comparte una unión con otra posible trayectoria causal, entonces sus lazos de señal correspondientes se tocan uno al otro.
- Los dos lazos abiertos de orientación contraria de una trayectoria causal cerrada se tocan uno al otro si la malla incluye una o varios fragmentos de las mallas.
- Los lazos abiertos de dos diferentes mallas se tocan uno al otro si ambos tienen una unión en común localizada en un fragmento de malla de una de las dos mallas.
- Dos lazos de señal son tocadas una a la otra, si sus trayectorias causales tienen en común un elemento pasivo puerto-1.

Por medio de dos ejemplos y las reglas anteriores se mostrara el procedimiento para adquirir la función de transferencia de un sistema a partir de un bond graph.

Ejemplo 1: Bond Graph con una Estructura tipo árbol.

Como ejemplo de un bond graph con estructura de tipo árbol, considérese el modelo de un motor de corriente directa (CD) en bond graph mostrado en la Figura 2.20.

En este modelo, I_a representa la inductancia y R_a la resistencia de la armadura. El símbolo k_m representa la constante de torque. En la parte mecánica, J_m es el momento de inercia y r_m el coeficiente de fricción. La fuente de esfuerzo representa un momento. Debido a que el bond graph es de estructura tipo árbol, no existen lazos en los bonds y por lo tanto no hay señales de lazo abierto. Sin embargo, existen tres trayectorias causales resaltadas por medio de líneas delgadas adicionales, una entre la inercia mecánica y la inductancia, y otra entre la resistencia eléctrica y el inductor, y un tercero entre el resistor mecánico y la inercia donde la segunda y tercer trayectoria no se tocan.

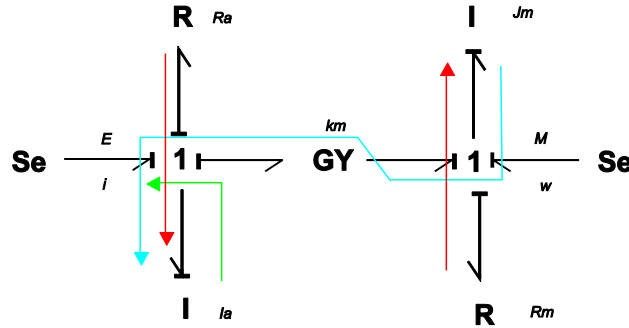


Figura 2.20 Motor de CD en bond graph.

La ganancia asociada a los lazos planos son $-k_m^2/(s^2 J_m I_a)$, $-R_a/(s I_a)$ y $-r_m/(s J_m)$. Por lo tanto, el determinante resulta,

$$\Delta = 1 + \frac{k_m^2}{s^2 J_m I_a} + \frac{R_a}{s I_a} + \frac{r_m}{s J_m} + \frac{R_a r_m}{s I_a s J_m} \quad (2.13)$$

Si se quiere determinar la función de transferencia entre el voltaje de entrada u_a y la corriente de armadura i_a , entonces el camino de señal entre los nodos de esas variables en el correspondiente diagrama de señal de flujo está asociado con la trayectoria causal entre la fuente de voltaje y la inductancia. Este es el único camino de señal entre las dos variables, debido a esto, su ganancia de trayecto, es igual a $-1/(s I_a)$. Ya que el lazo entre la resistencia eléctrica y la inductancia y el lazo que se encuentra pasando el girador cruza otro lazo por lo que estos son dejados fuera de cálculos para el determinante reducido Δ_1 .

$$\Delta_1 = 1 + \frac{r_m}{s J_m} \quad (2.14)$$

De acuerdo con la regla de lazo de Mason, la función de transferencia resultante es,

$$\frac{G_1 \Delta_1}{\Delta} = \frac{r_m + s J_m}{R_a r_m + k_m^2 + (J_m R_a + I_a r_m)s + s^2 J_m I_a} \quad (2.15)$$

Ejemplo 2: Bond Graph con un Lazo causal

Como segundo ejemplo se considera el bond graph observado en la Figura 2.21. Este bond graph involucra dos lazos abiertos junto con un lazo con fragmentos de malla. Los dos lazos de señal en orientación contraria recorren a través de los bonds 1-2-3-4-5-6. Su ganancia de lazo es $1/(sCsI)$. Adicionalmente, el bond graph tiene los lazos planos listados en la Tabla 2.4. Los tres lazos se tocan entre ellos.

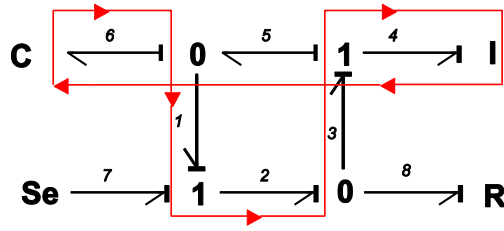


Figura 2.21 Bond graph con lazos abiertos.

Tabla 2.4 Lazos planos y sus ganancias de lazo

Lazo de señal	Trayectoria causal	Ganancia de lazo
1	6-5-4	$-\frac{1}{sCsI}$
2	6-1-2-3-4	$-\frac{1}{sCsI}$
3	6-1-2-8	$-\frac{1}{sCR}$

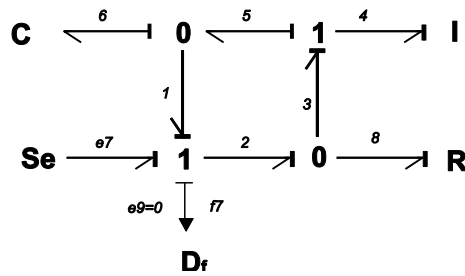


Figura 2.22 Bond graph de la Figura 2.21 con un detector D_f sensando la salida f_7 .

En la expresión del determinante, la ganancia de los primeros dos lazos planos se cancela con la ganancia de los lazos abiertos. Por lo tanto el determinante queda de la siguiente manera,

$$\Delta = 1 + \frac{1}{sCR} \quad (2.16)$$

Entre la entrada e_7 y la salida f_7 , existen dos trayectorias de señal recorriendo junto con las trayectorias causales 7-2-8 y 7-2-3-4. Un detector de flujo D_f resalta la localización de la variable de salida f_7 y ayuda a identificar la trayectoria de señal entre la entrada y la salida (Figura 2.22).

La ganancia de trayectoria es $1/R$ o $1/(sI)$. La primera trayectoria no es tocada por el lazo de señal número 1. La segunda trayectoria es tocada por todos los lazos de señal. Por lo tanto, se obtiene la siguiente función de transferencia.

$$\frac{\ell f_7}{\ell e_7} = \frac{1}{\Delta} \left[\frac{1}{R} \left(1 - \left(-\frac{1}{sCsI} \right) \right) + \frac{1}{sI} (1 - 0) \right] \quad (2.17)$$

En caso de un modelo que no sea estructuralmente controlable o no estructuralmente observable, la regla de lazo de Mason resulta una función de transferencia con un denominador de grado reducido debido a la cancelación de cero nulo por un polo nulo.

2.7. Conclusiones

En este capítulo, ha sido abordada una metodología gráfica que permiten realizar el modelado de diferentes sistemas físicos.

Se puede destacar como características principales de la metodología, lo siguiente:

- Para construir el bond graph, un análisis de transferencia de potencia (representada por las semi-flechas), los fenómenos de disipación y almacenamiento de energía, así como un análisis causal son necesarios para realizar el modelo. La escritura de las ecuaciones no intervienen en esta etapa.
- En presencia de elementos dependientes (2 elementos inductivos en serie o 2 capacitivos en paralelo), en el modelado en bond graph, una causalidad derivativa aparece sobre uno de los dos

elementos, lo cual necesitará de un tratamiento numérico particular al momento de simular el sistema.

- A partir del modelo en bond graph (al igual que con otras metodologías gráficas), la función de transferencia puede ser encontrada directamente.
- El modelo bond graph permite una visualización de la transferencia de la potencia.
- Se pueden representar sistemas de dimensiones grandes, con la utilización de bloques que agrupan modelos, a cada bloque se le puede conocer como un submodelo, o los multibonds puede ser utilizados para tal fin.

Capítulo 3

3. Modelado del aerogenerador

3.1. Introducción

En el presente capítulo son abordados los diferentes modelos propuestos del aerogenerador. En un principio, se presenta el modelado clásico de un aerogenerador, así como un primer modelo propuesto. En una segunda etapa, se exponen los principios de la levitación magnética y su manejo en términos de la metodología bond graph. Finalmente, se presenta el modelo propuesto de la turbina de levitación magnética.

3.2. Modelado tradicional del aerogenerador

El principio de conversión aerodinámica en una turbina eólica está ampliamente descrita en la literatura, por citar algunas referencias se tiene [Ackermann, 2005], [Handsen y Michalke, 2007] y [Manwell et al. 2002]. La función principal de una turbina eólica, es la de transformar la energía cinética que proporciona el viento en energía eléctrica. Para lo anterior, es común utilizar la expresión (3.1), la cual hace referencia a la potencia total que puede ser extraída de una turbina eólica.

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (3.1)$$

De la expresión (3.1), P_t representa la potencia mecánica generada por el viento expresada en Watts, R es el radio de las palas de la turbina (expresado en metros), λ es la velocidad específica, ρ es la densidad del aire (Kg/m³), β es el ángulo de orientación de las palas (°), v es la velocidad del viento (m/s) y C_p es el coeficiente de potencia.

La velocidad específica λ es la relación que existe entre la velocidad del viento y la velocidad angular de la turbina, este es un parámetro adimensional y se representa como,

$$\lambda = \frac{R\omega}{v} \quad (3.2)$$

donde ω representa la velocidad angular de la turbina eólica.

Por otra parte, el coeficiente de potencia C_p , está relacionado directamente con las propiedades aerodinámicas de las palas, y depende directamente de la relación entre la velocidad específica y el ángulo de orientación de las palas. Dicho coeficiente representa la potencia que puede ser capturada por la turbina, y su valor se encuentra limitado a un factor de 16/27, el cual es conocido como el límite de Bentz [Muyeen et al. 2009].

El límite de Bentz indica que la máxima potencia que puede ser extraída de la energía cinemática es del 59%. La Figura 3.1 muestra la curva típica de respuesta que se obtiene de la relación de la velocidad específica y el coeficiente de potencia en una turbina eólica.

Como el valor del coeficiente de potencia C_p disminuye, mientras el ángulo de orientación de las palas aumenta, la energía cinética de la turbina se reduce también. El C_p puede ser calculado de acuerdo a la expresión (3.3) [Marín, 2009].

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.18 \left(\frac{90}{0.4 + 0.5\lambda} - 6.8 - 0.11\beta^2 \right) e^{\left(0.16 - \frac{8}{0.4 + 0.5\lambda} \right)} \quad (3.3)$$

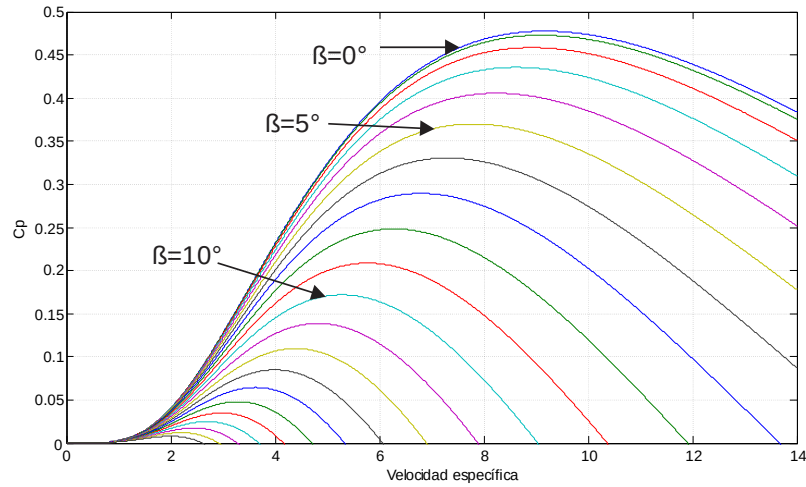


Figura 3.1 Evolución de C_p en función de λ y β

Por otra parte, debido a la relación (3.1) que expresa la potencia que puede ser extraída de un aerogenerador y a las relaciones de la velocidad específica y del ángulo de orientación de las palas, se puede observar que en el sistema se encuentran involucradas diferentes áreas de la ingeniería, tal es el caso de la aeronáutica, mecánica, eléctrica, etc...

Para realizar el estudio de un aerogenerador, el modelo puede ser desarrollado de diferentes formas. Considerando la complejidad del modelo, en la literatura se pueden encontrar diferentes modelos, tales como:

- Modelo de una sola masa [Tamura et al. 2001], [Tapia et al. 2001], en el cual se considera toda la masa de la turbina en una sola inercia.
- Modelo de dos masas [Petru y Thiringer, 2002], [Akhmatov y Knudsen, 1999], donde una masa corresponde a la parte de las palas y la otra a la inercia del generador. Ambas inercias están unidas por resortes y amortiguadores, los cuales modelan la flecha de transmisión y/o la caja de engranes.
- Modelo de seis masas, tal como el que es presentado en [Muyeen et al. 2007], en donde los autores concluyen que el modelo es adecuado para el análisis transitorio del sistema.

En esta sección, el modelado del aerogenerador considerando el modelo de una sola masa es presentado a continuación.

El modelo de una sola masa, considera que la masa de la turbina, la caja de engranes y la masa del generador son representados por un solo momento de inercia J (Figura 3.2).

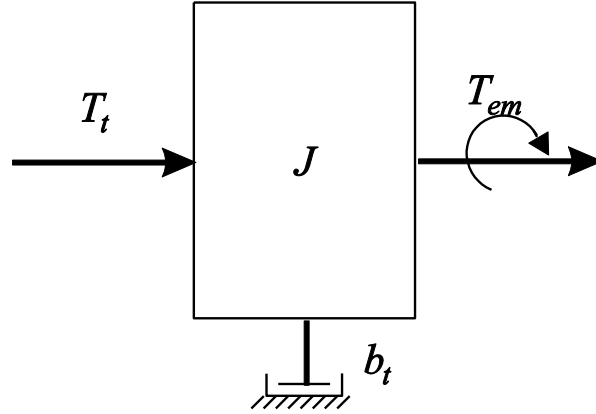


Figura 3.2 Representación de la turbina con una masa

Despreciando las pérdidas mecánicas por fricción, es decir $b_t=0$, entonces la ecuación que representa al sistema está dada por la expresión (3.4).

$$T_t - T_{em} = J \frac{d\omega_t}{dt} \quad (3.4)$$

donde, T_t representa el torque aerodinámico de la turbina (N.m), T_{em} es el torque electromagnético del generador (N.m), J es la inercia de la turbina y el generador ($\text{Kg} \cdot \text{m}^2$) y ω_t la velocidad angular de la turbina.

El torque T_t y la potencia de la turbina P_t se consideran limitados por la velocidad angular de la turbina, entonces la expresión (3.5) muestra esta relación.

$$T_t = \frac{P_t}{\omega_t} \quad (3.5)$$

Sustituyendo la expresión (3.5) en (3.1), se obtiene,

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\omega_t} v^3 \quad (3.6)$$

Si de la relación de la velocidad específica (3.2), se considerada la velocidad angular de la turbina en (3.6), entonces la representación del torque del aerogenerador estará dada por,

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} v^2 \quad (3.7)$$

Para obtener una representación gráfica del modelo, los diagramas de bloques pueden ser utilizados (ver Figura 3.3). En la Figura 3.3, el parámetro S representa el área de impacto del viento en la superficie creada por las Palas ($S=\pi R^2$).

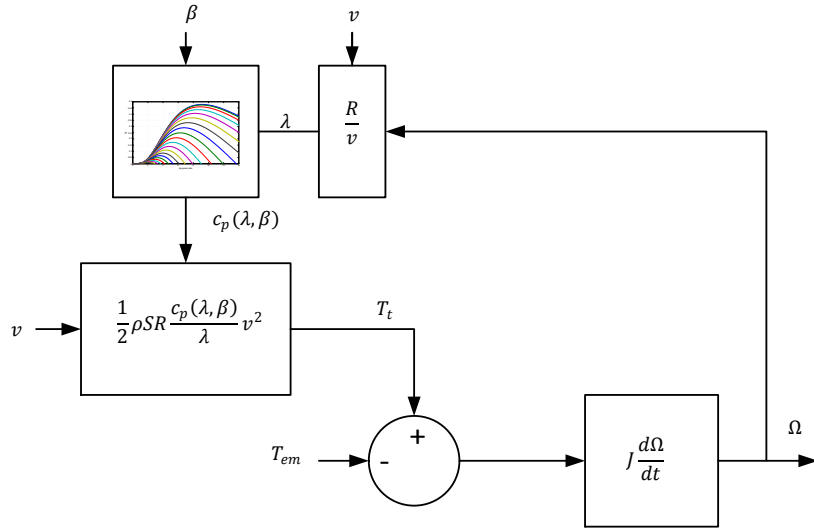


Figura 3.3 Diagrama de bloques del modelo aerodinámico de una masa

En las siguientes secciones, se presenta el modelado de la turbina eólica en bond graph.

3.3. Modelado en bond graph del aerogenerador

En la presente sección son presentados tres modelos diferentes del aerogenerador, el modelo que considera una sola masa, el modelo de dos masas y un modelo adicional que permite el análisis de vibraciones. Los conceptos básicos del modelado en bond graph ya han sido descritos en el capítulo 2, aquí serán únicamente mencionados algunos conceptos esenciales para el desarrollo del modelo.

3.3.1. Modelo del aerogenerador considerando una sola masa

Para la obtención del modelo de una sola masa, son tomadas en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Un elemento debe representar la relación de conversión de la velocidad del viento en torque aerodinámico.
2. La relación de la caja de engranes debe estar presente en el modelo.
3. La inercia totalizada debe representar la velocidad angular generada por la incidencia de la velocidad del viento.

Tomando en cuenta estas tres características, el bond graph de la Figura 3.4 representa el modelo del aerogenerador de una sola masa.

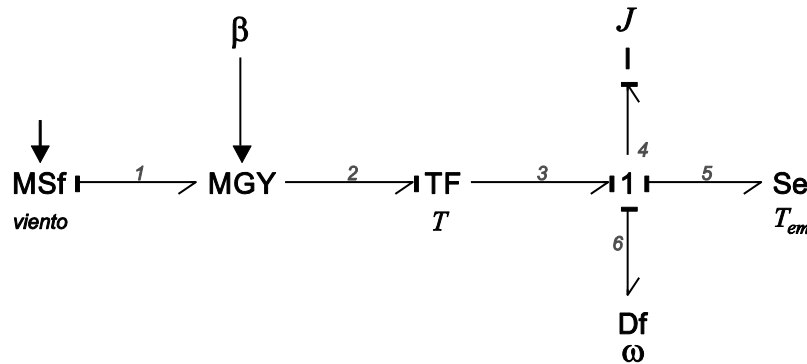


Figura 3.4 Modelo bond graph del aerogenerador de una sola masa

El modelo de la Figura 3.4 se desarrolló de la siguiente manera:

Para la primera etapa, se considera un elemento conocido como girador modulado MGY . Dicho elemento, permite realizar el cambio de variables y/o el acoplamiento de diferentes dominios de la física. El hecho de utilizar un girador modulado está justificado debido a lo mencionado anteriormente, ya que de una parte se tiene como entrada la velocidad del viento (variable de flujo) representada como una fuente de flujo modulada MSf y la salida que se espera obtener es un par o torque aerodinámico (variable de esfuerzo) que esté relacionado con dicha entrada. Adicionalmente a este hecho, el uso de la modulación del girador permite representar gráficamente la variable β que está relacionada con el ángulo de orientación de las palas.

El elemento MGY permite implementar en su relación constitutiva el comportamiento o característica del coeficiente de potencia, es decir que la relación constitutiva tradicional (Tabla 2.3) del elemento es modificada para poder introducir las relaciones (3.1) y (3.3) descritas en la sección anterior.

La consideración de la caja de engranes del aerogenerador está representada por el transformador TF colocado entre los bonds 2 y 3 (ver Figura 3.4). El uso de un transformador permite considerar la relación de transformación (entre la velocidad lenta y la velocidad rápida) de manera ideal, sin tener en cuenta consideraciones de pérdida de transferencia de potencia, desgaste y oscilaciones en la caja de engranes.

Finalmente, el elemento $I:J$ representa la inercia totalizada referida al generador, la cual es representativa del modelo de una masa.

Adicionalmente, en la unión 1 (mismo flujo) se encuentra los bonds 5 y 6, los cuales representan el par electromagnético ($Se:T_{em}$) y el sensor de la velocidad (Df). Es importante mencionar que el sentido de la semiflecha en el bond 5 llega hacia el elemento, lo que indica que el par que entrega es negativo, es decir, sigue siendo una fuente no un elemento que disipa potencia.

Nota: Es importante hacer notar que el uso de un transformador seguido de un girador o viceversa, no es común en la teoría de modelado en bond graph, debido al hecho de que la relación de transformación en uno de los dos elementos puede ser considerada o incluida dentro del otro. Sin embargo, el modelo se presenta de esta manera, para diferenciar ambas etapas y además debido a que el girador modulado tiene una relación constitutiva que no es lineal, en comparación con el transformador.

Matemáticamente, el modelo del bond graph de la Figura 3.4, está constituido por las siguientes relaciones:

$$e_4 = r * T * f_1 \quad (3.8)$$

donde f_1 y e_4 corresponden a la velocidad del viento y al par mecánico, respectivamente. T representa la relación de transformación del transformador, siendo $T = 92.6$ y r es la relación constitutiva del girador modulado, la cual está dada por la relación (3.9).

$$r = 0.5 \frac{C_p}{\lambda} \rho S \quad (3.9)$$

donde el valor de C_p es calculado con (3.3) y la velocidad específica con la relación (3.2).

El par mecánico de (3.8) está dado por $e_4=e_3-e_5$, o lo que es lo mismo $T=T_r-T_{em}$.

3.3.2. Modelo del aerogenerador considerando dos masas

Para desarrollar el modelo de dos masas, es decir, una masa inercial para representar la turbina y otra más que represente la masa inercial del generador, el esquema de la Figura 3.5 es considerado.

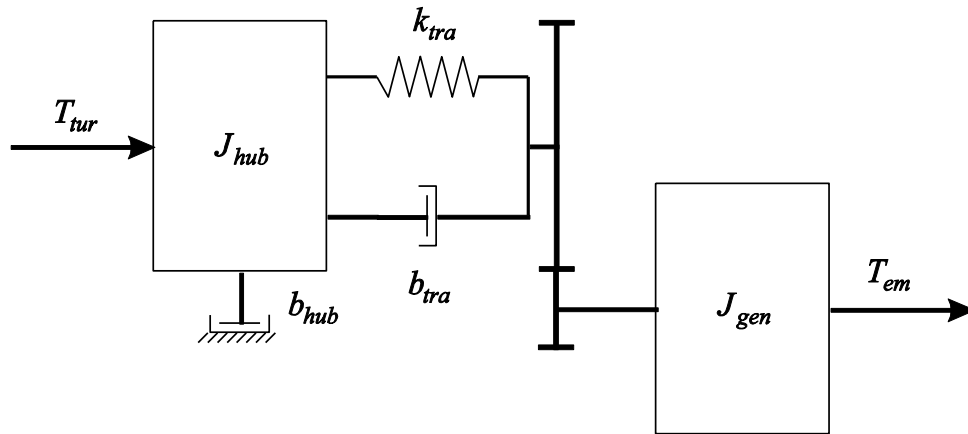


Figura 3.5 Esquema del aerogenerador de dos masas

Como se puede apreciar, además de las dos masas inerciales, el diagrama de la Figura 3.5 toma en cuenta la representación no rígida de la unión de la masa de la turbina, con la caja de engranes.

La Figura 3.6 muestra el modelo bond graph del aerogenerador considerando dos masa.

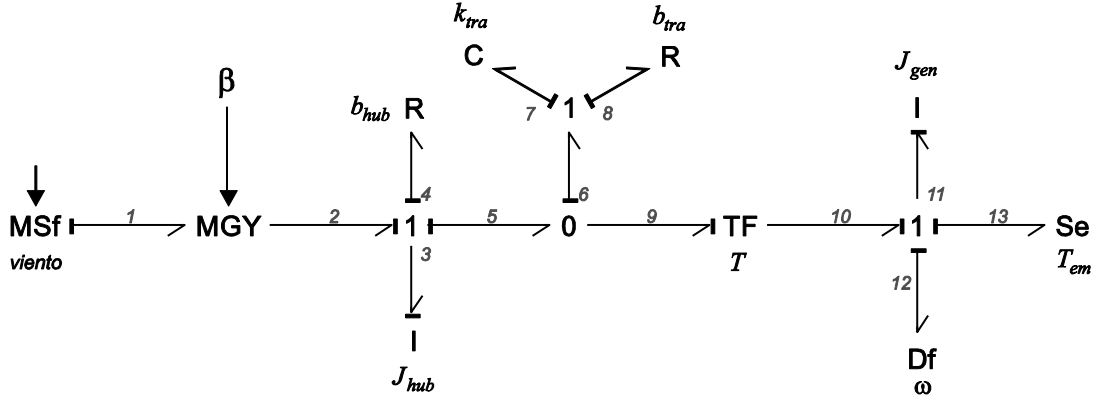


Figura 3.6 Bond graph de la turbina eólica de dos masas

Es importante notar que los elementos adicionados en comparación con el modelo de una masa, corresponden a la masa de la turbina y su fricción ($I; J_{hub}$ y $R; b_{hub}$, respectivamente), así como también el resorte y amortiguador ($C; k_{tra}$ y $R; b_{tra}$, respectivamente), mientras que el resto de los elementos coinciden con el modelo de una masa presentado anteriormente.

La representación en variables de estado del bond graph de la Figura 3.6 es la siguiente,

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_3 \\ \dot{q}_7 \\ \dot{p}_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b_{hub} + b_{tra}}{J_{hub}} & -k_{tra} & \frac{b_{tra}}{J_{gen}T} \\ \frac{1}{J_{hub}} & 0 & -\frac{1}{J_{gen}T} \\ \frac{b_{tra}}{J_{hub}T} & \frac{k_{tra}}{T} & -\frac{b_{tra} + b_{gen}}{J_{gen}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_3 \\ q_7 \\ p_{11} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} MSf \quad (3.10)$$

$$[f_{11}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{J_{gen}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_3 \\ q_7 \\ p_{11} \end{bmatrix}$$

Donde las variables p_3 , p_{11} y q_7 corresponden a las variables generalizadas del momento angular de la inercia de la turbina, del generador y al desplazamiento generalizado del resorte de la transmisión, respectivamente. MSf representa la velocidad del viento como entrada del sistema y como salida se tiene definida la variable f_{11} , que representa la velocidad angular del generador.

En la representación de estados (3.10) se puede apreciar la relación existente entre el amortiguador de la transmisión b_{tra} y las dos inercias que representan el modelo. Dicha relación puede ser observada directamente en el bond graph de la Figura 3.6 con la ayuda de las trayectorias causales.

Es importante resaltar que el modelo en variables de estado (3.10) es obtenido directamente del bond graph de la Figura 3.6 utilizando el procedimiento descrito en la sección 2.6.2.

La simulación y control del modelo de dos masas serán presentados en el capítulo 4.

3.3.3. Modelo del aerogenerador para análisis de vibraciones

Como se mencionó en el capítulo 1, un modelo estructural en bond graph de una pala es propuesto en [Agarwal et al. 2012], el cual considera la pala como un haz Rayleigh compuesto de un número de secciones sometidas a fuerzas aerodinámicas. Dicho modelo toma en cuenta la teoría del momento del elemento de la pala para su desarrollo y análisis.

En esta sección, se consideró el modelo propuesto en [Agarwal et al. 2012], con la intención de añadirlo al modelo de la turbina de dos masas y así, obtener un modelo el cual permita realizar un estudio de sus dinámicas.

Tomando en cuenta lo anterior se obtiene el modelo en bond graph de una pala, considerando que la pala se encuentra constituida por dos secciones, y además de que la pala es modelada como un sistema que contiene parámetros distribuidos gobernados por ecuaciones diferenciales parciales que son agrupados en una aproximación finita.

El modelo de la pala es obtenido considerando su estructura y aerodinámica.

Para el modelado de la estructura de la pala, son tomados en cuenta los elementos de campo C y campo R (multibonds) que forman parte de la teoría de bond graph. Dichos campos permiten representar la rigidez y el amortiguamiento estructural entre los centros de gravedad de los elementos adyacentes. La Figura 3.7 muestra el esquema de una viga suspendida, la cual es dividida en dos secciones, considerando una masa y longitud para cada sección.

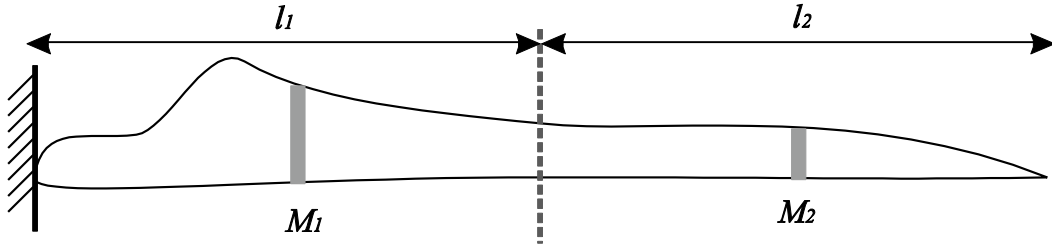


Figura 3.7 Representación de la pala

Se formula el modelo en bond graph considerando la estructura de la pala mostrada en la Figura 3.7. La Figura 3.8 muestra el modelo en bond graph, en el cual se pueden apreciar los ejes que representan el movimiento traslacional y rotacional en la parte superior e inferior respectivamente.

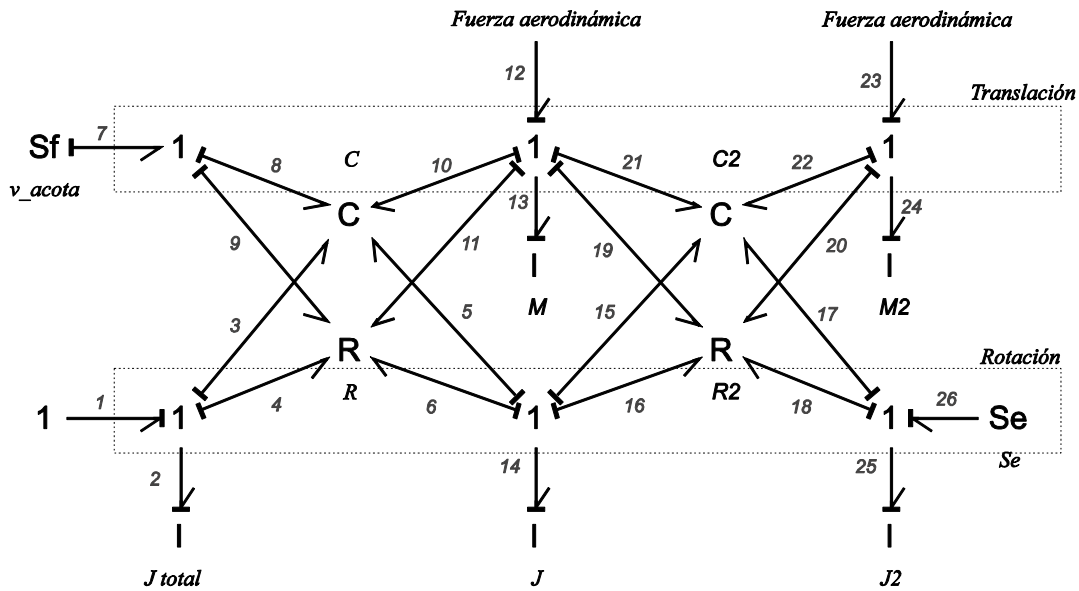


Figura 3.8 Bond graph de la estructura de una pala

Como se aprecia en el bond graph de la Figura 3.8, la fuerza aerodinámica debe ser aplicada en cada una de las secciones de la pala (bonds 12 y 13), es decir, que el esfuerzo debe ser aplicado en dichos bonds.

La matriz de rigidez es modelada con el elemento C de 4 puertos, esto debido a los cuatro desplazamientos generalizados mostrados en la Figura 3.8. En términos de la rigidez (EI) y de la longitud (l), la matriz es expresada como,

$$[K_i] = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

donde E es el módulo de Young del material, I es el segundo momento de área sobre el eje de deflexión, y l es la longitud de la sección.

La matriz de amortiguamiento estructural (elemento R de 4 puertos) está dada por la relación $[R_i] = \mu[K_i]$, donde el factor μ representa el coeficiente de amortiguamiento estructural.

Las condiciones de acotamiento del modelo están representadas con las fuentes Sf y Se . La conexión entre la pala y el buje es considerada rígida y sin movimiento $Sf=0$, y se considera que la pala tiene un solo grado de libertad $Se=0$. Finalmente, la inercia J_{total} representa la inercia total de la pala.

El modelo de la pala puede ser representado utilizando subsistemas, como lo muestra la Figura 3.9. Es importante notar que la inercia J_{total} presenta una causalidad derivativa, debido a que la velocidad angular está dada en el bond 1. Esto significa que el modelo de la pala presenta como salida un par, entonces como consecuencia, la velocidad angular debe ser una entrada. El bond 1 permite realizar la conexión de la pala con el buje de la turbina.

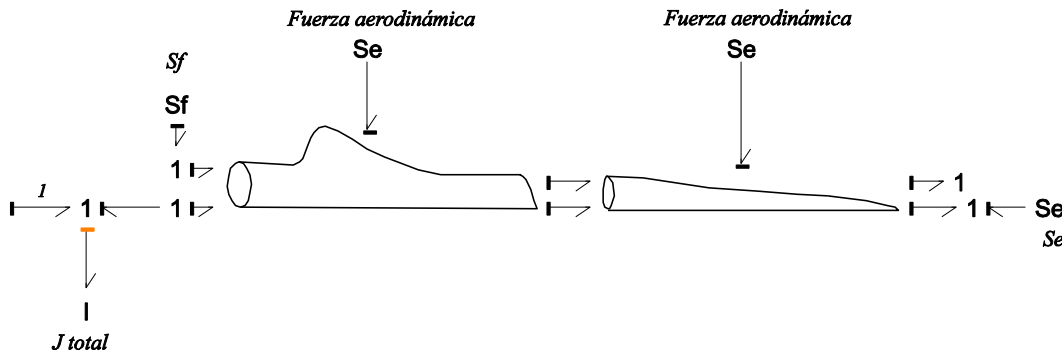


Figura 3.9 Modelo bond graph de la pala considerando dos secciones

Las dos fuentes de esfuerzo representan la fuerza aerodinámica aplicada en la estructura.

Es importante mencionar que el modelo de la estructura de la pala, permite realizar un análisis de las dinámicas involucradas en cada uno de los modos de la estructura, como fue realizado en [Sánchez y Medina, 2014]. De hecho, el modelo de la estructura de la pala que se presenta en este capítulo es tomado de esa referencia.

Para realizar el análisis de los modos presentes en la pala, es necesario realizar el cálculo de las dinámicas involucradas en los lazos causales que se forman entre los elementos dinámicos (campo C e inercias y masas) y las elementos disipativos (campo R) presentes en la Figura 3.8. De esta forma, la Figura 3.10 muestra el mismo bond graph, pero destacando los lazos causales involucrados en el modelo, considerando únicamente los lazos que se encuentran presentes entre las inercias y las masas que representan la estructura. Las dinámicas relacionadas entre los elementos de la matriz de rigidez y las inercias y masas (camino causal), a diferencia del trabajo considerado como referencia, son también consideradas y calculadas en esta tesis, obteniendo así el conjunto completo de las dinámicas o frecuencias naturales de la estructura de la pala.

Para obtener las dinámicas, es necesario conocer los valores de la rigidez, inercias, masas y amortiguamientos de la estructura. La pala considerada [Tapia et al. 2001], es una pala de 23.4 metros y sus parámetros estructurales son mostrados en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Parámetros estructurales de la pala

Sección 1	Sección 2
$E=1.7e10$	$E=1.7e10$
$l=11.7m$	$l=11.7m$
$M=1208Kg$	$M_2=487Kg$
$J=3.3Kg.m^2$	$J_2=2.33Kg.m^2$
$\mu=0.01$	$\mu=0.01$
$J_{total}=1000Kg.m^2$	

Los lazos y trayectorias causales son resaltados en la Figura 3.10.

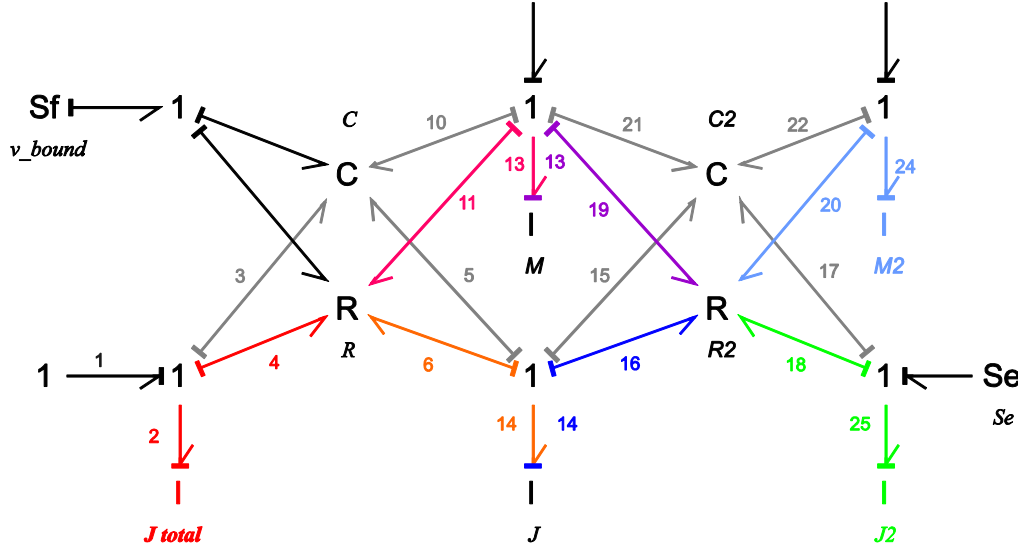


Figura 3.10 Lazos causales en la estructura de la pala

Tomando en cuenta la Figura 3.10 y los valores de la Tabla 3-1, la estimación de las dinámicas de la estructura son calculadas con la ganancia de cada lazo o trayectoria [Mason, 1956]. En el capítulo 2, se presentó un ejemplo del cálculo de la función de transferencia considerando los lazos y trayectorias causales.

La Tabla 3-2 muestra los valores de los lazos y trayectorias causales de la pala.

Tabla 3-2 Frecuencias de los lazos y trayectorias causales de la pala

Lazo causal	2→4→4→2	14→6→6→14	14→16→16→14	25→18→18→25	13→11→11→13	13→19→19→13	24→20→20→24
Frecuencia rad/s	120.88	36632.99	54245	76827.7	8.77	12.99	32.22
Trayectoria causal	2→3	14→5	13→10	14→15	13→21	25→17	24→22
Frecuencia rad/s	690832.95	39685.33	224807.75	39685.33	224807.86	9873.15	482100.3

Con los valores de las frecuencias mostradas en la Tabla 3-2, se puede observar que las dinámicas rápidas se encuentran presentes en los lazos causales que corresponden al último tramo de la pala (sección 2), esto debido a que presentan valores más pequeños en comparación con las de los lazos causales formados en la primera sección. En específico, se puede observar que la menor frecuencia se encuentra presente en la sección central de la pala, en el lazo causal 13→11→11→13.

Por otra parte, los valores de las dinámicas de las trayectorias causales representan frecuencias o dinámicas de oscilación, debido a que es la interacción que se tiene entre dos elementos dinámicos (masas y rigidez). Para el caso de la pala se puede observar que los valores de frecuencia que presenta son muy elevados en comparación con los que se tienen para los lazos causales, esto es debido a que no se tienen elementos disipativos que se encuentren involucrados en dicho lazo. De lo anterior se puede concluir que las frecuencias (rad/s) que se tienen en los trazos causales no representan un impacto tan considerable en comparación con los lazos causales. Sin embargo se puede observar también el mismo fenómeno, debido a que las frecuencias más rápidas se hacen más notorias en la misma segunda sección de la pala.

El modelo de la pala es adicionado al modelo del aerogenerador de dos masas, presentado anteriormente. La Figura 3.11 muestra el modelo en bond graph que considera la estructura de las palas.

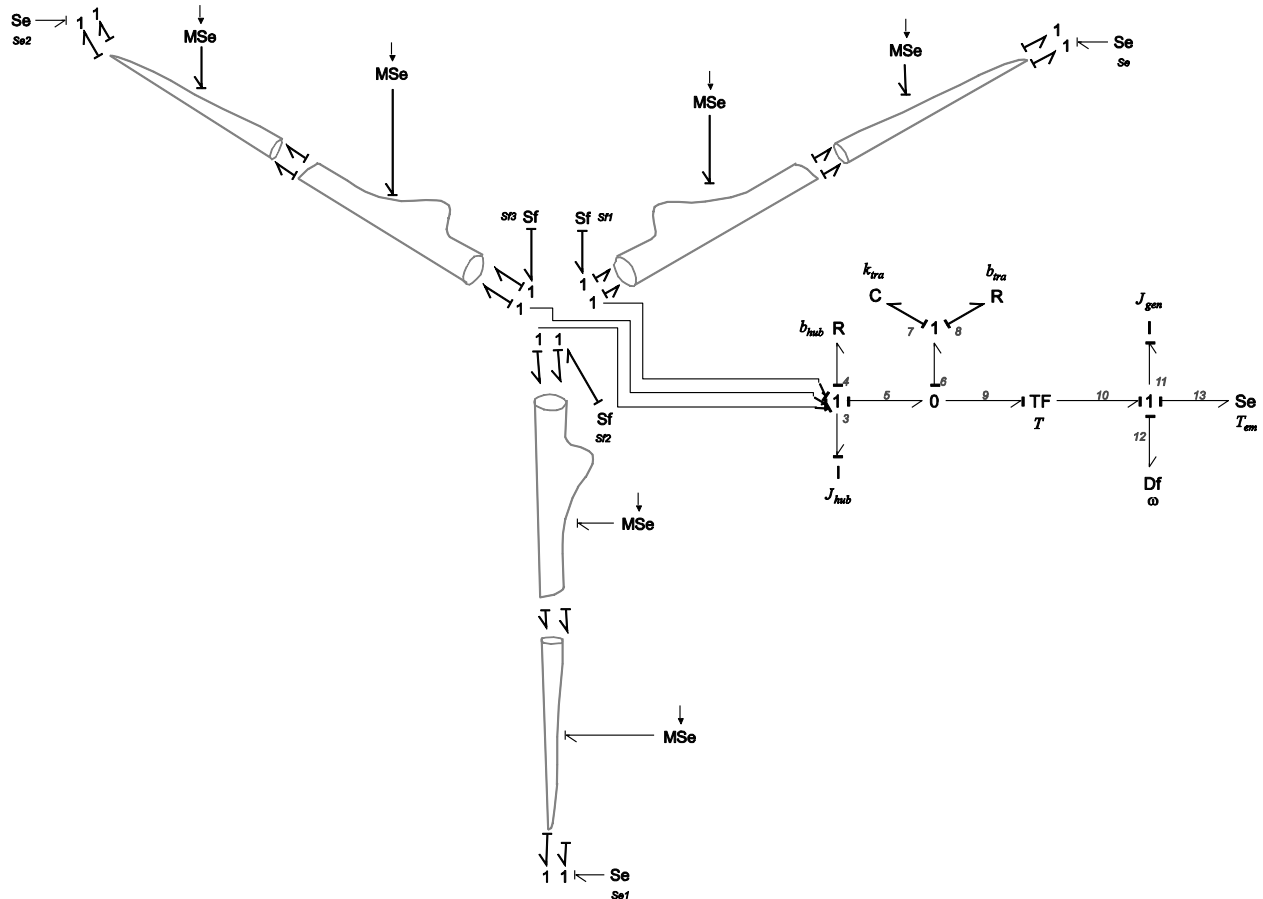


Figura 3.11 Modelo del aerogenerador considerando la estructura de las palas

En el modelo de la Figura 3.11, las fuentes originales Se (Figura 3.9) son remplazadas por fuentes MSe debido a que estas deben de variar su magnitud en función del viento incidente.

Es importante hacer notar que para este modelo es necesario introducir la fuerza aerodinámica incidente en la estructura de la pala como entrada, a diferencia de los modelos presentados anteriormente, donde la velocidad del viento era la entrada.

Para poder realizar la conversión de la velocidad del viento en fuerza aerodinámica se tiene que aplicar la teoría conocida como *Blade Element Momentum theory* (BEM), la cual es explicada a detalle en [Moriarty y Hasen, 2005].

En el capítulo 4, se mostraran los resultados de las simulaciones de este modelo.

3.4. Principios de la levitación magnética

Como fue descrito en el capítulo introductorio, la levitación magnética es un fenómeno en el cual un objeto es suspendido por campos magnéticos. La fuerza magnética producida es usada para contrarrestar el efector de la fuerza gravitacional, lo cual levanta el objeto.

El efecto de la levitación ha sido aplicado en diferentes campos de estudio y aplicación. En específico, en esta sección se aborda el campo de aplicación de los rodamientos magnéticos (magnetic bearings).

Los rodamientos magnéticos permiten sostener gracias al efecto de la levitación magnética partes móviles sin necesidad de tener un contacto físico por ejemplo flecha. Además, permiten una rotación del eje con una muy baja fricción y sin desgaste mecánico.

Existen dos tipos principales de rodamientos: los rodamientos magnéticos pasivos y los activos. Como su nombre lo indica, los pasivos utilizan imanes permanentes para realizar el proceso de la levitación, mientras que los activos funcionan en base al principio de suspensión magnética y consisten de un conjunto de electroimanes, una serie de amplificadores, un controlador, y un sensor de posición.

Los rodamientos magnéticos han comenzado a representar una importancia relevante en su uso en lo que a maquinas eléctricas rotativas se refiere. En la literatura pueden ser encontrados diferentes estudios

de este dispositivo [Bleuler et al. 2005], [Bassani, 2006]. Su principio se basa en el uso de un electro imán, una serie de amplificadores y su control para hacer levitar el rotor de la máquina, Dicho dispositivo es utilizado en varias posiciones a lo largo del rotor para lograr levitarlo y también son colocados en diferentes ejes de referencia.

3.5. Levitación magnética en bond graph

En términos del modelado de bond graph, trabajos previos sobre el uso de los rodamientos magnéticos han sido previamente desarrollados. En específico en el presente trabajo es considerado el modelo presentado en [Das et al. 2005], considerando un pequeño cambio en su orientación en un bond.

Considerando el diagrama esquemático de la Figura 3.12, se formula el bond graph.

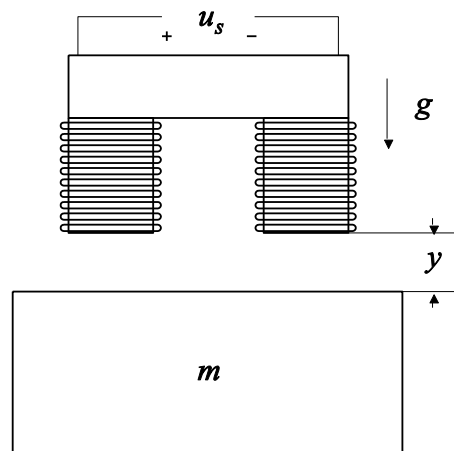


Figura 3.12 Circuito esquemático de la levitación magnética

Como el circuito esquemático lo muestra, se tienen cuatro partes fundamentales que deben componer al sistema. Primero, se cuenta con un electroimán el cual es alimentado con una fuente de voltaje v_s , que produce una corriente que circula por el embobinado que contiene un cierto número de vueltas N . El objeto a levitar está representado por la masa m , y el desplazamiento o distancia está representada por la variable y .

Para formular el bond graph se realiza de la misma forma cómo se realizó con los modelos anteriores. Se tiene que tomar en cuenta un elemento por cada uno de los representados en el esquema. De esta manera el bond graph de la

Figura 3.13 muestra el sistema de levitación magnética.

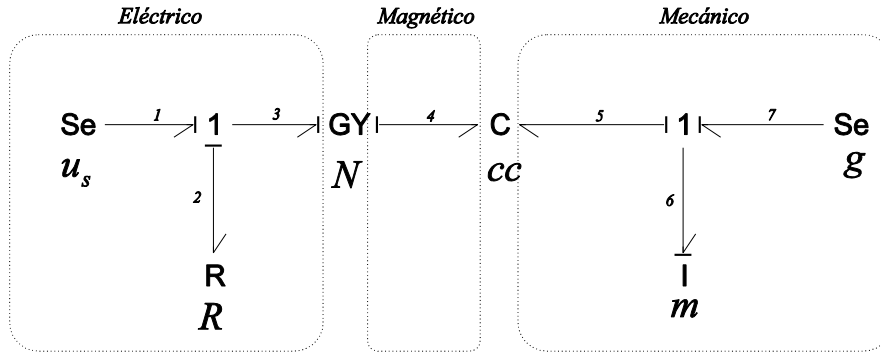


Figura 3.13 Bond graph del levitador magnético de la Figura 3.12

Como puede apreciarse en la Figura 3.13, se resaltan los tres dominios involucrados (eléctrico, magnético y mecánico). Para el dominio eléctrico, se tienen involucrados los bonds 1, 2 y 3, por medio de los cuales se encuentra conectados en serie la fuente de voltaje ($Se:u_s$) y una resistencia (R) que representa la resistencia de la bobina. El girador (GY) permite realizar la interacción entre el dominio eléctrico y magnético, y en su interior la relación constitutiva representa el número de vueltas de la bobina (N), transformando así la energía eléctrica en energía magnética. Continuando con el modelo, se encuentra un elemento C multipuerto, el cual modela la interacción magneto-mecánica, debido a que la fuerza magnetomotriz que es aplicada en el elemento se transforma en fuerza mecánica.

El elemento capacitivo C multipuerto se encuentra constituido por las siguientes relaciones constitutivas.

$$M = \frac{2y\phi}{\mu_0 A}$$

$$F = \frac{\phi^2}{\mu_0 A}$$
(3.12)

donde M representa la fuerza magneto-motriz, F es el fuerza mecánica, y representa la distancia entre los elementos, ϕ es el flujo magnético, μ_0 es la densidad del aire y A representa el área de contacto.

La fuerza magneto-motriz y la fuerza mecánica producida se encuentran representadas por los esfuerzos en los bonds 4 y 5, respectivamente como lo muestra la Figura 3.14.

$$\begin{array}{c} e_4 = \frac{2y\phi}{\mu_0 A} \\ \hline \phi \\ \hline \end{array} \rightarrow \text{C} \leftarrow \begin{array}{c} e_5 = \frac{\phi^2}{\mu_0 A} \\ \hline y \\ \hline \end{array}$$

Figura 3.14 Elemento C multipuerto para la transformación magneto-mecánica

En el bond graph de la Figura 3.14 el bond correspondiente a e_5 se encuentra cambiado de dirección con respecto al modelo original presentado en [Das et al. 2005], permitiendo así que la expresión de e_5 no presente el signo negativo original.

Finalmente, para la parte mecánica se tiene el elemento $I:m$ que representa la masa del objeto a levitar, así como una fuente $Se:g$, que representa la fuerza de gravedad ejercida sobre el objeto.

3.6. Modelo del aerogenerador de levitación magnética en bond graph

El modelo del aerogenerador de levitación magnética se desarrolla tomando en cuenta el modelo para el análisis de vibraciones expuesto en el apartado 3.3.3 y el de la levitación magnética de la sección 3.5.

La levitación magnética es aplicada en el rotor de la transmisión del aerogenerador. Así, el objetivo es levitar tanto el rotor de la turbina (parte mecánica de baja velocidad) y el rotor del generador (parte mecánica de velocidad alta). Ambos rotores se encuentran conectadas o relacionadas por medio de la caja de engranes. La Figura 3.15 muestra el diagrama esquemático de la levitación de ambos rotores.

Como se puede apreciar en la Figura 3.15, la levitación considerada para ambos rotores se realiza en un solo eje de desplazamiento, es decir, que el desplazamiento que se tiene en el eje paralelo al rotor es considerado despreciable debido a que el modelo solo toma en cuenta un grado de libertad.

Para la formulación del modelo en bond graph de las flechas de transmisión, dos modelos distintos pueden ser vislumbrados. Por una parte la estructura del rotor puede ser modelada de la misma manera en cómo se modelo la estructura de las palas, y por otra parte el modelo puede considerar la relación roto-traslacional del sistema mecánico. Ambos modelos son expuestos en las siguientes subsecciones.

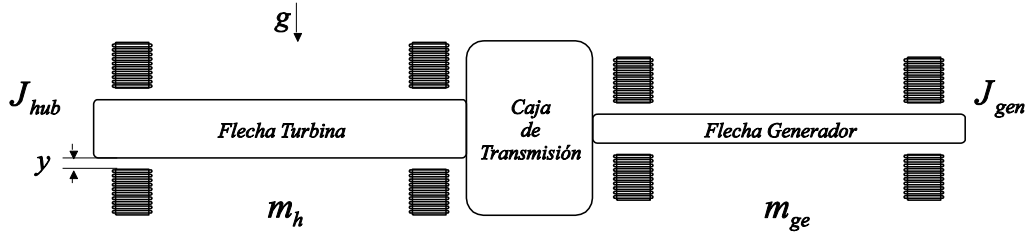


Figura 3.15 Diagrama esquemático de la levitación de la transmisión de la turbina eólica

3.6.1. Modelo estructural de la transmisión

El modelo estructural de los rotores de la transmisión mecánica es realizado considerando que el rotor de la turbina y del generador, pueden ser divididos en dos secciones cada una. Dichas secciones, al igual cómo se realizó con el modelo de la pala, se encuentran constituidas considerando el centro de la estructura como su centro de masa.

La Figura 3.16 muestra el bond graph estructural de la transmisión de la turbina eólica sin tomar en cuenta los electroimanes necesarios para la levitación magnética de la misma.

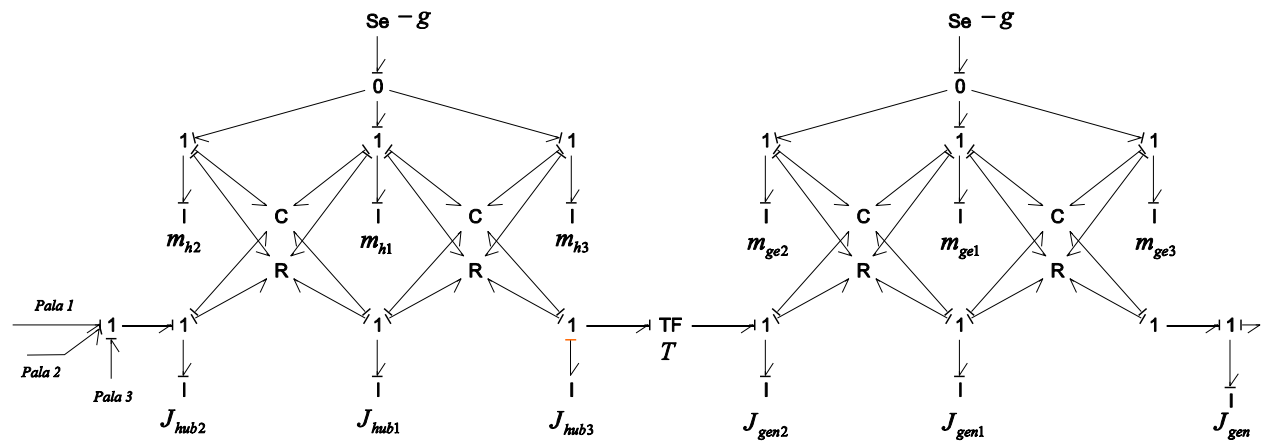


Figura 3.16 Modelo estructural de la transmisión mecánica del aerogenerador

De la Figura 3.16 se pueden apreciar como el rotor de la turbina y el generador se encuentran unidos por medio de la caja de engranes (TF), en lo que se refiere a la parte rotacional del sistema de transmisión. La parte traslacional sin embargo, no se encuentra unida debido a que las dos masas no tienen

una unión directa que representaría la conversión entre sus diferentes pesos, como lo es en la parte rotacional (relación de transformación de la caja de engranes).

Se puede además distinguir en la parte superior dos fuentes de esfuerzo Se , las cuales representan la fuerza de la gravedad que actúa sobre las rotor de la transmisión. Las masas: m_{h1} , m_{h2} y m_{h3} corresponden a las masas del rotor de la turbina, mientras que las masas: m_{ge1} , m_{ge2} y m_{ge3} a las de la flecha del generador; ambas representan la masa total de sus respectivas rotores.

De la misma manera en como las masas de los rotores se encuentran distribuidas, las inercias correspondientes a la turbina (J_{hub}) y al generador (J_{gen}) son divididas en las tres inercias que representan las dos secciones de cada rotor.

La adición de los electroimanes en la estructura de la transmisión se realiza teniendo en cuenta que un par de electroimanes son colocados en los costados de cada una de los rotores de la transmisión. Así, en las masas en los costados y centro del modelo de la Figura 3.16 deben de adicionarse los módulos de levitación magnética (Figura 3.13). De esta manera, la estructura de los rotores es levitada por los costados de la misma. La Figura 3.17 muestra el bond graph del rotor del aerogenerador (rotor de la turbina) levitado magnéticamente. Para el rotor del generador se tiene un modelo similar.

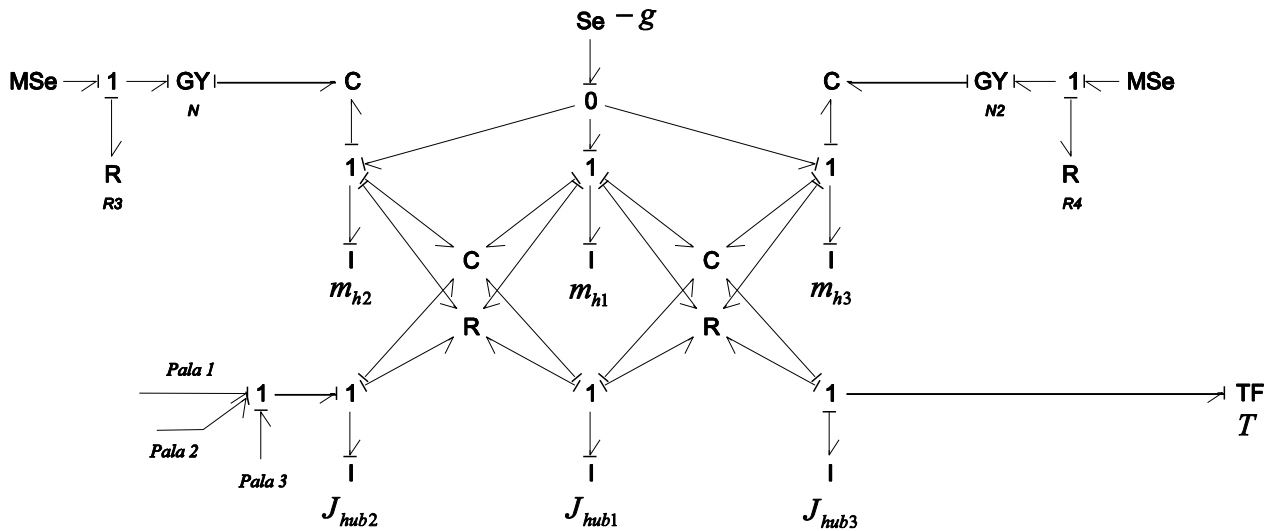


Figura 3.17 Modelo del rotor levitado magnéticamente

3.6.2. Modelo roto-traslacional de la transmisión

La relación roto-traslacional puede verse como un sistema de una polea, en el cual una masas se encuentra unida a un eje que rota, desplazando la masa hacia arriba o abajo, dependiendo de sentido del giro. La relación roto-traslacional desde el punto de vista de un modelo en bond graph se encuentra representado en la Figura 3.18 [Das et al. 2005].

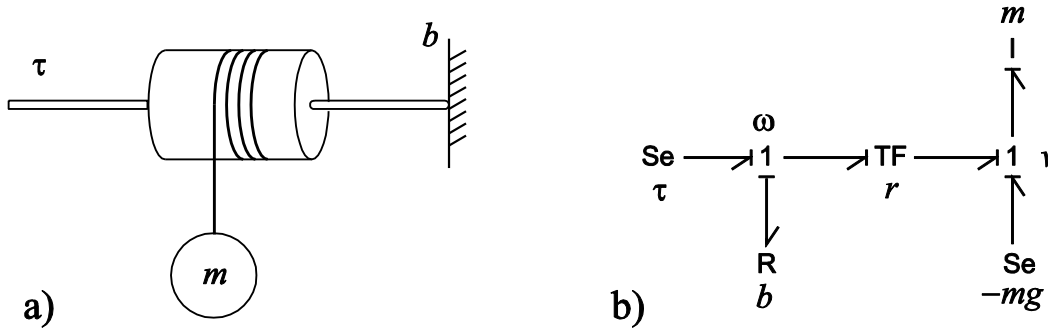


Figura 3.18 Conexión roto-traslacional para un sistema mecánico – a) Esquemático – b) Bond graph

En la Figura 3.18 a se tiene el diagrama esquemático de una polea y en la Figura 3.18 b su correspondiente modelo en bond graph. Se puede observar como en el modelo en bond graph se tiene tanto la velocidad angular ω , así como la velocidad lineal v del sistema mecánico, ambas se encuentran relacionadas por medio de un transformador que tiene una relación de transformación r , correspondiente al valor de la inercia del rotor.

3.6.3. Modelo de la turbina de levitación magnética considerando la estructura de la transmisión

Considerando lo expuesto anteriormente, la turbina de levitación magnética puede ser formulada considerando la estructura de las flechas en la transmisión o utilizando la relación roto-traslacional. En la presente tesis se opta por la utilización de la estructura de la flecha, debido a que se tiene una representación (desde el punto de vista gráfico) más clara del sistema mecánico traslacional y rotacional.

Así, la Figura 3.19 muestra el modelo del aerogenerador levitado magnéticamente, en el cual se puede observar una similitud con el modelo presentado en la Figura 3.11, la diferencia entre ambos modelos radica en la consideración de la flecha de transmisión como una estructura.

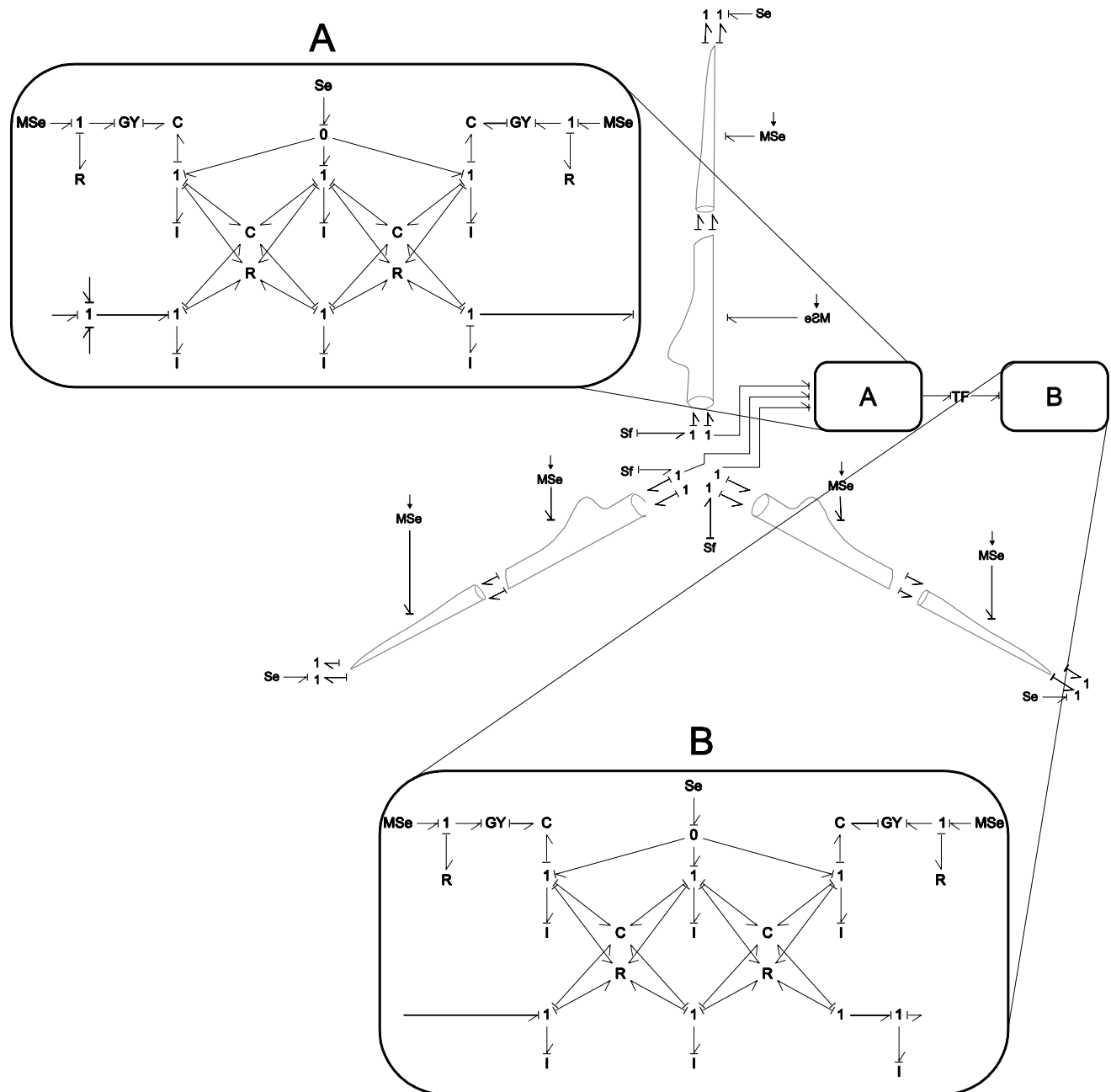


Figura 3.19 Bond graph de una turbina eólica levitada magnéticamente, A) se muestra el rotor de la parte mecánica y B) resalta el rotor del generador.

En el modelo de la Figura 3.19 , se resalta la etapa de la levitación magnética, donde el bloque A muestra el modelo del rotor perteneciente a la parte mecánica y B el rotor del generador. Ambos rotores se encuentran unidos por medio de la caja de engranes, que es representada por el transformador TF. La consideración de la levitación magnética se realiza con la unión directamente de dicha etapa, en el modelo

para el análisis de vibraciones presentado anteriormente, es decir, que los bloques A y B ya cuentan con el módulo de la levitación magnética incluida en su sección traslacional de cada una de las flechas.

Es importante hacer notar que para la parte de la levitación magnética, es considerada únicamente un solo electroimán, el cual sostiene o levita el rotor de la turbina. Sin embargo, si una implementación práctica o una mejor aproximación del sistema es requerida, los dos grados de libertad en los ejes que se encuentra centrado el rotor, deben de ser considerados.

La simulación del modelo es presentada en el siguiente capítulo.

3.7. Conclusiones

En el presente capítulo fue expuesto el desarrollo y concepción del modelo de la turbina eólica de levitación magnética.

En específico, el desarrollo del modelo se presentó partiendo de un modelo básico de un aerogenerador, el cual se fue completando con más elementos, con el fin de llegar a la formulación del modelo propuesto en la presente tesis. Así, se presentaron 4 diferentes modelos de un aerogenerador.

La descripción matemática de los diferentes modelos fue descrita, por medio de diferentes representaciones, para el modelo de una sola masa se utilizó un procedimiento tradicional para su obtención. En el modelo de dos masas, la representación en variables de estado del modelo fue realizada y se realizó un análisis de las dinámicas involucradas en la estructura de las palas por medio del concepto de lazos y trayectorias causales.

En el presente capítulo se presentó también el modelo que describe o permite modelar a un rodamiento magnético.

Capítulo 4

4. Control y Simulación

4.1. Introducción

En el presente capítulo, se detallan las leyes de control de los modelos expuestos en el capítulo 3. La inversión gráfica de los modelos es utilizada como técnica para desarrollar las leyes de control necesarias en el aerogenerador de levitación magnética. Se presentan casos de estudio considerando diferentes perfiles de viento, un perfil constante y variable.

4.2. Control inverso por medio de inversión gráfica del bond graph

La ley de control obtenida del bond graph inverso [Ngwompo et al. 1996] se calcula utilizando el concepto de bicausalidad [Gawthrop, 1995].

El concepto de causalidad convencional en bond graph indica que en cada trazo el esfuerzo es impuesto de un lado, y como consecuencia el flujo se encuentra impuesto del otro costado.

La causalidad en un trazo bicausal puede ser impuesta independientemente para el esfuerzo y para el flujo en el extremo de cada bond. La Figura 4.1 muestra la relación causal y bicausal en un bond.

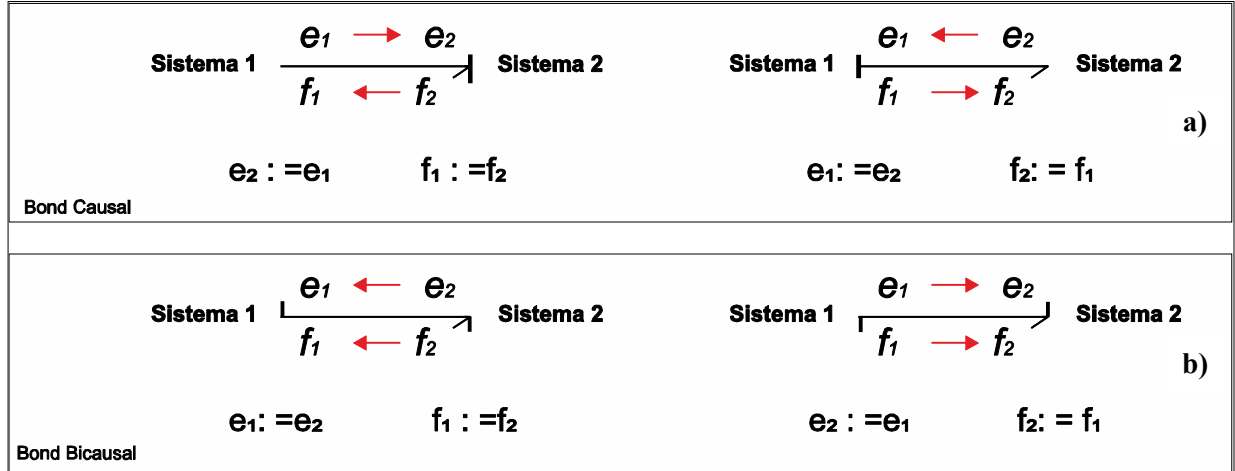


Figura 4.1 a) Relaciones causales, b) relaciones bicausales en un bond graph

En la Figura 4.1 a) se observa las relaciones que se encuentran presentes en un bond graph causal, por otra parte en Figura 4.1 b) se muestra las relaciones existentes en un bond graph bicausal, cabe mencionar que el flujo en un bond bicausal es siempre colocado del lado que corresponde a la semi-flecha y el esfuerzo en la parte que no tiene la semi-flecha.

Para construir el modelo inverso, los detectores se convierten en fuentes de flujo y esfuerzo, según sea el caso, y las fuentes se convierten en detectores; en la Figura 4.2 se muestra la bicausalidad aplicada a los detectores y fuentes.

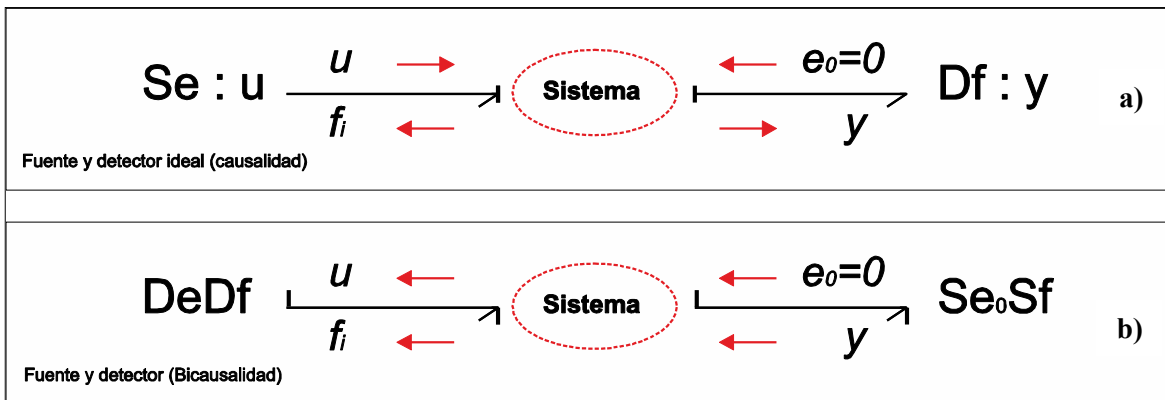


Figura 4.2 Bicausalidad en los a) detectores y b) fuentes.

En la Figura 4.2 a) se aprecia un sistema con entrada-salida convencional, es decir, la fuente como entrada y el detector como salida, por otra parte la Figura 4.2 b) muestra el sistema invertido, donde, la fuente se encuentra como salida y el detector como entrada.

$S_{e0}S_f$ es una fuente de esfuerzo nulo-fuente de flujo, y D_eD_f es un detector de flujo-detector de esfuerzo.

Procedimientos de análisis gráficos, permiten determinar si el modelo bond graph es invertible. El problema de invertibilidad podría presentarse en el caso donde existan varias entradas y varias salidas [Ngwompo et al. 1996].

En todo caso, es siempre invertible para el caso de un sistema de una sola entrada y una sola salida (SISO por sus siglas en inglés).

4.2.1. Formulación del bond graph inverso para la obtención de la ley de control

Para obtener el bond graph inverso, es necesario seguir las siguientes etapas:

- 1) Elegir la variable del sistema a controlar (p. ej. corriente eléctrica), y colocar un detector (Df_{is}) en el bond graph normal, que se cambiara por una fuente de entrada en el bond graph inverso (p. ej. Se_0Sf_i).
- 2) Comenzar a dibujar los bonds bicausales hasta el elemento o fuente que se quiere utilizar como control (p. ej. $DeDf_0$), siguiendo el camino de la potencia en los trazos (condición necesaria).
- 3) Realizar la propagación de la causalidad en los otros elementos considerando las reglas de asignación de la causalidad

Ejemplo

Considerando el ejemplo de un circuito RL conectado entre dos fuentes de voltaje alterno (ver Figura 4.3a) para la transferencia de energía entre las dos fuentes. Primeramente y antes de aplicar los pasos del procedimiento 4.2.1, es necesario obtener su modelo en bond graph. La Figura 4.3b1 muestra el bond graph del circuito eléctrico.

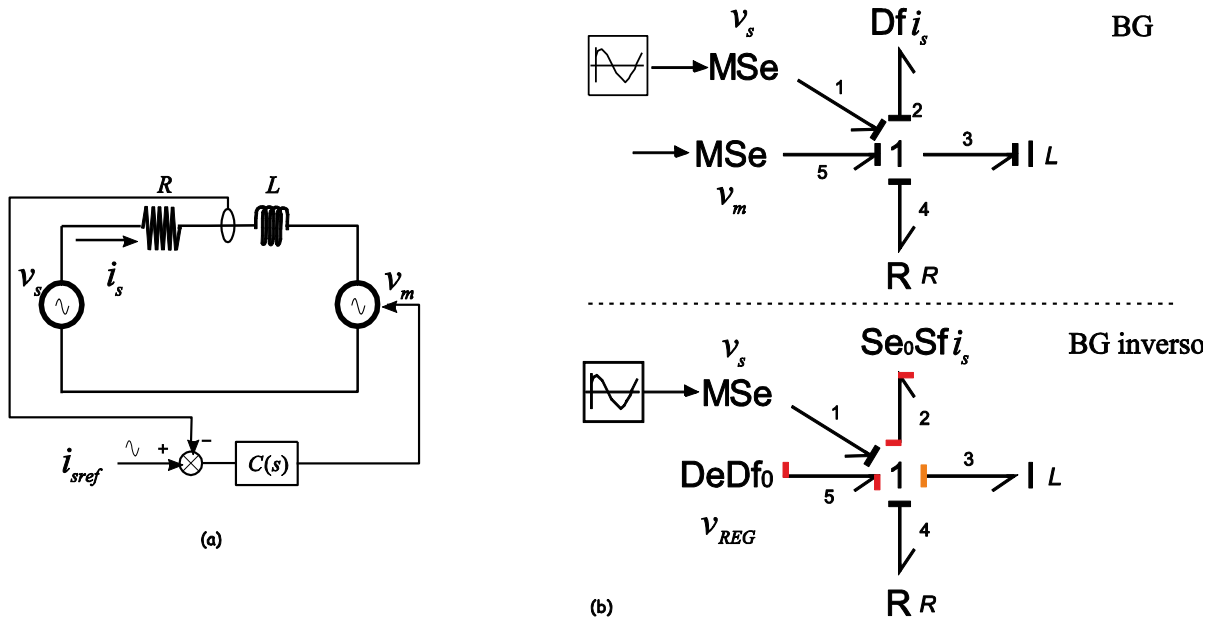


Figura 4.3 Control de corriente en un circuito RL, a) circuito eléctrico, b) Bond graph inverso.

Al aplicar el procedimiento, se obtienen los siguientes resultados en cada paso:

- Para el paso 1.- La variable elegida a controlar es la corriente i_s del circuito, la cual equivale al flujo en la unión 1, entonces el detector Dfi_s representa la medición de dicha variable. Este detector es cambiado por la fuente de flujo Se_0Sfi_s , lo cual está representado en la Figura 4.3b2.
- Para el paso 2.- La propagación de los bonds bicausales es realizada a través de los bonds 2 y 5 hasta llegar al detector $DeDf_0$, el cual originalmente era una fuente de esfuerzo modulada.
- Para el paso 3.- La asignación de la causalidad en los bonds 1, 3 y 4 es realizada.

Del bond graph inverso de la Figura 4.3b, las ecuaciones de la ley de control en lazo abierto son obtenidas,

$$e_5 = e_4 + e_3 + e_2 - e_1$$

$$v_{REG} = v_R + v_L + e_2 - v_s$$

Como $e_2 = 0$ (sensor ideal), se tiene:

$$v_{REG} = Ri_s + L \frac{di_s}{dt} - v_s \quad (4.1)$$

Para formular una ley de control en lazo cerrado, se impone la dinámica del error $\varepsilon = (i_{sref} - i_s)$, escribiendo $\dot{\varepsilon} + k\varepsilon = 0$, donde k representa la dinámica del regulador elegida. De esta manera, si se reemplaza i_s por $i_{sref} - \varepsilon$ en (4.1) la expresión de la ley de control es:

$$v_{REG} = R(i_{sref} - \varepsilon) + L \frac{di_{sref}}{dt} - L \frac{d\varepsilon}{dt} - v_s = R(i_{sref} - \varepsilon) + L \frac{di_{sref}}{dt} + Lk\varepsilon - v_s$$

Así,

$$v_{REG} = Ri_s + L \frac{di_{sref}}{dt} + Lk(i_{sref} - i_s) - v_s \quad (4.2)$$

En esta ley de control se encuentra una acción de control proporcional (k) en el trayecto directo, y una acción derivativa sobre la referencia, las cuales deben ser elegidas a conveniencia. En el caso de una consigna sinusoidal esta acción es insuficiente para asegurar la igualdad entre i_s y i_{sref} . En este ejemplo en específico, se elige un corrector de tipo resonante [Sato et al. 1998], [Guillaud et al. 1999], el cual garantiza un seguimiento perfecto de la referencia en régimen permanente.

$$C(s) = \frac{n_0 + n_1s + n_2s^2}{s^2 + \omega_n^2} \quad (4.3)$$

donde s corresponde al operador de Laplace. Si se sustituye (4.3) en (4.2) se tiene:

$$v_{REG(s)} = Ri_{s(s)} + LC(s)(i_{sref(s)} - i_{s(s)}) - v_{s(s)} \quad (4.4)$$

De esta manera, de la expresión (4.4) se muestra en la Figura 4.4 el esquema a bloques en lazo cerrado de la ley de control.

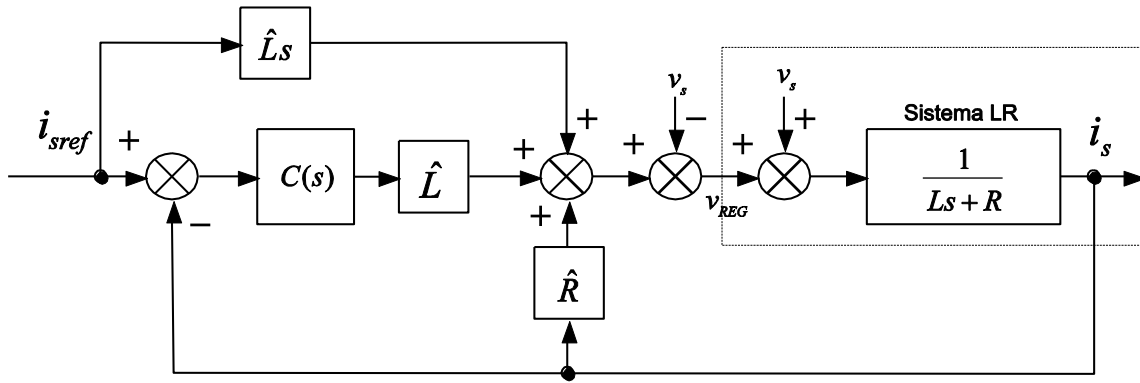


Figura 4.4 Esquema a bloques de la ley de control obtenida del bond graph inverso.

Del esquema de la Figura 4.4, $\hat{L}$ y $\hat{R}$ corresponden a los parámetros de la ley de control, los cuales son una aproximación de los del sistema (L y R). La función de transferencia en lazo cerrado está dada por:

$$\frac{i_s}{i_{sref}} = \frac{\frac{\hat{L}C(s) + \hat{L}s}{Ls + R}}{1 + \frac{\hat{L}C(s)}{Ls + R} - \frac{\hat{R}}{Ls + R}} = \frac{\hat{L}C(s) + \hat{L}s}{Ls + R + \hat{L}C(s) - \hat{R}}$$

Si los valores estimados coinciden perfectamente a los reales ($\hat{L} = L$ y $\hat{R} = R$), se tiene:

$$\frac{i_s}{i_{sref}} = \frac{\hat{L}C(s) + \hat{L}s}{Ls + \hat{L}C(s)} = 1 \quad (4.5)$$

De (4.5) se verifica que la referencia es seguida perfectamente, si los valores son estimados perfectamente.

Nota: En la expresión de control (4.2) se observa que aparece una acción derivativa, esto es a consecuencia de la utilización del verdadero modelo inverso utilizado para su obtención. En la práctica, las acciones derivativas sobre la referencia no son comúnmente utilizadas, debido a que introducen ruido al sistema. Normalmente, la implementación de una acción derivada se realiza utilizando un filtro.

4.3. Control del modelo básico del aerogenerador

El control desarrollado en esta subsección, corresponde al control del modelo del aerogenerador de una masa, explicado en la sección 3.3.1. La Figura 4.5 muestra el bond graph obtenido para la consideración de una sola masa totalizada del aerogenerador mostrado en el capítulo anterior.

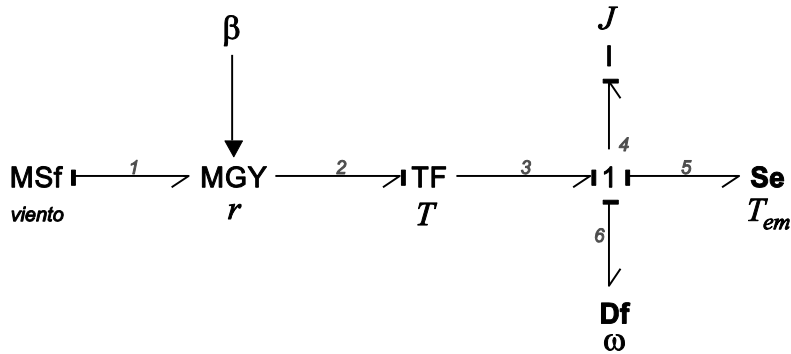


Figura 4.5 Modelo bond graph de la turbina eólica considerando una sola masa

El concepto de la inversión del modelo es aplicada al bond graph de la Figura 4.5. Como en la turbina eólica se tiene que implementar un control sobre la velocidad angular, el detector Df que corresponde al bond 6, debe ser invertido, es decir cambiado por una fuente de flujo con un esfuerzo cero, y la propagación de los bonds bicausales debe de realizarse hacia la fuente del par electromagnético $Se:T_{em}$, la cual se remplazara por un detector de esfuerzo y flujo en el bond graph inverso.

Así, la Figura 4.6 muestra el bond graph inverso del aerogenerador de una sola masa.

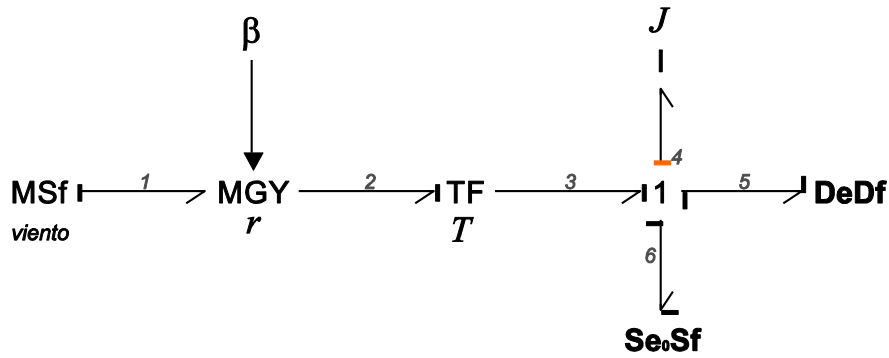


Figura 4.6 Bond graph inverso del aerogenerador de una masa

Como se puede observar, el elemento I que corresponde a la inercia J presenta una causalidad derivativa. Entones de acuerdo al ejemplo presentado anteriormente, las expresiones matemáticas obtenidas del bond graph inverso, permitirán obtener la ley de control en lazo abierto aplicable al sistema. De esta manera, de la Figura 4.6 las expresiones que se obtienen son las siguientes:

La expresión (4.6) representa el balance de energía en la unión 1.

$$e_5 = e_4 - e_3 - e_6 \quad (4.6)$$

donde, $e_3 = Te_2$ y $e_2 = rf_1$, entonces la expresión (4.6) puede expresarse como,

$$e_5 = e_4 - e_6 - rTf_1 \quad (4.7)$$

Usando las variables correspondientes al dominio en cuestión y considerando un detector ideal ($e_6 = 0$), la expresión (4.7) puede escribirse como (4.8).

$$\tau_{ref} = \hat{J} \frac{d\omega}{dt} - rTv \quad (4.8)$$

donde $\hat{J}$ representa un valor estimado del valor de la inercia real. De la misma manera en cómo fue presentado anteriormente, la expresión (4.8) representa el sistema en lazo abierto, entonces es necesario imponer la dinámica del error para formular la ley de control en lazo cerrado. En este caso la dinámica considerada es $\varepsilon = \omega_{ref} - \omega$, por lo tanto la expresión (4.8) se convierte en la expresión (4.9).

$$\tau_{ref} = \hat{J} \frac{d\omega_{ref}}{dt} - \hat{J}k\varepsilon - rTv \quad (4.9)$$

En el dominio de la frecuencia, la ecuación (4.9) es expresada como en (4.10).

$$\tau_{ref} = \hat{J}s + C(s)(\omega_{ref} - \omega) - rTv \quad (4.10)$$

Eligiendo un corrector de tipo proporcional + integral como controlador ($C(s)$), se obtiene:

$$\tau_{ref} = \hat{J}s + \left(\frac{k_p s + k_i}{s} \right) (\omega_{ref} - \omega) - rTv \quad (4.11)$$

La expresión (4.11) corresponde a la ley de control de la velocidad implementada en el aerogenerador, y su diagrama de bloques es mostrado en la Figura 4.7.

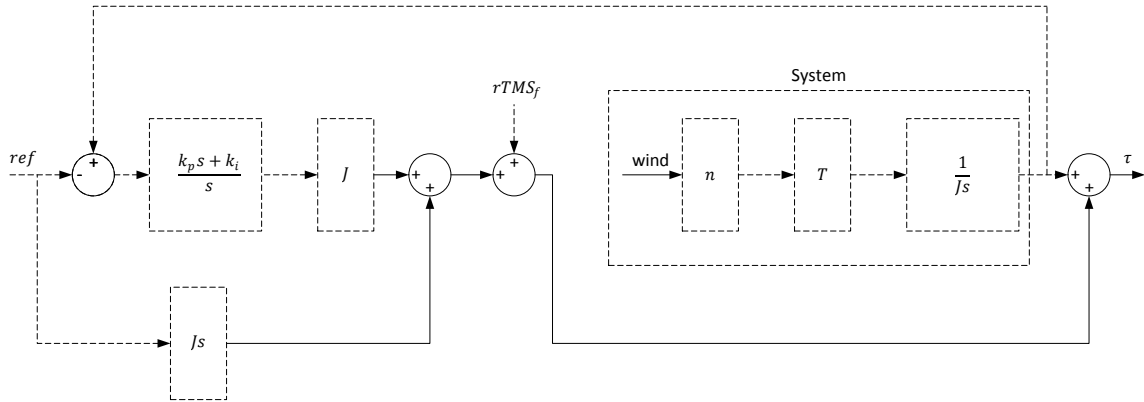


Figura 4.7 Diagrama a bloques del control de la velocidad para el modelo de una masa

El procedimiento para el desarrollo de la ley de control para el ángulo de orientación de las palas es realizado de la misma manera.

Como la velocidad angular es la única variable que debe ser controlada, la inversión del modelo es realizada de esta señal de entrada hacia la variable β del girador modulado. La Figura 4.8 muestra la inversión del modelo.

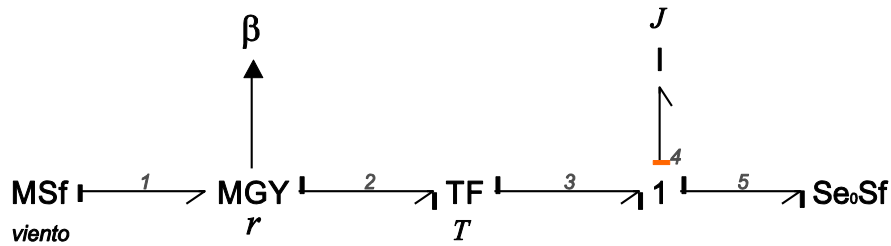


Figura 4.8 Bond graph inverso para el control del ángulo de orientación de las palas

En la obtención de esta ley de control, las siguientes consideraciones son tomadas en cuenta:

- La disipación de la potencia en la inercia no tiene una contribución considerable en la potencia intercambiada entre la parte mecánica y eléctrica.
- El viento puede ser estimado por medio de la velocidad angular y el torque del aerogenerador.

La expresión matemática que representa el modelo del bond graph inverso de la Figura 4.8 es la siguiente,

$$r = \frac{T(e_4 - e_5)}{f_1} \quad (4.12)$$

donde $e_5 = 0$, debido a que la fuente que se encuentra en dicho bond, corresponde a una fuente de flujo con un esfuerzo nulo (Se_0Sf). Considerando las variables originales, la relación (4.12) está dada por,

$$\frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_t}{v^2 0.5 \rho S} \quad (4.13)$$

Para poder obtener el ángulo β utilizando la expresión (4.13), es necesario obtener una relación entre el C_p y β o entre λ y β . La relación que se tiene entre dichos parámetros está representada en la gráfica de la Figura 3.1.

Las relaciones de dichas variables son obtenidas considerando un viento de entrada constante, lo cual permite obtener el valor ya sea del C_p o de λ para un punto dado de la gráfica. Diferentes valores de velocidades de viento son introducidos para obtener las diferentes relaciones del C_p y de λ .

La variación o incremento de la velocidad de viento se realiza de tal manera que se tenga un número considerable de datos que no presenten una pérdida de información considerable (alrededor de

0.18 m/s cada muestra). De esta manera una vez que se obtiene los valores de C_p y λ en relación a β , los valores son introducidos en el modelo por medio de una tabla.

Adicionalmente a las leyes de control de la velocidad y del ángulo de orientación de las palas, expuestas anteriormente (4.12) y (4.12), respectivamente, se puede observar que la velocidad del viento es un parámetro que está presente en ambas estructuras. Entonces, una estimación de la velocidad del viento puede ser realizada utilizando los valores de la velocidad y del torque que se tienen presentes en el aerogenerador.

Para realizar lo anterior, las expresiones (3.2) y (3.7) son utilizadas para encontrar la relación (4.14).

$$\lambda_{est} = 3 \sqrt{\frac{\omega^2 0.5 \rho \pi R^5}{T_t}} \quad (4.14)$$

Entonces, utilizando la relación (4.14), el viento puede ser estimado.

4.3.1. Simulación del aerogenerador de una sola masa

Una simulación es realizada, para verificar el correcto funcionamiento de la ley de control propuesta para el aerogenerador de una sola masa. La Figura 4.9, muestra el diagrama de simulación del modelo.

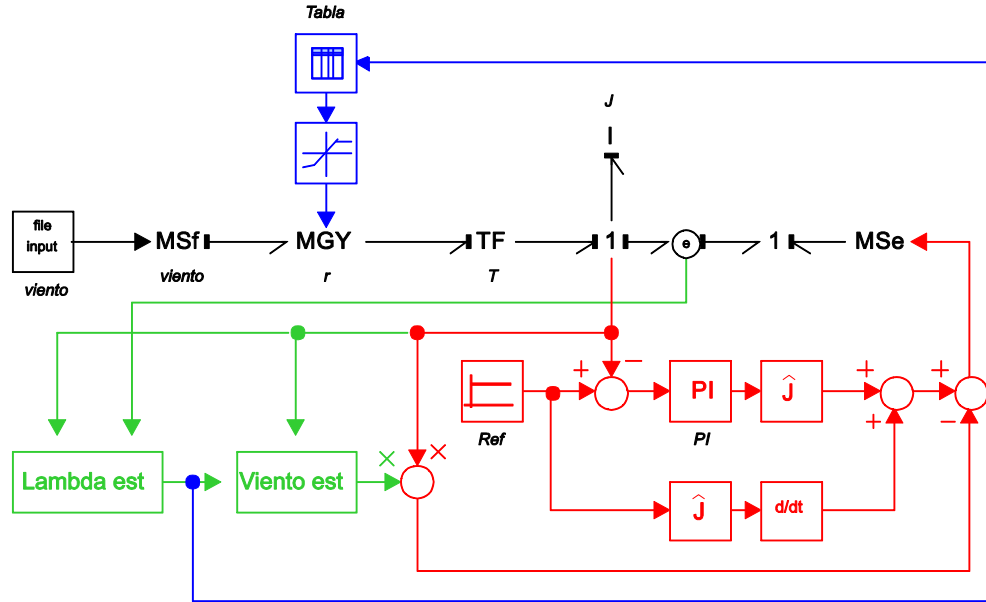


Figura 4.9 Modelo de simulación para el aerogenerador de una masa

Como se puede observar en la Figura 4.9, la ley de control de la velocidad angular está implementada con una acción de control PI (con ganancias k_p y k_i), mientras que para el ángulo de orientación de las palas se tiene como entrada un bloque que corresponde a la tabla obtenida de la relación de C_p y β . Adicionalmente, para el perfil del viento ($MSf:wind$), un archivo con los datos del perfil son utilizados.

Para el modelo son tomados en cuenta los parámetros mostrados en la Tabla 4-1 los cuales fueron tomados de un turbina real de una potencia de 2 MW [Marín, 2009].

Tabla 4-1 Parámetros para modelo de una masa

Modelo	Control
$R=40m$	$k_p=100$
$T=92.6$	$k_i=10m$
$p=1.22g/l$	$\hat{J}=510.3$
$J=567Kg.m^2$	
$P_{tur}=2MW$	

En la Figura 4.10, los resultados de la simulación utilizando el programa 20-Sim son presentados. Para la simulación del sistema se considera un perfil de viento variable con una intensidad de viento mediana (ver Figura 4.10a). En la Figura 4.10a también puede apreciarse la estimación del viento

realizada, la cual se encuentra limitada a un valor de 11m/s, debido a que corresponde al valor límite que se tiene para que el ángulo de orientación de las palas actual (Figura 4.10b) y regule la potencia entregada por la turbina eólica. En la Figura 4.10c se aprecia como la potencia de la turbina eólica se encuentra limitada a producir los 2MW de capacidad, debido a que el ángulo de orientación actúa regulando dicha potencia. Adicionalmente, la velocidad del generador tiene que ser mantenida por su regulación, para este caso, se fija un valor de referencia de 226rad/s. La Figura 4.10d muestra la regulación de la velocidad del generador.

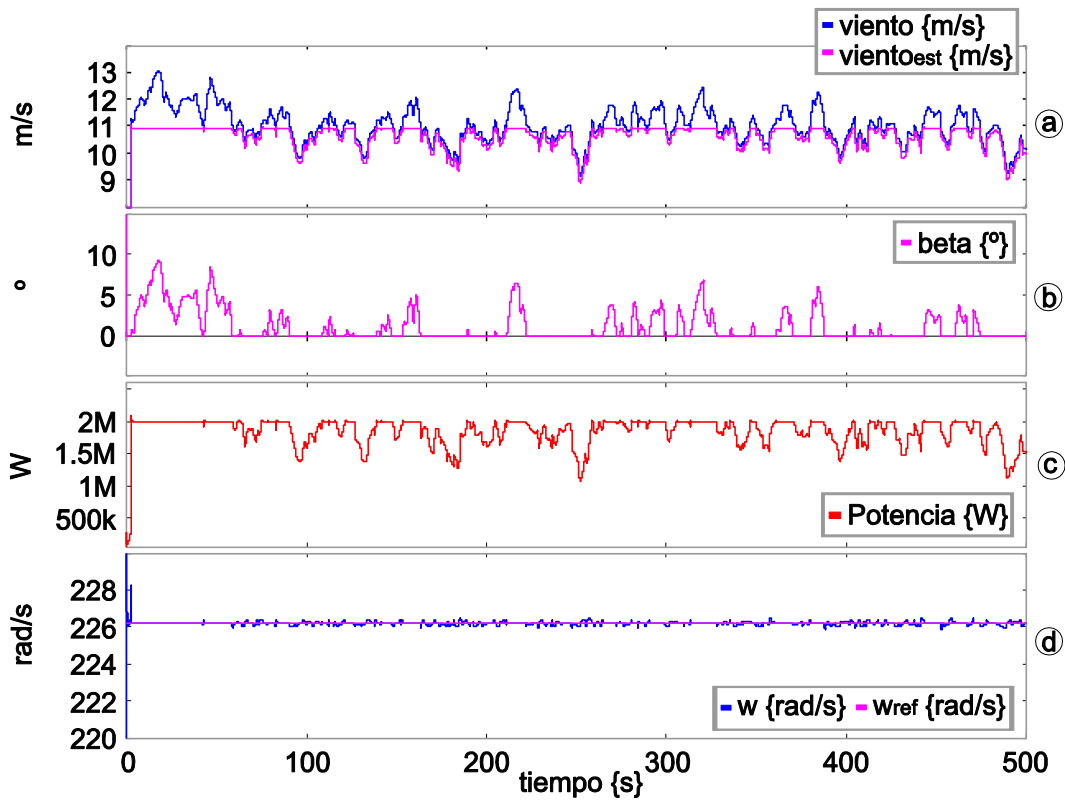


Figura 4.10 Respuestas de la simulación y control del modelo de una masa – a) Viento – b) Ángulo de orientación – c) Potencia generada – d) Velocidad del generador

El coeficiente de potencia y la velocidad específica (λ), son dos de los parámetros más importantes que indican que el modelo funciona de una manera correcta. De esta manera, la Figura 4.11b muestra la variación del coeficiente de potencia durante la simulación, observándose como su valor se encuentra limitado a 0.47, se observa como la magnitud de C_p disminuye al aumentar el ángulo β lo cual indica que la potencia está siendo regulada. Así mismo, en la Figura 4.11c la velocidad específica se puede observar

como su valor se mantiene entre 8 y 10, lo cual indica que se encuentra trabajando en los parámetros óptimos para la máxima obtención de potencia del viento.

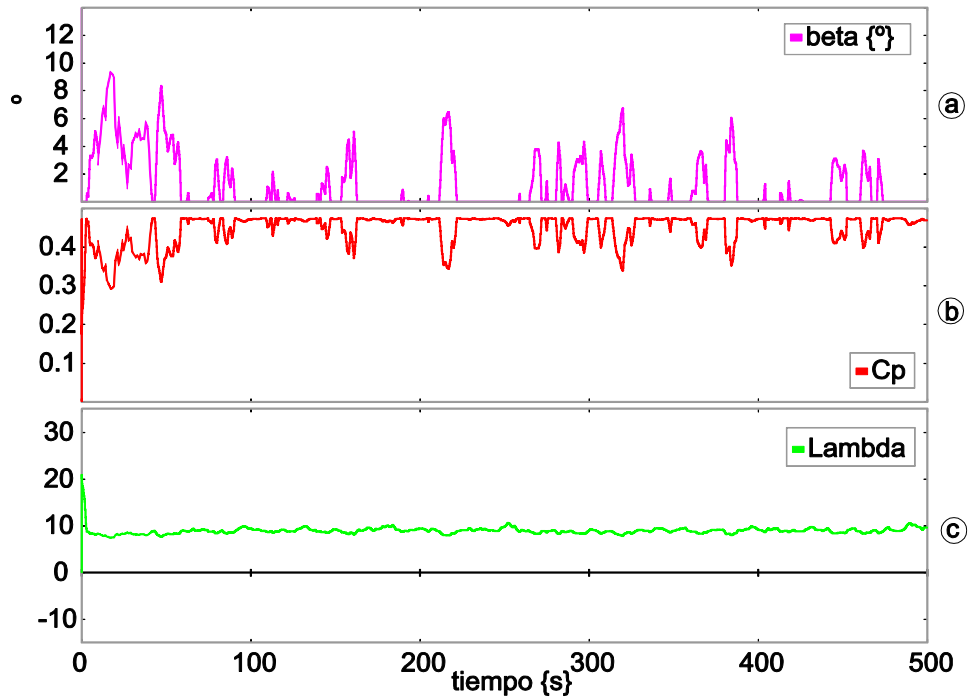


Figura 4.11 Respuestas de la simulación y control del modelo de una masa – a) Angulo de orientación – b) Coeficiente de potencia – c) Velocidad específica

Con los resultados de la simulación se muestra el comportamiento del control y del modelo, obteniendo el resultado esperado.

4.4. Control del modelo de dos masas

Para deducir la ley de control del modelo de dos masas, es necesario considerar el modelo bond graph de la Figura 3.6, y aplicarle el mismo procedimiento de la inversión grafica para la obtención de la ley de control.

La Figura 4.12 muestra el bond graph inverso para deducir la ley de control de la velocidad del generador, considerando el modelo de dos masas.

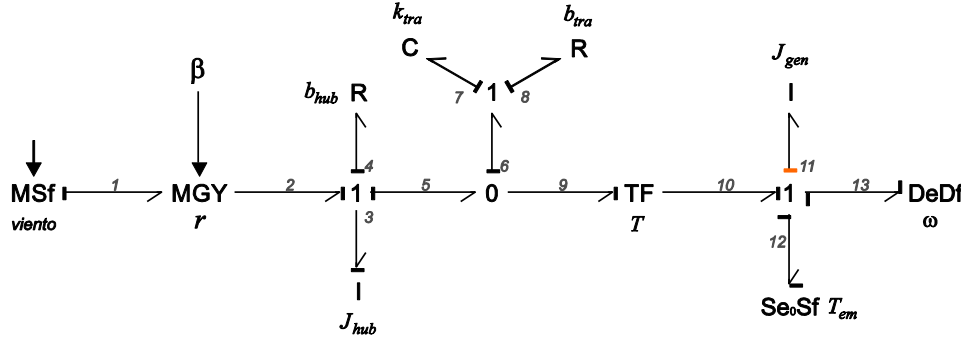


Figura 4.12 Bond graph inverso del aerogenerador de dos masas

El modelo inverso de la Figura 4.12 es muy similar al presentado en la Figura 4.6, esto es debido a que cuando se realiza la inversión de la variable de la velocidad del generador, su sensor se encuentra colocado en la misma unión. La diferencia entre ambos modelos radica en que para el modelo de dos masas, en el bond 3 y antes del transformador TF, se tiene más elementos relacionados entre sí (resorte, inercia de la turbina, amortiguador).

Debido a la adición de elementos considerados en el modelo, es necesario deducir el modelo matemático del bond graph inverso. De esta manera, se tiene que en la unión 1 la siguiente relación,

$$e_{13} = e_{11} - e_{10} - e_{12} \quad (4.15)$$

De la cual el esfuerzo e_{10} está dado por Te_9 y además $e_{10} = e_6$, entonces,

$$e_6 = e_7 + e_8 \quad (4.16)$$

Por lo tanto,

$$e_{13} = e_{11} - e_{12} - T(e_7 + e_8) \quad (4.17)$$

En (4.17) el esfuerzo e_8 está dado por $b_{tra}f_8$, y además $f_8 = f_6 = f_5 - f_9$ y $e_7 = k_{tra} \frac{df_7}{dt} = k_{tra} \frac{df_6}{dt}$, entonces (4.17) queda expresado como,

$$e_{13} = e_{11} - e_{12} - T \left(k_{tra} \frac{d}{dt} (f_5 - f_9) + b_{tra} (f_5 - f_9) \right) \quad (4.18)$$

Usando las variables correspondientes al dominio en cuestión y considerando un detector ideal ($e_{12} = 0$), la expresión (4.18) puede escribirse como (4.19).

$$\tau_{ref} = J_{gen} \frac{d\omega}{dt} - T \left(k_{tra} \frac{d}{dt} \left(\Omega - \frac{\omega}{T} \right) + b_{tra} \left(\Omega - \frac{\omega}{T} \right) \right) \quad (4.19)$$

Como se puede observar, el término que multiplica a la relación de transformación de la caja de engranes depende de la velocidad baja y alta, es decir de la velocidad de rotación de la turbina Ω y del generador ω , respectivamente.

Es bien sabido que la relación entre la velocidad baja y alta de la turbina eólica está dada por la relación de transformación de la caja de engranes. De esta manera, si se considera que la velocidad baja de rotación de la turbina es $T\Omega = \omega$, entonces el término que multiplica a T en (4.19) puede ser cancelado, obteniéndose,

$$\tau_{ref} = J_{gen} \frac{d\omega}{dt} \quad (4.20)$$

Haciendo la comparación de (4.20) con (4.8), se puede observar expresiones muy similares, pero en (4.20) no se tiene el término rTv de compensación en la ecuación.

De tal manera que la expresión (4.20) representa la ley de control en lazo abierto del sistema, entonces la ley de control para el modelo del aerogenerador de dos masas en lazo cerrado está expresada (en términos del operador de Laplace) como,

$$\tau_{ref} = J_{gen} s + C(s) (\omega_{ref} - \omega) \quad (4.21)$$

donde $C(s)$ representa nuevamente el control a elegir para el sistema.

Por lo tanto la expresión (4.21) representa la ley de control para el modelo del aerogenerador de dos masas.

La Figura 4.13, muestra el diagrama de simulación del modelo.

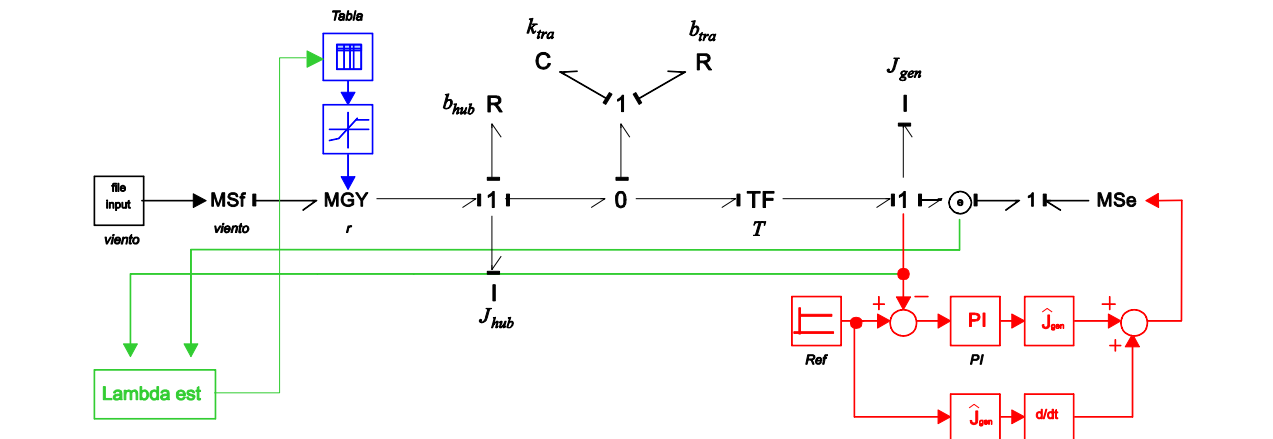


Figura 4.13 Modelo de simulación para el aerogenerador de dos masas

Los resultados obtenidos de la simulación del modelo, son presentados en la Figura 4.14 y Figura

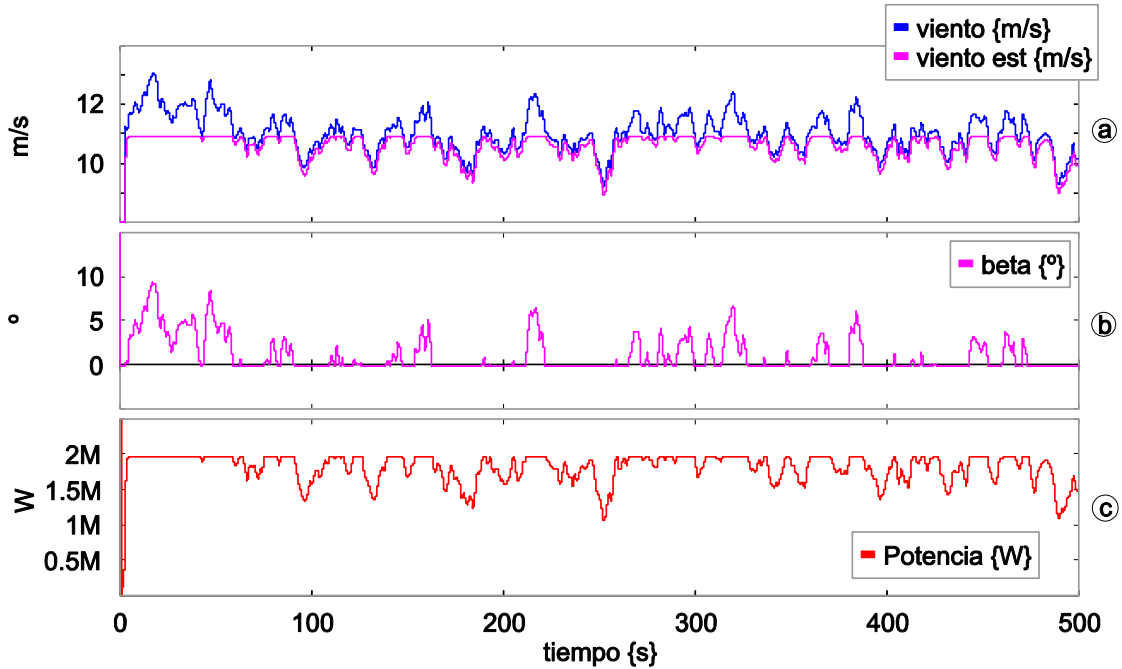


Figura 4.14 Respuestas de la simulación y control del modelo de dos masas – a) Viento – b) Ángulo de orientación – c) Potencia

Como se puede observar, la Figura 4.14a muestra el perfil de la velocidad de viento introducida al modelo usado, así como su estimación. De la misma manera que para el modelo anterior, la regulación del ángulo de orientación de las palas (Figura 4.14b) hace que se regule la potencia generada por el generador a los 2MW (Figura 4.14c).

Para poder observar alguna diferencia entre ambos controles sería necesario compararlos, pero los resultados resultan prácticamente los mismos. Sin embargo, el modelo de dos masas presenta mayor información en el aerogenerador, debido a que ahora se tienen la velocidad de la turbina, la rigidez en la caja de transmisión como variables a ser graficadas y observar su comportamiento.

La Figura 4.15 a) muestra el valor de la velocidad de la turbina, el cual se puede apreciar que se mantiene en un valor de 2.4 rad/s, además de presentar unas oscilaciones que coinciden con el cambio del ángulo de las palas. Esto debido la rigidez agregada a este modelo la cual no se encuentra presente en el modelo de una masa. La Figura 4.15 b) presenta el valor de la rigidez que se encuentra entre las palas y la caja de engranes, en dicha Figura se observa la disminución de su magnitud con la misma dinámica que la potencia de la turbina. Finalmente la Figura 4.15 c) muestra la velocidad del generador, la cual presenta las mismas oscilaciones observadas en el rotor de velocidad baja debido a lo anteriormente mencionado.

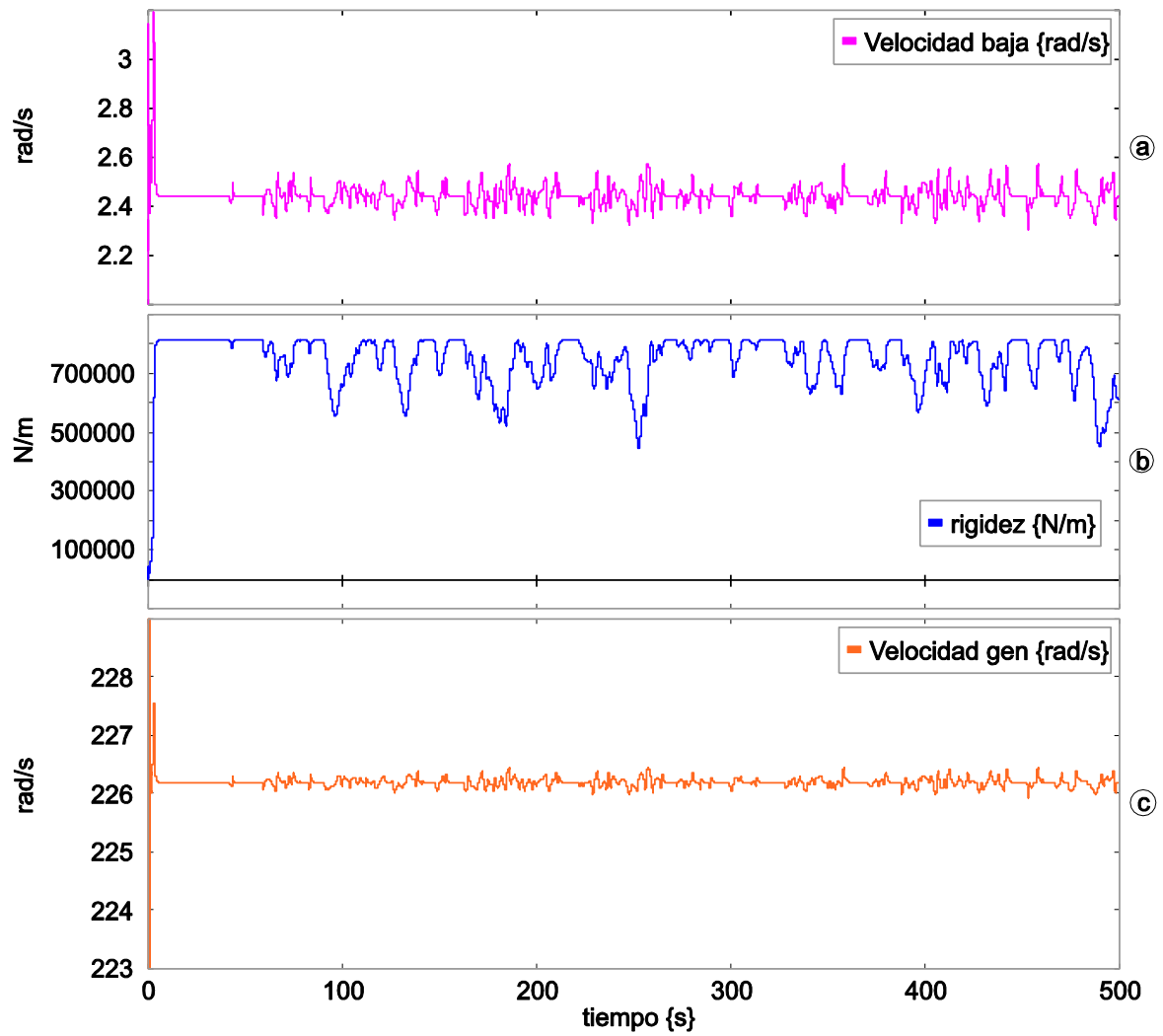


Figura 4.15 Modelo de dos masas – a) Velocidad de la turbina – b) Rigidez transmisión – c) Velocidad del generador

A manera de comparar los resultados obtenidos con los modelos de una masa y dos masas respectivamente se presentan la Figura 4.16 y la Figura 4.17

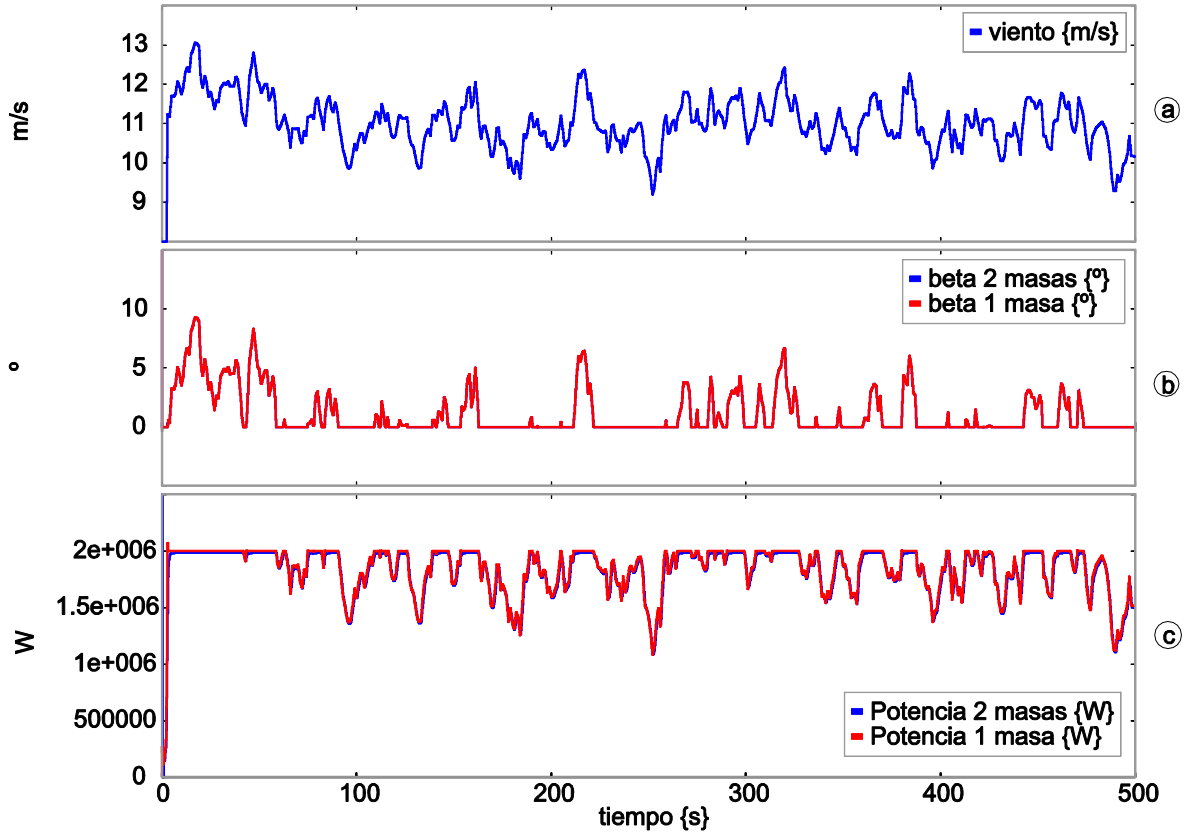


Figura 4.16 Comparación de resultados de los modelos de una y dos masas - a) perfil de viento – b) ángulo beta – c) Potencia obtenida por el generador

En la Figura 4.16 a) se observa el perfil de viento usado, el cual es el mismo para ambos modelos, en la Figura 4.16 c) se presenta una comparación de la potencia obtenida por ambos modelos, se puede observar que existe una diferencia menor al 1% en el resultado de ambos modelos.

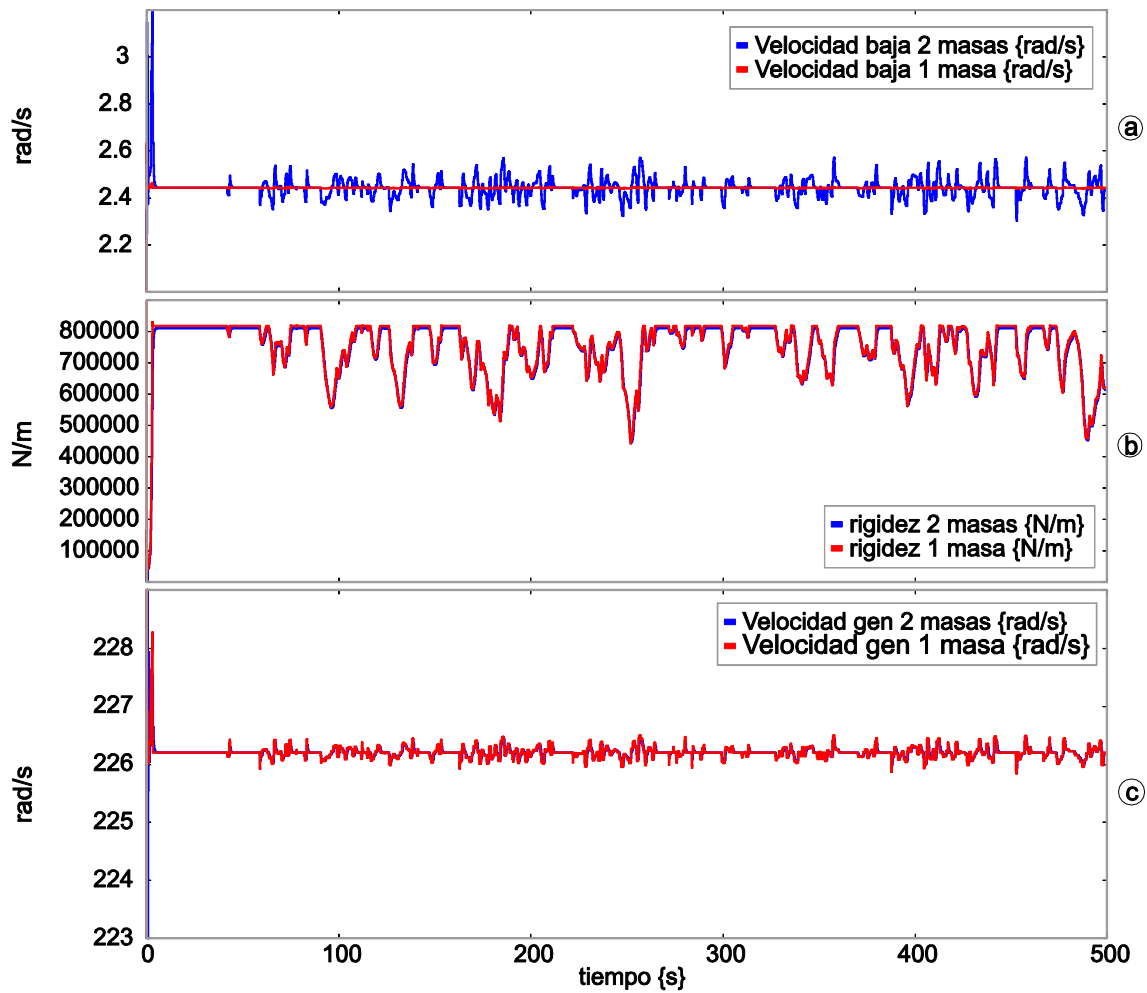


Figura 4.17 Comparación de resultados de los modelos de una y dos masas – a) Velocidad de la turbina – b) Rigidez transmisión – c) Velocidad del generador

En la Figura 4.17 se presenta una comparación con los resultados obtenidos en los modelos de una y dos masas. En la Figura 4.17 a) se observa la velocidad de la turbina, en la cual existe una clara diferencia provocada por la inclusión de la parte no rígida de la caja de engranes en el modelo de dos masas, en la Figura 4.17 c) se aprecia la diferencia en la velocidad del generador provocada por la rigidez del modelo de dos masas.

Los valores utilizados en la simulación y control del modelo de la Figura 4.13 son dados en la Tabla 4-2 [Marín, 2009].

Tabla 4-2 Parámetros para modelo de dos masas

Modelo	Control
$R=40m$	$k_p=86$
$T=92.6$	$k_i=8m$
$p=1.22g/l$	$\hat{J}=40.3$
$J_{hub}=567Kg.m^2$	
$J_{gen}=43.5Kg.m^2$	
$P_{tur}=2MW$	

4.5. Control del módulo de levitación magnética

Al igual que en las secciones anteriores, en la presente sección se presenta la simulación y control del módulo que permite realizar la levitación magnética.

Como el sistema que representa la levitación magnética (Figura 3.13) es un sistema no lineal, una ley de control puede ser desarrollada para un sistema equivalente y/o lineal en cierto punto de operación. El modelo presentado en la Figura 3.13 puede ser transformado a un sistema equivalente en el dominio mecánico. En el presente trabajo, se mantienen el sistema en su forma natural, debido a que es así como se encuentra constituido físicamente.

De esta manera, para desarrollar la ley de control existen se parte del modelo en bond graph de la Figura 3.13, el cual es presentado nuevamente en esta sección (Figura 4.18) para efectos de la deducción de la ley de control.

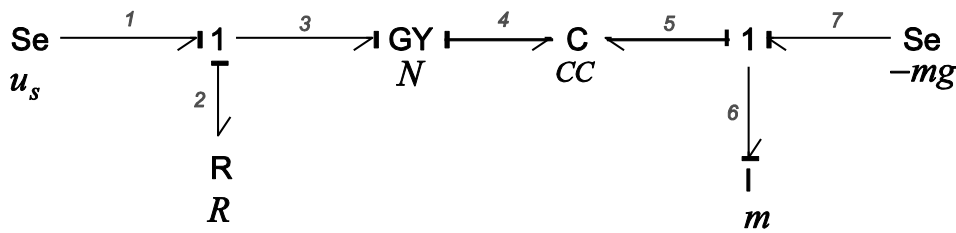


Figura 4.18 Modelo bond graph del levitador magnético

Observando el modelo de la Figura 4.18, se identifica a la fuente de esfuerzo u_s del sistema, y como salida se tendrá la posición de la masa m . La posición de la masa, está dada por la expresión (4.22), en la cual se observa cómo se tiene una dependencia de la fuerza magnetomotriz M .

$$M = \frac{2y\phi}{\mu_0 A} \quad (4.22)$$

Si se aplica el mismo procedimiento para la obtención de la ley de control, es necesario realizar una inversión grafica del modelo. La Figura 4.19 muestra el bond graph inverso de módulo de levitación magnética.

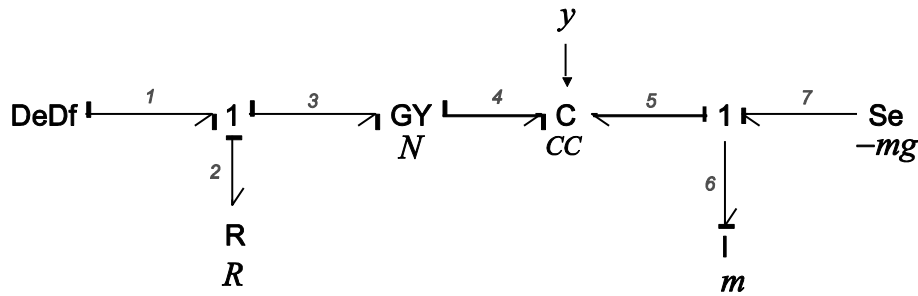


Figura 4.19 Bond graph inverso para el control de la posición

Como se puede observar en la Figura 4.19, la inversión se realiza del parámetro de la posición y , hacia la entrada del sistema u_s , que ahora es un detector (*DeDf*). Como el parámetro que representa la distancia de desplazamiento de la masa m se encuentra relacionado directamente con la expresión (4.22), en el bond graph se considera como entrada una flecha que es introducida directamente sobre el elemento en cuestión. Esto anterior es realizado únicamente para efectos de visualización grafica del sistema.

De esta manera, de la Figura 4.19 las expresiones que se obtienen son las siguientes:

La expresión (4.6) representa el balance de energía en la unión 1, entre los bonds 1, 2 y 3.

$$e_1 = e_2 + e_3 \quad (4.23)$$

donde, $e_3 = Nf_4$ y $e_2 = Rf_2 = Rf_3 = Re_4/N$, entonces la expresión (4.23) puede expresarse como,

$$e_1 = R \frac{e_4}{N} + Nf_4 \quad (4.24)$$

De la expresión (4.24), el esfuerzo del bond 4 (e_4) puede ser expresada en función de la expresión (4.22), debido a que $e_4=M$. Además, se sabe que f_4 corresponde a $\dot{\phi}$, entonces la expresión (4.24), considerando que $e_1 = u_{sref}$, se convierte en,

$$u_{sref} = \frac{2yR}{N\mu_0 A} \phi + N \frac{d}{dt} \phi \quad (4.25)$$

En la expresión (4.25) se puede observar que se tiene como variables a la posición de la masa y , y al flujo magnético, siendo este último la variable sobre la cual puede ser aplicada una ley de control en lazo cerrado del sistema. Entonces de esta manera se tendrá un control sobre la posición de la masa controlando el flujo magnético que es aplicado en el electroimán.

De la misma manera en cómo fue presentado anteriormente, la expresión (4.25) representa el sistema en lazo abierto, entonces es necesario imponer la dinámica del error para formular la ley de control en lazo cerrado. En este caso la dinámica considerada es $\varepsilon = \phi_{ref} - \phi$, por lo tanto la expresión (4.25) se convierte en la expresión (4.9).

$$u_{sref} = N \frac{d}{dt} \phi_{ref} + Nk(\phi_{ref} - \phi) + \frac{2yR}{N\mu_0 A} \phi \quad (4.26)$$

donde k representa el controlador a elegir.

En el dominio de la frecuencia, la ecuación (4.26) es expresada como en (4.10)

$$u_{sref(s)} = Ns\phi_{ref(s)} + NC(s)(\phi_{ref(s)} - \phi(s)) + \frac{2yR}{N\mu_0 A} \phi(s) \quad (4.27)$$

Finalmente, la expresión (4.27) es implementada en forma diagramas de bloques y añadida al modelo. La simulación del sistema es presentada en la siguiente sección.

4.5.1. Simulación del módulo de levitación magnética

La Figura 4.20, muestra el diagrama de simulación del módulo de levitación magnética.

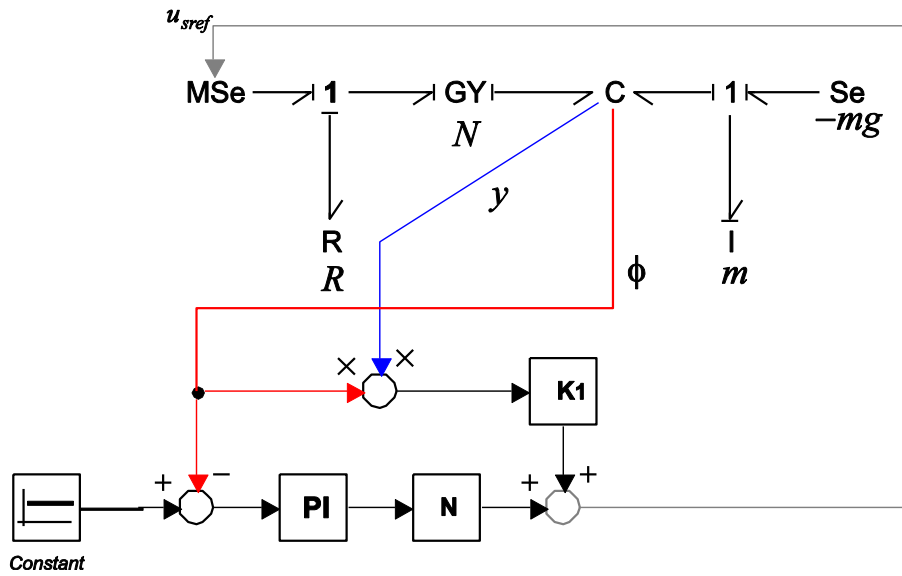


Figura 4.20 Diagrama de simulación del módulo de levitación magnética

De la Figura 4.20 puede observarse que la expresión (4.27) es implementada con los bloques del control. La expresión K_1 corresponde al término $2R/N\mu_0 A$, y además se puede observar que la derivada del flujo no se encuentra implementada en el control, esto es debido a que se considera una referencia constante, es decir, la derivada de cualquier constante es cero.

De igual forma que en los casos anteriores, el controlador elegido en este caso es un control del tipo proporcional – integral.

Para realizar la simulación, se utilizan los parámetros de la Tabla 4-3, los cuales fueron propuestos tomando como referencia las proporciones de las palas, debido a que no fue posible encontrarlos en la literatura. Una referencia del flujo magnético es fijada en 1Wb, con lo cual se obtiene un desplazamiento de 0.055m. La simulación es realizada durante 10s. La Figura 4.21 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 4-3 Parámetros para la simulación del módulo de levitación magnética

Modelo	Control
$R=0.5\Omega$	$k_p=800$
$N=5$	$k_i=3m$
$g=9.8m/s^2$	$N=4.6$
$m=4Kg$	$\mu_0=1.18$
$\mu_0=1.22g/l$	$A=0.1$
$A=0.1m^2$	$\Phi_{ref}=1$

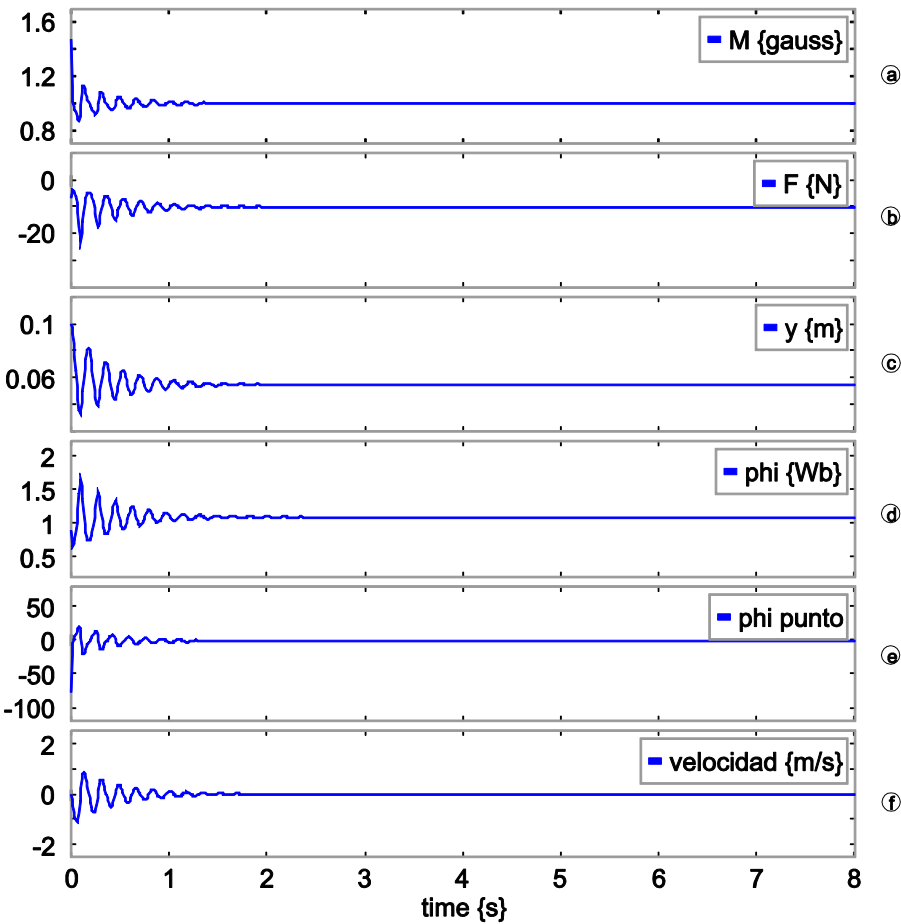


Figura 4.21 Simulación del módulo de levitación, a) Fuerza magneto-motriz, b) Fuerza, c) posición, d) flujo magnético, e) Derivada del flujo, f) Velocidad.

En la Figura 4.21 se puede apreciar como las diferentes variables que intervienen en el modelo son controladas. Se destacan las Figura 4.21c y Figura 4.21d, las cuales corresponden a la posición y flujo magnético. En todas las Figuras se observa el efecto transitorio debido al no considerar condiciones iniciales, posteriormente mantiene un valor constante en su estado estable. La Figura 4.21 a) y Figura 4.21 b) presentan la fuerza mecánica y fuerza magnemotriz respectivamente, que se encuentran presente en el elctroiman y en la masa respectivamente.

4.6. Control del aerogenerador de levitación magnética

El control para realizar la levitación magnética descrito en el apartado anterior, es aplicado a la estructura de la flecha en la transmisión del aerogenerador, descrita en la sección 3.6.

La Figura 4.22 muestra el diagrama de simulación implementado en el software 20Sim.

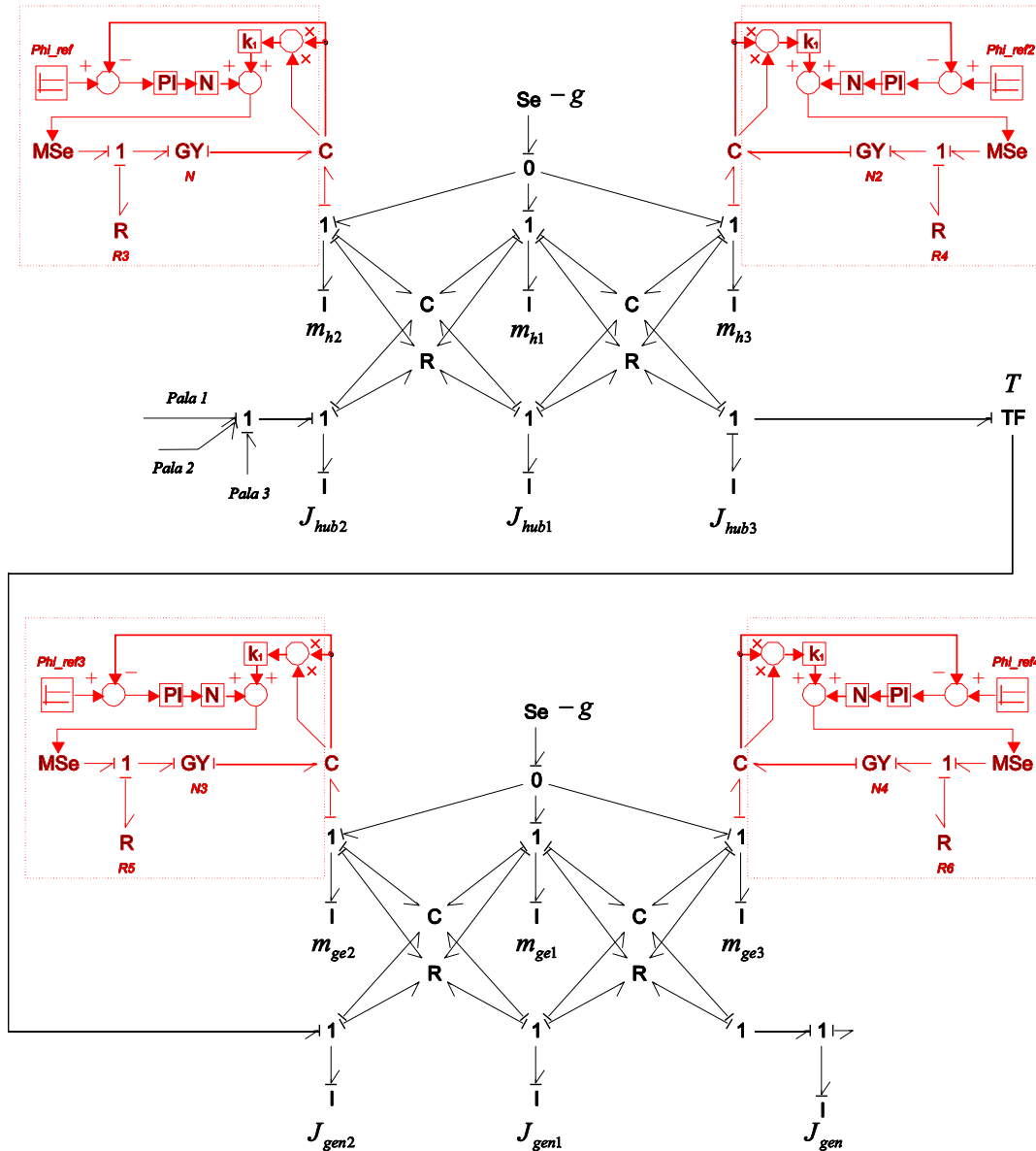


Figura 4.22 Esquema de la transmisión con el módulo de control para la levitación magnética.

Como se puede apreciar en la Figura 4.22 se tienen cuatro módulos de control, dos para cada una de las flechas de la transmisión, los cuales se encuentran colocados en los extremos de la parte traslacional del modelo de la flecha.

Los dos módulos de control que corresponden a la parte lenta de la transmisión y los de la parte rápida, parte izquierda y derecha del elemento TF respectivamente, son idénticos en cuanto a los valores numéricos de los componentes y del controlador. Así, el control descrito en el apartado 4.5 es utilizado en el modelo del aerogenerador de levitación magnética.

En la siguiente subsección son presentados los resultados de la simulación.

4.6.1. Simulación del aerogenerador de levitación magnética

Para realizar la simulación y verificación del funcionamiento del sistema completo, los datos de la Tabla 3-1 son utilizados para los parámetros de las palas, el resto de los parámetros son mostrados en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4 Parámetros del modelo de la estructura de la transmisión y del control de levitación magnética

Transmisión eje turbina	Módulos de control	Transmisión eje generador
$E=1.7e12$	$k_p=560$	$E=1.7e11$
$J_{hub1}, J_{hub2}, J_{hub3}=800Kg*m^2$	$k_i=3m$	$J_{hub1}, J_{hub2}, J_{hub3}=80Kg*m^2$
$g=9.8m/s^2$	$N=4.6$	$g=9.8m/s^2$
$m_{h1} m_{h2}, m_{h3}=300Kg$	$\mu_0=1.18$	$m_{h1} m_{h2}, m_{h3}=30Kg$
$\mu_0=1.22g/l$	$A=1.1$	$\mu_0=1.22g/l$
$l=2.7$	$\Phi_{ref}=1$	$l=1.3$

Nota: Los datos correspondiente a los elementos de la transmisión mostrados en la Tabla 4-4 no corresponden a datos reales de una turbina eólica, contrario a los utilizados en las palas de la turbina.

Dos diferentes simulaciones son realizadas con el modelo del aerogenerador de levitación magnética. La primera simulación considera un viento de entrada constante, y la segunda se considera el perfil de viento variable mostrado en los casos anteriores.

4.6.1.1. Consideración de un viento constante

En la simulación se tiene en cuenta un perfil de viento constante con una variación en forma de rampa (del instante de 15 segundos a 45 segundos), que permite incrementar la velocidad de viento de 5 m/s hasta los 20 m/s. Para la simulación, el ángulo de orientación de las palas es considerado fijo $\beta=0$.

Para visualizar las características del aerogenerador de levitación magnética, se presentan en los resultados de la simulación dos curvas de respuesta para cada una de las variables mostradas. Para lo anterior, se hace necesario el uso del modelo del aerogenerador de 2 masas (Figura 4.13), al cual se le adiciona el modelo de la estructura de las palas. Lo anterior con el objetivo también de mostrar las diferencias que existen entre dos modelos iguales, pero con una transmisión diferente, la normal y la levitada magnéticamente.

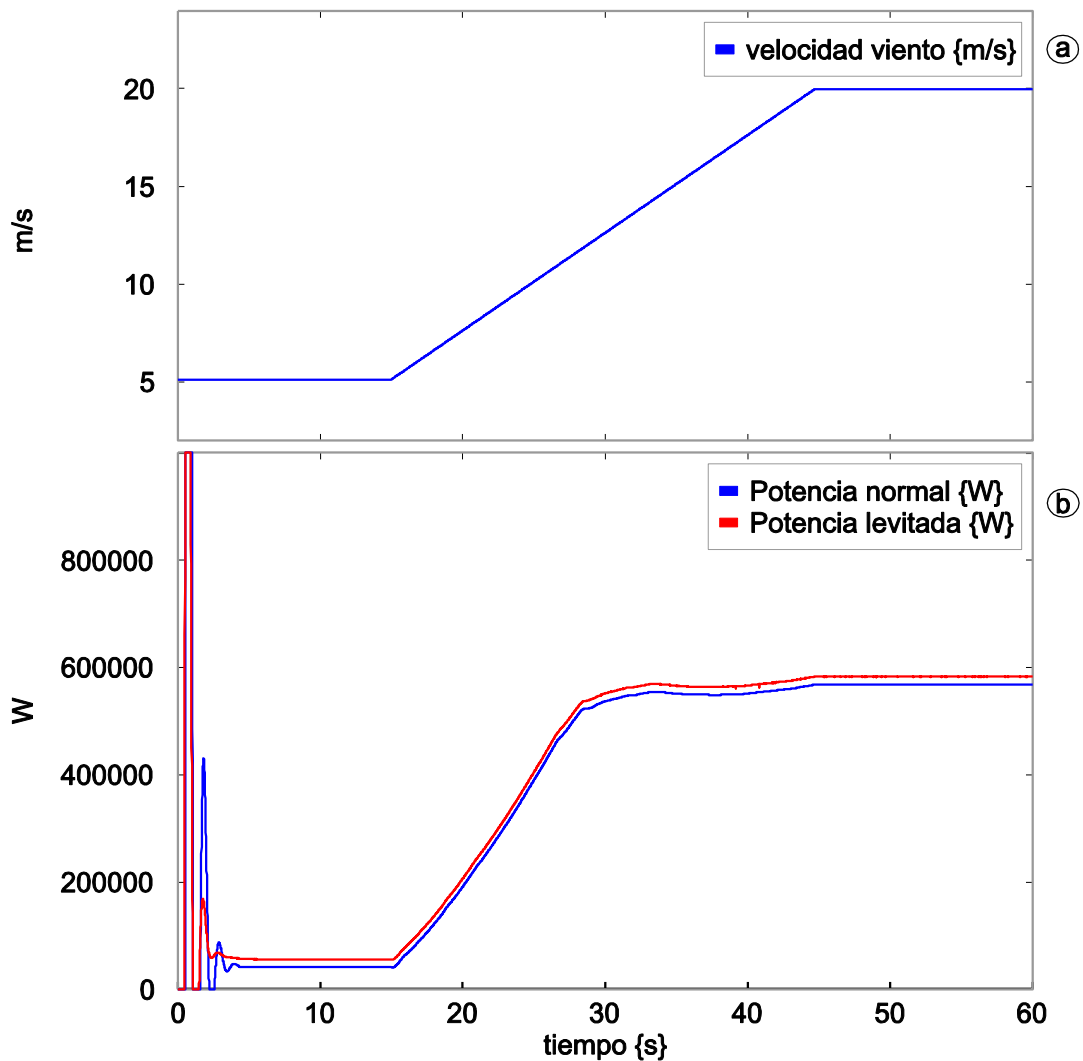


Figura 4.23 Aerogenerador levitado magnéticamente viento constante a) velocidad viento, b) potencia generada

Como puede observarse en la Figura 4.23 a), se tiene una entrada de viento constante con una variación tipo rampa para ambos modelos. En la Figura 4.23 b) se presentan los resultados de la potencia eléctrica para cada modelo, observándose que para el modelo del aerogenerador levitado magnéticamente

se tiene un incremento con respecto al aerogenerador normal. Es importante mencionar que existe un transitorio considerable al inicio de la simulación, esto es debido a que todos los elementos dinámicos que conforman la estructura de la pala no han sido inicializados, además del efecto transitorio de la estructura de la transmisión.

De la misma forma, la Figura 4.24 muestra los resultados en ambos aerogeneradores para la velocidad del generados y de la turbina (velocidad baja), así como también de la rigidez de la turbina en ambos casos.

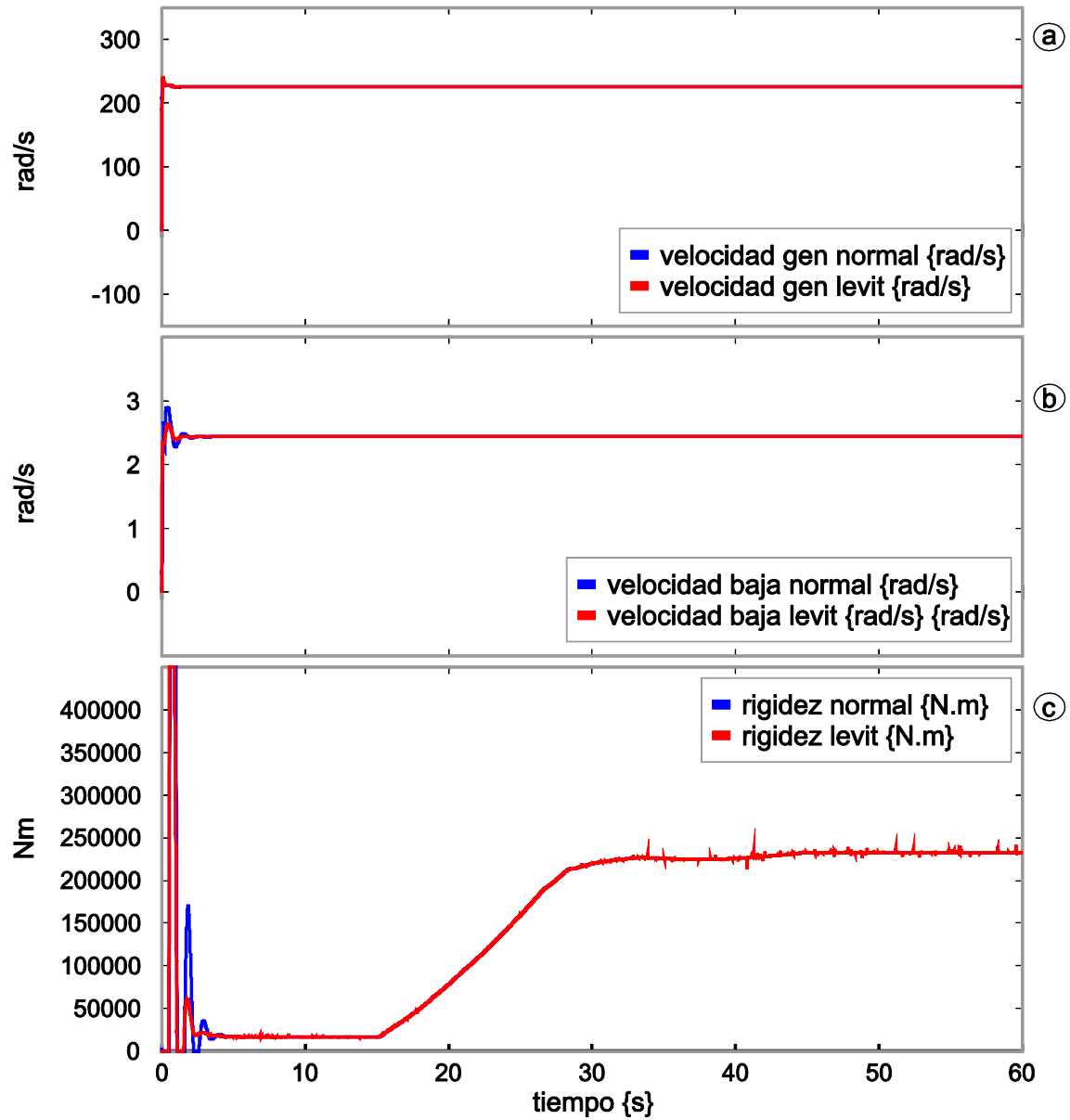


Figura 4.24 Aerogenerador levitado magnéticamente viento constante a) velocidad angular generador, b) velocidad angular turbina, c) rigidez

En ambos modelos para la velocidad angular de la máquina (Figura 4.24a), la velocidad angular de la parte de la turbina (Figura 4.24b) y de la rigidez en la flecha de la turbina (Figura 4.24c) no presentan una variación considerable, es decir, menor al 1%. Sin embargo, en lo que respecta a la rigidez, se puede observar claramente que la respuesta presenta algunas oscilaciones, esto es debido a valores numéricos que se eligieron para la estructura de la flecha. Dichas oscilaciones o ruido tiene un impacto también en la respuesta de la potencia (Figura 4.23b), pero su efecto no pudo ser apreciado del todo.

Finalmente, como la flecha es considerada como una estructura mecánica traslacional y rotacional, es importante observar que tanto la velocidad lineal de la masa (parte traslacional) se mantiene en cero, y además verificar que se está desplazando dicha flecha, con respecto a la posición del electroimán.

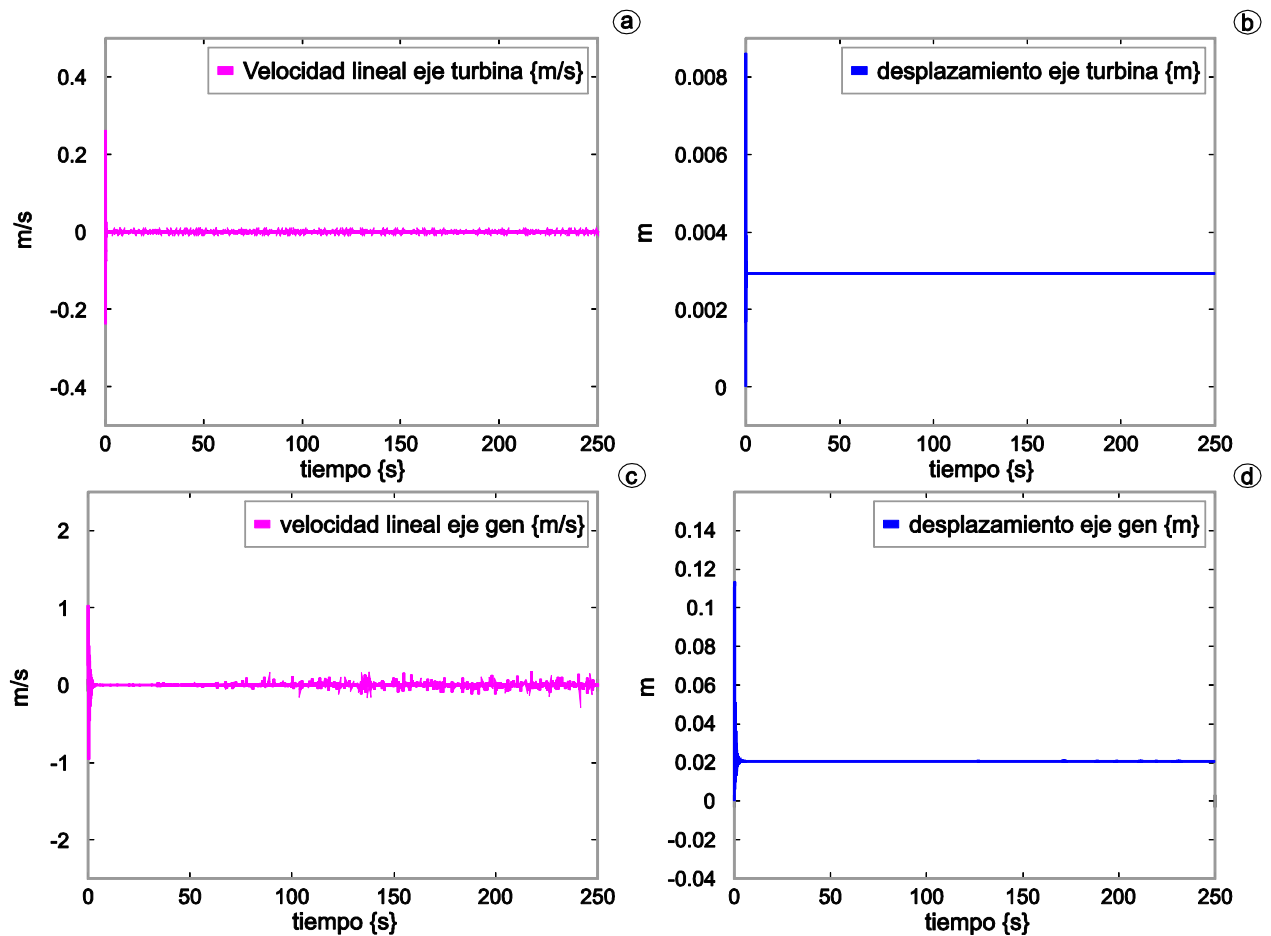


Figura 4.25 Respuestas de la parte traslacional del aerogenerador levitado magnéticamente viento constante a) velocidad lineal eje turbina, b) desplazamiento eje turbina, c) velocidad lineal eje generador, d) desplazamiento eje generador

La Figura 4.25a y Figura 4.25c muestran que efectivamente la velocidad lineal de las masas es cero en el eje de la turbina y del generador, respectivamente. Esto quiere decir que no se tiene un desplazamiento de manera horizontal del eje. Por otra parte, la Figura 4.25b muestra el desplazamiento del eje de la turbina a una distancia de 3 milímetros con respecto a la posición del electroimán, es decir es la distancia a la cual se encuentra levitando el eje. De la misma manera, la Figura 4.25d muestran un desplazamiento del eje del generador de 2 centímetros con respecto a la posición del electroimán.

4.6.1.2. Consideración de un viento variable

En la verificación del modelo del aerogenerador de levitación magnética utilizando un perfil de viento variable, se presentan los siguientes resultados.

La Figura 4.26a y Figura 4.26b se muestran el perfil de la velocidad de viento introducida a las palas del aerogenerador y la potencia generada, respectivamente.

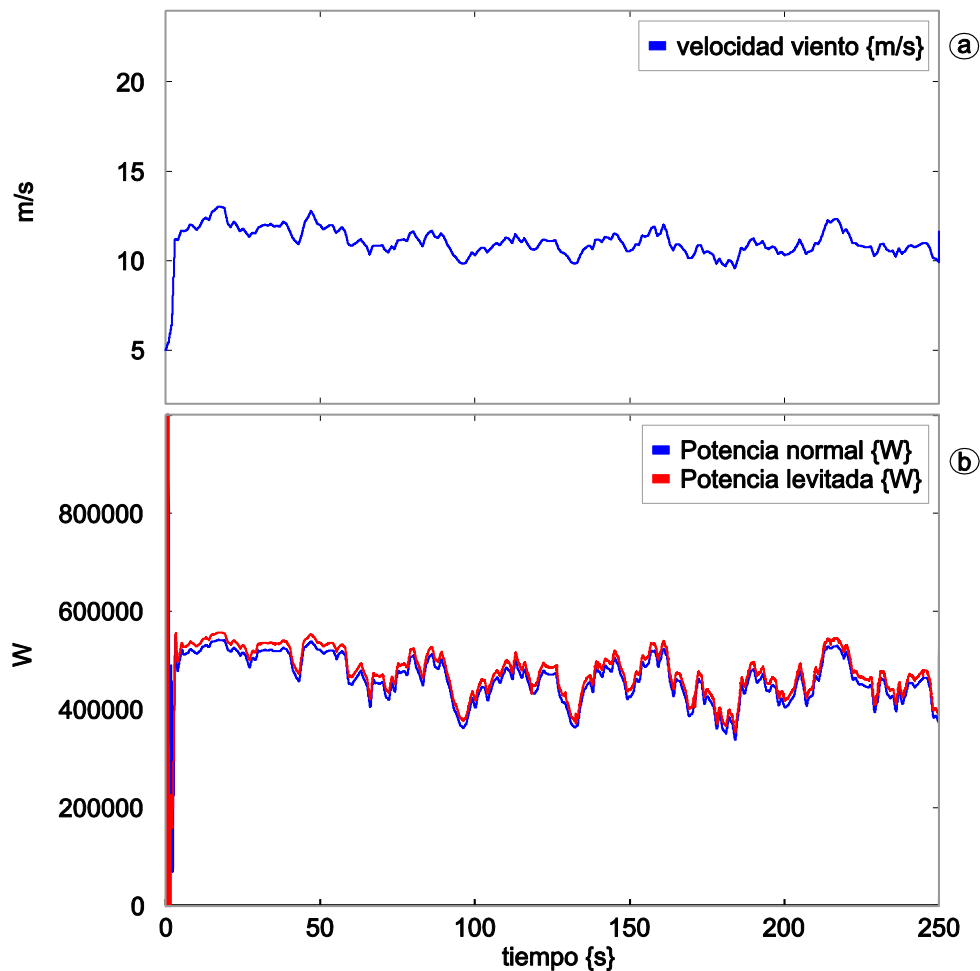


Figura 4.26 Aerogenerador levitado magnéticamente viento variable a) velocidad viento, b) potencia generada

Como se puede observar, al igual que para el caso de una velocidad de viento constante, existe una pequeña diferencia en las potencias generadas por el modelo sin levitación y el modelo normal.

De la misma forma, la Figura 4.27 muestra que las velocidades tanto del generador como de la turbina se mantienen en una misma referencia. También se verifica los mismos resultados para la rigidez de la turbina.

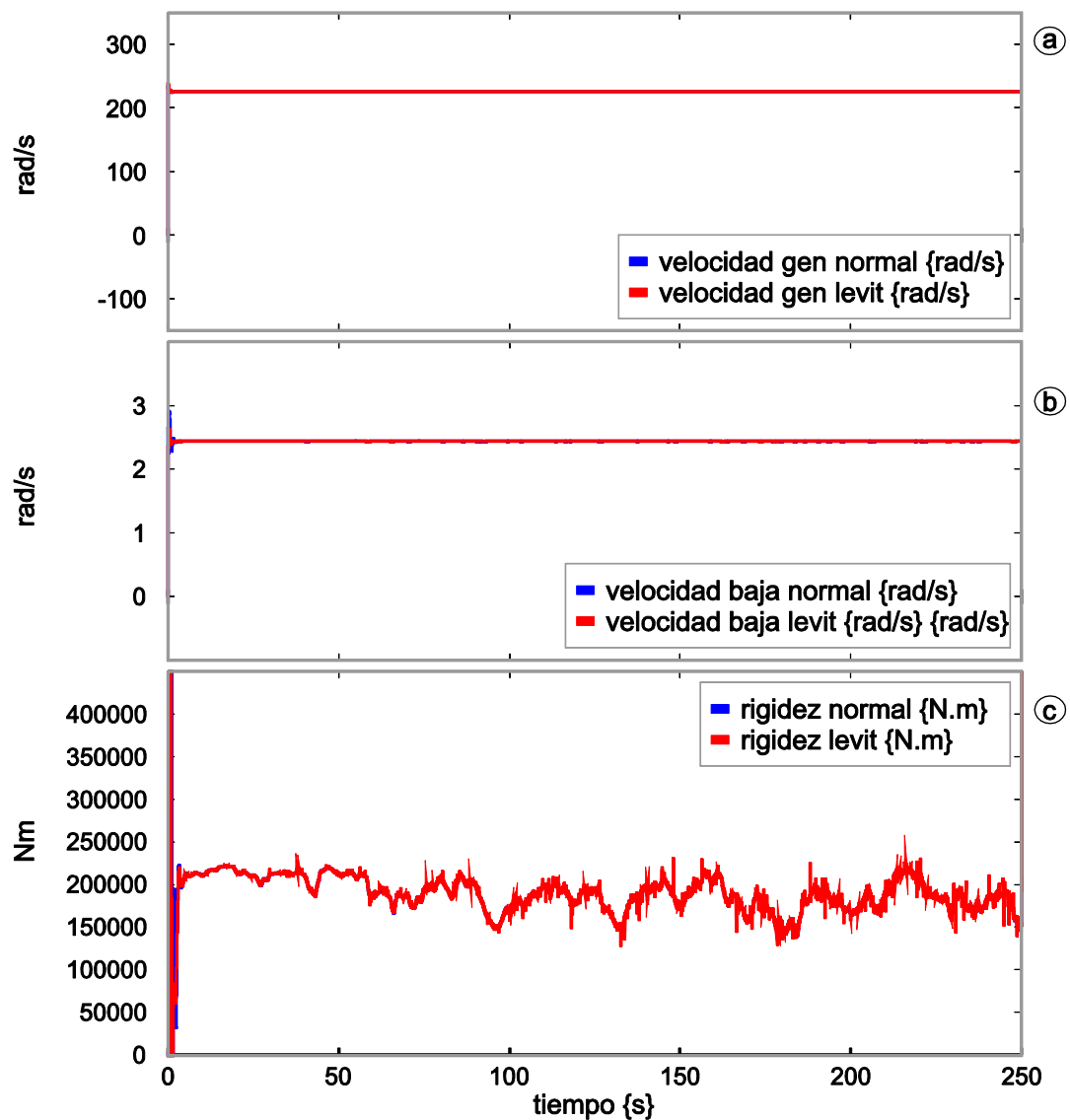


Figura 4.27 Aerogenerador levitado magnéticamente viento variable a) velocidad angular generador, b) velocidad angular turbina, c) rigidez

Finalmente, la Figura 4.28 muestra que la velocidad lineal de la masa se mantiene en cero para todo el tiempo de simulación, así como también la posición del eje de la turbina y el rotor se mantienen (Figura 4.28b y d).

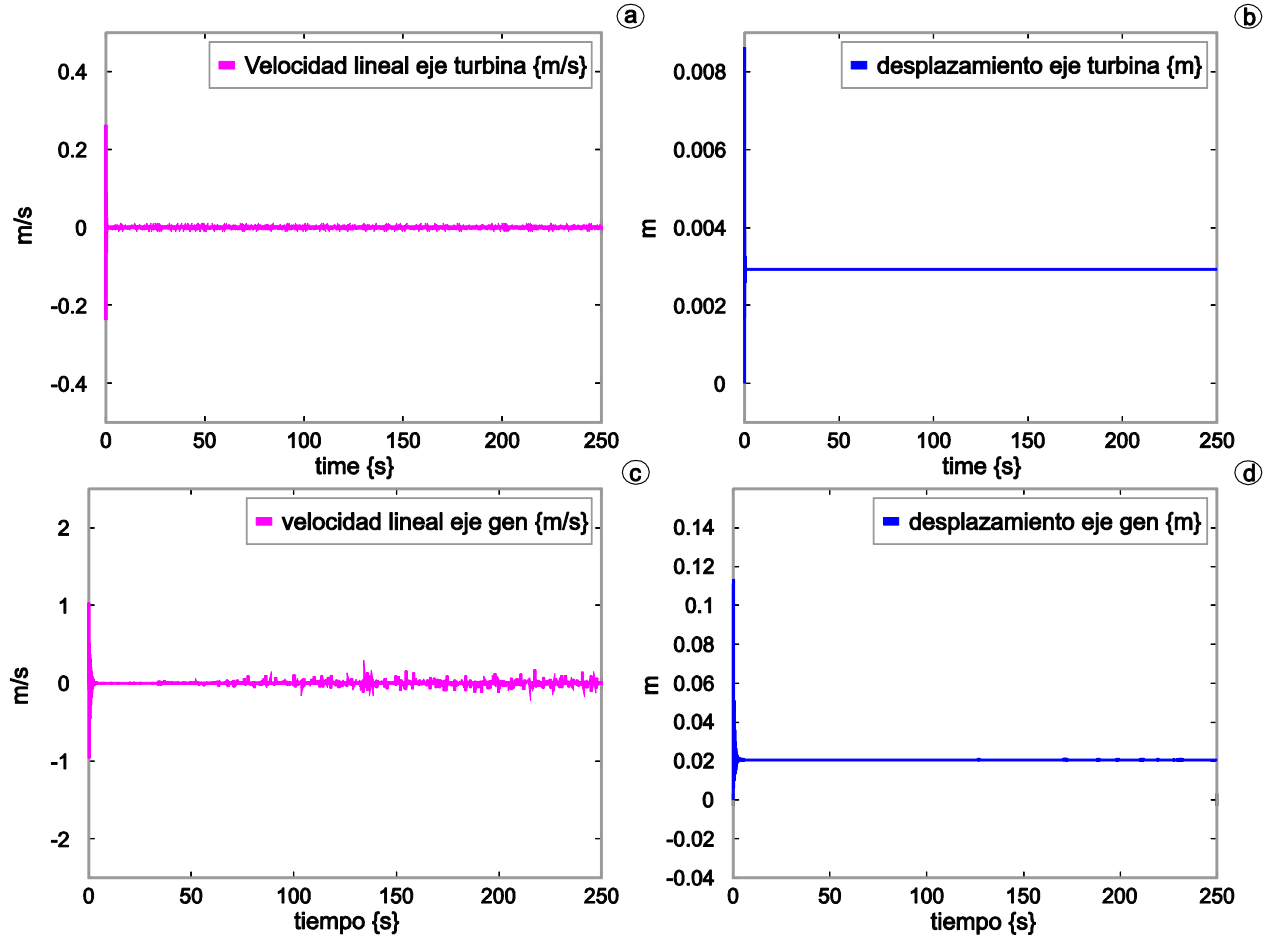


Figura 4.28 Respuestas de la parte traslacional del aerogenerador levitado magnéticamente viento variable a) velocidad lineal eje turbina, b) desplazamiento eje turbina, c) velocidad lineal eje generador, d) desplazamiento eje generador

4.7. Conclusiones

En el presente capítulo, se presentaron las leyes de control de los modelos expuestos en el Capítulo 3. La inversión grafica para la obtención de la ley de control fue aplicada en los modelos expuestos. De esta técnica de obtención de la ley de control, se pueden resumir las siguientes características:

- La ley de control obtenida de la inversión del bond graph es fácil de implementar.
- Para aplicar la técnica, la ley de control obtenida necesita ser formulada del bond graph inverso, el cual permite encontrar la ley de control en lazo abierto. Después la ley de control en lazo cerrado debe ser obtenida, adicionando el tipo de corrector elegido.
- La estructura de control obtenida utiliza el verdadero modelo inverso, haciendo aparecer lazos de anticipación (feedforward) y la derivación de la señal de referencia.

Adicionalmente a lo expresado anteriormente,

Una comparativa con alguna otra técnica de control no fue realizada, debido a que el objetivo del presente trabajo es el del modelado de la turbina de levitación magnética, sin embargo, en dicho sistema es inherente contar con leyes de control necesarias para verificar el correcto comportamiento del sistema.

Capítulo 5

5. Conclusiones y Trabajos Futuros

5.1. Conclusiones

El objetivo principal de esta tesis era el realizar un modelado de una turbina eólica levitada magnéticamente para posteriormente llevar a cabo un análisis de la misma para formular un esquema de control el cual limitaría la potencia generada por la turbina.

Las conclusiones más relevantes acerca de la presente tesis pueden ser presentadas dos partes principales:

Modelado

Una vez presentadas las herramientas necesarias para el desarrollo de los modelos utilizando esta metodología, se desarrollaron los diferentes modelos del aerogenerador. Para lo anterior, se presentaron cuatro diferentes modelos del aerogenerador. En el primer modelo la turbina se modeló tomando en cuenta una sola masa, en la cual se pueden resaltar tres principales partes: la conversión aerodinámica (elemento MGY), la caja de engranes (elemento TF) y la inercia (elemento I). Para realizar un modelo más detallado al modelo de una masa se le agregó inercia del generador y la fricción en ambas masas, así como el resorte y el amortiguador presentes en el rotor en la parte mecánica. Para llevar a cabo un análisis de vibraciones se presentó un modelo de las palas de la turbina, con el cual a través de los lazos causales y trayectorias causales se puede observar la dinámica de las diferentes secciones de la pala, en la cual resalta la presencia de la menor frecuencia en la parte central de la misma.

Se presentó un modelo del rotor de la parte de la turbina, así como del rotor del generador. El cual se modeló de manera similar que las palas de la turbina, dividiéndolos en dos secciones y considerando el centro de la estructura como el centro de la masa. Se propuso un módulo de levitación magnética, el cual

fue modelado en bond graph para posteriormente ser añadido al modelo tanto del rotor de la turbina como el rotor del generador, con esto se presentó el modelo completo del aerogenerador.

De los diferentes modelos expuestos en el trabajo, se podría decir que todo depende de las características que se desean analizar en el aerogenerador para la utilización de uno u otro. También es necesario considerar tiempos de simulación (si es requerido este parámetro) a la hora de elegir cualquiera de los cuatro modelos, debido a que es evidente que el tiempo de simulación del modelo de una sola masa, no es el mismo que el modelo que contiene la estructura de las palas.

Adicionalmente, también la complejidad del modelo matemático derivado de cada uno de los modelos expuesto, crece conforme se toman en cuenta más consideraciones en el sistema.

Control

Se desarrollaron las leyes de control de los modelos propuestos. Aplicando la inversión gráfica se obtuvo una ley de control la cual se aplicó a los diferentes modelos. A partir de ésta técnica se desarrolló un módulo de control para limitar la angular del generador utilizando un controlador PI. En cuanto a los modelos de una y dos masas se aplicó el control de la orientación de las palas basado en el comportamiento del coeficiente de potencia con respecto de la velocidad específica. Se realizó el control del módulo de levitación magnética el cual fue agregado al modelo completo del aerogenerador, el cual fue formulado por medio de la teoría de inversión gráfica. Finalmente se aplicó un esquema de control para el modelo completo del aerogenerador utilizando un controlador PI.

De esta técnica de obtención de la ley de control, se puede destacar las siguientes características: la ley de control obtenida de la inversión del bond graph es fácil de implementar, para aplicar la técnica la ley de control obtenida necesita ser formulada del bond graph inverso y la estructura de control obtenida utiliza el verdadero modelo inverso, haciendo aparecer lazos de anticipación (feedforward) y la derivación de la señal de referencia.

Utilizando el software 20sim se simularon los diferentes modelos arrojando resultados muy particulares para cada modelo. Para la simulación de los modelos de una y dos masas se utilizaron parámetros reales de una turbina eólica de 2MW.

La simulación del modelo de una masa se puede destacar el aumento del ángulo beta cuando la velocidad del viento supera los 11 m/s, lo cual mantiene la potencia del generador menor de los 2MW la cual es su potencia máxima, por otra parte el coeficiente de potencia y la velocidad específica se regulan en sus parámetros óptimos lo cual a su vez mantiene la velocidad angular dentro de los parámetros del generador. Para el modelo de dos masas se muestra al igual que el caso anterior, la regulación de la

potencia a 2MW, variando el ángulo beta para mantener esta potencia, además se controla la velocidad del generador para así obtener los resultados esperados. Así mismo, realizando una comparación en ambos modelos se puede observar las diferencias en los resultados, debido principalmente a la participación de la rigidez presente en la turbina en el modelo de dos masas.

Realizando la simulación del módulo de levitación magnética se muestra cómo es que la posición de la masa suspendida se mantiene en un valor constante una vez pasado el estado transitorio, con esto observando comportamiento que se pretendía obtener.

La simulación del modelo completo de la turbina eólica levitada magnéticamente se presentó utilizando dos perfiles distintos de viento y valores de una turbina de 75kW, un perfil constante y un perfil real variable. Tanto para el perfil de viento constante como para el variante se muestra como el control mantiene constante la velocidad angular en el valor para la cual fue diseñado, así como la posición tanto del rotor de la turbina como la del rotor del generador, los cuales se encuentran levitados magnéticamente, con esto se satisface uno de los objetivos que era mantener la turbina levitada magnéticamente. Si bien la propuesta del modelo y su control solamente toman en cuenta un sólo grado de libertad o movimiento, el modelo muestra las características esenciales del sistema.

Por otra parte se realizó una comparación en la potencia en cuanto a los resultados arrojados por el turbina y la turbina levitada magnéticamente, los cuales muestran un incremento mayor al 2% de la turbina levitada magnéticamente respecto de la turbina convencional, con lo cual se concluye que levantar los rotores del aerogenerador disminuye las pérdidas por fricción lo cual se ve directamente reflejado en la potencia generada por la turbina

5.2. Trabajos futuros

Como trabajos futuros, se visualiza la implementación del modelo y el control en un simulador de tiempo real, a fin de validar tanto el modelo como el control propuesto, así como adicionar más grados de libertad al modelo, esto con el objetivo de poder simular de una manera más precisa al sistema físico real.

Realizar el modelado de una turbina eólica de levitación magnética de ejes verticales, con el fin de realizar una comparación entre modelos y con esto visualizar las ventajas y desventajas que ambos modelos presentan uno del otro.

Se propone desarrollar un prototipo físico del modelo de un aerogenerador tanto de ejes horizontales como de ejes verticales para llevar a cabo una comparación de los resultados obtenido por medio de simulación con los que se obtendría con el prototipo.

Bibliografía

- [Ackermann, 2005] Ackermann T. ET Wiley J., “*Wind power in power systems*”. John Wiley Chichester, West Sussex, England, 2005.
- [Adam y Magdi, 2010] Ragheb Adam, Ragheb Magdi. “*Wind Turbine Gearbox Technologies*”, INREC10, Amman, Jordan, March 21–24, 2010
- [Agarwal et al. 2012] S. Agarwal, L. Chalal, G. Dauphin-Tanguy, X. Guillaud. “*Bond Graph Model of Wind Turbine Blade*”. Bond Graph Modeling: Theory and Practice MathMod Vienna, 2012
- [Akhmatov y Knudsen, 1999] V. Akhmatov and H. Knudsen, “*Modeling of windmill induction generators in dynamic simulation programs*”. International conference on electric power engineering, PowerTech Budapest 1999, 29 August 2 September 1999. p. 108
- [Anderson y Anjan, 1983] P. M. Anderson and B. Anjan. “*Stability Simulation of Wind Turbine Systems*”. IEEE Transactions on Power Operators and Systems. Vol. PAS-102, No. 12(1983), pp. 3791-3795.
- [Aravind et al. 2012] Aravind CV, Rajparthiban R, Rajprasad R, Wong YV. “*A Novel Magnetic Levitation Assisted Vertical Axis Wind Turbine–Design Procedure and Analysis*”. 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications.
- [Bakka et al. 2011] T. Bakka, H. R. Karimi, “*Wind Turbine Modeling Using The Bond Graph*”, IEEE International Symposium on Computer- Aided Control System. Design (CACSD), Denver, CO, EEUU. Sseptiembre 28-39 2011.
- [Bakka et al. 2013] T. Bakka, H. R. Karimi, “*Bond graph modeling and simulation of the wind turbine systems*”, Journal of Mechanical Science and technology, Enero 17, 2013.
- [Barbut, 2009] Monique Barbut, “*Investing in Renewable Energy the GEF Experience*”, 2009. Disponible en www.theGEF.org
- [Bassani, 2006] Bassani R., “*Levitation of passive magnetic bearings and systems*”, Tribology International, Vol. 39, no. 9, Sep. 2006, pp. 963-970.
- [Berg et al. 1990] D.E. Berg, P.C. Klimas, W.A. Stephenson. “*Aerodynamic design and initial performance measurements for the Sandia 34-m vertical axis wind turbine*”. Proceedings of the ninth ASME wind energy symposium, Sandia National Laboratories (January 1990) SED-VOL 9, ASME

Bibliografía.

- [Bleuler et al. 2005] H. Bleuler, J. Sandtner, Y. J. Regamey, F. Barrot, “*Passive Magnetic Bearings for Flywheels*”. International Symposium on Magnetic Suspension Technology. Pg. 131. 2005
- [Bonderson, 1975] L.S. Bonderson. “*Vector bond graphs applied to one-dimensional distributed systems*”. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, pages 75–82, 1975.
- [Borutzky, 2010] Wolfgang Borutzky, Bond Graph Methodology, Springer, Londres 2010.
- [Brown, 1992] F.T. Brown. “*Direct Application of the Loop Rule to Bond Graphs*”. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, pages 253–261, September 1992.
- [Coudert et al. 1993] N. Coudert, G. Dauphin-Tanguy, A. Rault, “*Mechatronic Design of an Automatic Gear Box using Bond Graphs*”. Proceedings of the IEEE Systems Man and Cybernetics Conference, 1993.
- [Das et al. 2005] Shuvra Das, Arif Baig, Chandramohan Naidu, Benchmarking Software Tools for Mechatronic Applications. Society of Automotive Engineers. Number 2005-01-1310. 2005.
- [Dauphin-Tanguy, 2000] G. Dauphin-Tanguy, “*Les Bond Graphs*”. Hermès Science Editor, 2000.
- [Enercon] www. Enercon.de. Visitado 12 Diciembre 2014.
- [Fahrenthold y Wargo, 1991] E.P. Fahrenthold and D.J. Wargo. “*Vector Bond Graph Analysis of Mechanical Systems*”. Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 113:344–353, 1991.
- [Freris y Infield, 2008] L. Freris, D. Infield. “*Renewable energy in power systems*”. Chichester, Reino Unido, Wiley & Sons, Ltd., 2008
- [Gawthrop, 1995] P.J. Gawthrop. 1995. “*Bicausal Bond Graph*”, Proceeding of the International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation ICBGM’95, vol. 27, pp. 83-88.
- [Golding, 1976] E. Golding. “*The generation of electricity by wind power*”. Halsted Press, New York, 1976.
- [Green Tech, 2013] Cnet. Green Tech. Diciembre 2013. <http://news.cnet.com/greentech>.
- [Guillaud et al. 1999] X. Guillaud, F. Vandecasteele, M. Wulverick, J.P. Hautier. 1999. “*New concept of corrector for the control of alternatives quantities*”. Proc. 8th European Conference on Power Electronics, EPE Lausanne.
- [Guillaud y François, 2003] X. Guillaud, B. François. 2003. “*A causal method for the modeling of static converter and the control design. Application to a Voltage Source*

- Converter*". 10th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2003, 2-4
- [Hasen et al. 2006] M.O.L. Hansen, J.N. Sorensen, S. Voutsinas, N. Sorensen, H.A. Madsen, "State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity". Progress in Aerospace Sciences 42 (2006) 285–330.
- [Handsen y Michalke, 2007] Handsen A.D. ET Michalke G. "Fault ride-through capability of DFIG wind turbines". Renewable Energy, vol. 32(9), pages 1594-1610, 2007.
- [Holton, 2004] James R. Holton. "An Introduction to Dynamical Meteorology". Academic Press 2004.
- [Javawant, 1981] B V Jayawant. "Electromagnetic suspension and levitation". Rep. Prog. Phys., Vol. 44, 1981. Printed in Great Britain
- [Johnson, 1994] G.L. Johnson. "Wind Energy Systems". Manhattan Kansas, Prentice-Hall, 1994.
- [Joško et al. 2012] Deur Joško, Ivanovic' Vladimir, Assadian Francis, Kuang Ming, H. Tseng Eric, Hrovat, "Bond graph modeling of automotive transmissions and drivelines". Proceedings of 7th Vienna International Conference on Mathematical Modelling (MATHMOD), Vienna, Austria, 2012.
- [Junco, 1999] S. Junco, "Real-and complex-power bond graph modeling of the induction motor". Proceedings of the ICBGM'99, San Francisco, vol. 31, No. 1, 1999, pp. 323–328.
- [Jung y Broadwater, 2014] Jaesung Jung, Robert P. Broadwater. "Current status and future advances for wind speed and power forecasting". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 31 (2014)762–777.
- [Kadam y Patil, 2013] A. A. Kadam, S.S. Patil. "A Review Study on Savonius Wind Rotors for Accessing the Power Performance". Journal of Mechanical and Civil Engineering, ISSN(e) : 2278-1684, ISSN(p) : 2320–334X, PP : 18-24. 2013.
- [Karnopp, 1991] D. Karnopp, "State functions and bond graph dynamic models for rotary, multi-winding electrical machines". Journal of the Franklin Institute 328 (1) (1991) 45–54.
- [Lydia et al. 2013] M. Lydia, A. Immanuel Selvakumar, S. Suresh Kumar, G. Edwin Prem Kumar. "Advanced algorithms for wind turbine power curve modeling". IEEE Transaction on Sustainable Energy 4 (3) (2013).
- [Manwell et al. 2002] Manwell J., McGowan J. and Rogers A. "Wind Energy Explained". John Wiley Sons, 2002, ISBN 0-470-84612-7 Available at Secretariat Wind Energy, 5th floor, room LR 5.02, 2002.

Bibliografía.

- [Manyonge et al. 2012] A. W. Manyonge, R. M. Ochieng, F. N. Onyango, J. M. Shichikha. “*Mathematical Modelling of Wind Turbine in a Wind Energy Conversion System: Power Coefficient Analysis*”. Applied Mathematical Sciences, Vol. 6, 2012, no. 91, 4527 – 4536
- [Martins et al. 2007] M. Martins, A. Perdana, P. Ledesma, E. Agneholm and O. Carlson, “*Validation of fixed speed wind turbine dynamic models with measured data*”. Renewable Energy 32 (2007), 13011316
- [Marín, 2009] David Marín. “*Wind Integration in Island Networks*”. PhD thesis, PhD thesis from Ecole Centrale de Lille, pages 48, 2009.
- [Mason, 1956] S. J. Mason. “*Feedback theory – further properties of signal flow graphs*”. In Proc. IRE 44, pages 920–926, 1956.
- [Moriarty y Hasen, 2005] Moriarty P.J. and Hansen A.C.. “*AeroDyn Theory Manual*”. National Renewable Energy Laboratory NREL/TP-500-36881. 2005.
- [Mukherjee et al. 2000] A. Mukherjee, R. Karmakar, A.K. Samantaray, “*Modelling and Simulation of Engineering Systems through Bond Graph*”. Narosa Publishing House, 2000.
- [Mukherjee, 1999] A. Mukherjee, “*Modeling of basic induction motors and source loading in rotor-motor systems with regenerative force field*”. Simulation Practice Theory 7 (1999) 563–576.
- [Muyeen et al. 2007] S.M. Muyeen, Md. Hasan Ali, R. Takahashi, T. Murata, J. Tamura, Y. Tomaki, A. Sakahara and E. Sasano, “*Comparative study on transient stability analysis of wind turbine generator system using different drive train models*”. IET Renew. Power Gener., Vol. 1, No. 2, June 2007
- [Muyeen et al. 2009] Muyeen, S. M, Tamura, Junji, Murata, Toshiakim. “*Stability Augmentation of a Grid-Connected Wind Farm*”. Springer, London, 2009.
- [Ngwompo et al. 1996] R.F. Ngwompo, S. Scavarda, et D. Thomasset. 1996. “*Inversion of Linear Time-invariant SISO Systems Modelled by Bond Graph*”. Journal of the Franklin Institute, Vol. 333(B), No. 2, pp. 157-174.
- [Ochieng et al. 2010] R. M. Ochieng, F. N. Onyango and A. O. Oduor. “*Physical Formulation of the Expression of Wind Power*”. International Journal of Energy Environment and Economics, 18(2010), 1-7
- [Petru y Thiringer, 2002] T. Petru and T. Thiringer. “*Modeling of wind turbines for power system studies*”. IEEE Trans Power Systems 2002; 17(4):11329.
- [Pinedo y Ramirez, 2009] Anthony Pinedo, Guillermo Ramírez. “*Theoretical Model of Electric Aerogeneration Systems for Vertical Axis Wind Turbines*”. Grupo de

-
- Investigación de Física de la Universidad Nacional de Trujillo – Perú. 2009
- [Powell y Danby, 2005] James Powell and Gordon Danby. “*The New Mode of Transport for the 21st Century*”. The summer issue of 21st Century Science & Technology, 2005
- [Sahm, 1979] D. Sahm, “*A two-axis, bond graph model of the dynamics of synchronous electrical machines*”. Journal of the Franklin Institute 308 (3) (1979) 205–218.
- [Salvatore, 1998] Claudio Salvatore, “*Linear and nonlinear compensation technique for control of a single degree of freedom magnetic bearing*”. Master of Science Thesis, Massachusetts institute of Technology. June 1998.
- [Sato et al. 1998] Y. Sato, T. Ishizuka, K. Nezu, T. Kataoka. 1998. “*A new control strategy for voltage-type PWM rectifiers to realize zero steady-state control error in input current*”. IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 32, issue 3, pp 480-486.
- [Sánchez y Medina, 2014] R. Sánchez, A. Medina. “*Wind Turbine Model: A Unified Approach*”. Simulation Modelling Practice and Theory, Volume 41, February 2014, Pages 28-45
- [Singh y Santoso, 2011] Mohit Singh and Surya Santoso. “*Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants*”. The University of Texas at Austin, Austin, Texas, January 11, 2008 – May 31, 2011.
- [Soman et al. 2010] Soman SS, Zareipour H, Malik O, Mandal P. “*A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons*”. Proceedings of the 2010 North American Power Symposium, Arlington, 26-28 September 2010, pg. 1-8.
- [Tamura et al. 2001] J. Tamura, T. Yamajaki, M. Ueno, Y. Matsumura, and S. Kimoto, “*Transient stability simulation of power system including wind generator by PSCAD/EMTDC*”. IEEE Porto Power Tech Proc., 2001, vol. 4, EMT-108 Power Tech Conference (2001)
- [Tapia et al. 2001] G. Tapia, A. Tapia, I. Zubia, X. Ostolaza and J. R. Saenz. “*Electrical fault simulation and dynamic response of a wind farm*”. International Conference on Power and Energy Systems (2001).
- [Tiernego y Bos, 1985] M.J.L. Tiernego and A.M. Bos. “*Modelling the dynamics and kinematics of mechanical systems with multibond graphs*”. Journal of the Franklin Institute, 319(1/2):pp. 37–50, 1985.
- [wwindea] www.wwindea.org. Visitado 25 Mayo 2015.

Bibliografía.

- [Xin y Dingfag, 2011] Tan Xin, Chen Dingfang “*Virtual Prototype Modeling and Dynamics Analyses of a Wind Turbine’s Epicyclical Gearbox*”, Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2011.
- [Yang, 2001] WJ Yang. “*Wind energy hydrogen storage hybrid power generation*”. International Journal of Energy Research. 2001; 25:449 463 (DOI: 10.1002/er.696)
- [Yang et al. 2009] Xiao-ping Yang, Xian-feng Duan, Yan-li Bai, “*Asymmetrical Voltage Dip Ride-through Enhancement of Directly Driven Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator*”. International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Pag. 1-6. April 2009. Disponible en <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5348157>
- [Yonnet y Lemarquand, 1991] Jean-Paul Yonnet, Guy Lemarquand. “*Stacked structures of passive magnetic bearings*”. Journal of Applied Physics 70, 6633 (1991); doi: 10.1063/1.349857.
- [Zack, 2003] Zack J. “*Overview of wind energy generation forecasting*”. Albany, NY: True Wind Solutions, LLC. & AWSS scientific, Inc.; 2003.
- [Zhang et al. 2008] Zhang X, Zhang L Y, Yang S Y, Yu Y, Cao R X. “*Low voltage ride through technologies in wind turbine generation*”. Proceedings of The CSU-EPSCA, 2008, vol. 20(2), pp.1-8.
- [Zhang, 2007] Zhang C H. “*The development direction of large wind generation equipments*”. China Electric Equipment Industry, 2007(7), pp. 48-50.
- [Zubia et al. 2001] I. Zubia, X. Ostolaza, G. Tapia, A. Tapia, and J. R. Saenz, “*Electrical fault simulation and dynamic response of a wind farm*”. Proc. IASTED Int. Conf. on Power and Energy System, No.337-095, 2001, p. 595