

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“Control de Orientación de un  
Aerogenerador”**

POR

**José Eduardo Vielma Galindo**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL  
GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DIRECTOR DE TESIS**

**Dr. Alejandro Enrique Dzul López**

**CODIRECTOR DE TESIS**

**Dr. Marco Antonio Arjona López**

**ISSN: 0188-9060**



**RIITEC: (12)-TMCIE-2017**

Torreón, Coahuila, México  
Junio 2017

SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
Instituto Tecnológico de La Laguna

Torreón, Coah., **20/Junio/2017**

Dependencia: DEPI/CPCIE

Oficio: DEPI/CPCIE/063/2017

Asunto: Autorización de impresión  
de tesis.

**C. Vielma Galindo José Eduardo**  
**CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.**  
**PRESENTE**

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulado:

**"Control de orientación de un aerogenerador"**

Habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le concede la autorización con número de registro **RIITEC: (12)-TMCIE-2017**, para que proceda a la impresión del mismo.

**ATENTAMENTE**  
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN

**DR. ARMANDO LONGORIA DE LA TORRE**  
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación  
del Instituto Tecnológico de la Laguna



SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA  
INSTITUTO TECNOLÓGICO  
de la Laguna  
División de Estudios de Posgrado  
e Investigación

ALT/JHJ




 Torreón, Coah., **20/Junio/2017**
**DR. ARMANDO LONGORIA DE LA TORRE**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

Por medio de la presente, hacemos de su conocimiento que después de haber sometido a revisión el trabajo de tesis titulado:

**"Control de orientación de un aerogenerador"**

Desarrollado por el **C. Vielma Galindo José Eduardo**, con número de contro **M1513001** y habiendo cumplido con todas las correcciones que se le indicaron, estamos de acuerdo que se le conceda la autorización de la fecha de examen de grado para que proceda a la impresión de la misma.

**ATENTAMENTE**  
 EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN

---

**Dr. Alejandro E. Dzul López**  
 Asesor/Director de Tesis

---

**Dr. Marco A. Ariona López**  
 Co-director de Tesis

---

**Dr. Víctor A. Santibañez Dávila**  
 Comité Tutorial

---

**Dr. Miguel A. Llana Leal**  
 Comité Tutorial


# Dedicatoria

Dedicada a mis padres, José Ramón Vielma y Catalina Galindo, por todo su apoyo, amor y cariño. A mis hermanos Ramón y Cinthia que siempre están a mi lado.

## Agradecimientos

A mis padres, José Ramón y Catalina, por todo su apoyo y amor que me han brindado todo este tiempo, así como a mis hermanos Cinthia y Ramón que siempre me han apoyado.

Al Dr. Alejandro Enrique Dzul López y al Dr. Marco Antonio Arjona López por su apoyo y dedicación durante el desarrollo de mi trabajo.

Al Fondo de Sustentabilidad Energética SENER-CONACYT, al INEEL y al CEMIE-Eólico por el apoyo recibido dentro del proyecto *P10: Diseño, análisis y construcción de generadores eléctricos sincronos de imanes permanentes y de inducción doblemente alimentados para plantas eólicas*, el cual es liderado por el Dr. Marco Antonio Arjona López.

A los doctores Ricardo E. Campa Cocóm, J. Alfonso Pámanes García, José Luis Meza Medina, Miguel Ángel Llana Leal, Alejandro E. Dzul López, Víctor A. Santibáñez Dávila, Francisco Jurado Zamarripa y a los Maestros en Ciencias Javier Ollervides Vásquez y Ramón Sandoval R. por sus enseñanzas con relación al posgrado, experiencias y anécdotas compartidas para sustentar la base de mi tesis.

A mis compañeros de posgrado Ing. Jorge Montoya Chairez, M.C. Ricardo Ovalle Gamboa, Ing. Carlos Icazbalceta, Ing. Romeo Falcón por todo su tiempo y experiencias vividas en el posgrado.

A todos mis amigos de infancia y gente que conocí durante 2 años de la tesis.

Al CONACYT por el apoyo económico que me brindó para la realización de mi tesis.

# Control de Orientación de un Aerogenerador

## Resumen

En este trabajo se estudiaron los modelos matemáticos relacionados con la dinámica del actuador de orientación del aerogenerador, así como el desarrollo de estrategias de control para realizar el seguimiento de trayectorias de viento. Las trayectorias de viento fueron calculadas mediante un programa llamado TurbSim, el cual es proporcionado gratuitamente por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) de los Estados Unidos de América. Al ingresar los parámetros de entrada a dicho programa, éste genera perfiles de dirección de viento y velocidad de viento en 3 dimensiones, de las cuales, sólo se utilizaron la velocidad horizontal y dirección horizontal del viento. Asimismo, se realizó un modelo dinámico para el actuador de guiñada basándose en el modelo proporcionado por el programa YawDyn, el cual es también proporcionado por NREL. Por otro lado, se realizaron simulaciones en la plataforma Matlab/Simulink de 3 controladores no lineales: Linealización por Realimentación, Modos Deslizantes y Backstepping para el control de orientación del aerogenerador, siendo esto la aportación principal del trabajo de tesis.

**Palabras clave:** aerogenerador, Linealización por realimentación, Modos deslizantes, Backstepping, TurbSim, YawDyn, modelado dinámico de guiñada.

# Wind Turbine Yaw Control

## Abstract

In this work, it is studied the dynamics equations models for the yaw movement of a wind turbine. The wind tracking control design is also presented. Wind profiles have been obtained by means of the so-called TurbSim program, which is freely distributed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL), USA. The 3D wind profiles (wind velocity and wind direction) are easily generated when we supply some parameter values (wind mean and turbulence) to the TurbSim program. In this work, it is only used the wind profiles of the horizontal axis. A dynamic model were made based on the program YawDyn, which is also delivered by NREL. Three non-linear controls were designed to control the wind turbine yaw system: Feedback Linearization, Sliding Modes, and Backstepping whose simulations were made on the Matlab/Simulink program.

**Keywords:** wind turbine, nonlinear control techniques, TurbSim, YawDyn, yaw dynamic model.

# Índice general

1	Introducción . . . . .	1
1.1	Antecedentes . . . . .	1
1.2	Objetivos de la tesis . . . . .	3
1.2.1	Objetivo General . . . . .	3
1.2.2	Objetivos específicos . . . . .	3
1.3	Organización del documento . . . . .	3
2	Marco teórico . . . . .	5
2.1	El aerogenerador . . . . .	5
2.1.1	Componentes del aerogenerador . . . . .	7
2.2	El viento . . . . .	12
2.2.1	Energía contenida en el viento . . . . .	14
2.2.2	Distribución del viento . . . . .	15
2.2.3	Dirección del viento . . . . .	15
2.3	Sistema de orientación del aerogenerador (yaw) . . . . .	16
2.3.1	Coefficiente de potencia y par del generador . . . . .	18
2.4	Parámetros en TurbSim . . . . .	19
2.5	Energía eólica en México . . . . .	21
3	Modelado del aerogenerador . . . . .	23
3.1	Modelo por formulación de Lagrange . . . . .	23
3.1.1	Energía cinética y potencial de un sólido . . . . .	24
3.2	Modelado del sistema de orientación del aerogenerador . . . . .	26
4	Diseño de controladores . . . . .	32
4.1	Control de linealización por realimentación . . . . .	33
4.1.1	Ley de control (Seguimiento) . . . . .	34
4.1.2	Simulación del controlador por realimentación de estados . . . . .	35
4.2	Control por modos deslizantes . . . . .	39
4.2.1	Simulación del controlador por modos deslizantes . . . . .	41

4.3 Control por Backstepping . . . . .	44
4.3.1 Simulación del controlador por backstepping . . . . .	45
4.4 Resultados de simulación con señales de dirección de viento extraídas de TurbSim . . . . .	48
5 Conclusiones . . . . .	51
Bibliografía . . . . .	53

# Índice de figuras

1.1	Primer prototipo de aerogenerador horizontal (Gedser). . . . .	2
2.1	Tipos de aerogeneradores. . . . .	6
2.2	Partes de un aerogenerador de eje horizontal. . . . .	8
2.3	Aspa del aerogenerador. . . . .	8
2.4	Tipos de torres. . . . .	9
2.5	Transmisión de un aerogenerador. . . . .	10
2.6	Generador conectado a una transmisión. . . . .	12
2.7	Direcciones del viento a través de la Tierra. . . . .	13
2.8	Sistema de guiñada del aerogenerador. . . . .	17
2.9	Velocidad del viento horizontal en el eje. . . . .	21
2.10	Dirección del viento horizontal en el eje. . . . .	21
2.11	Sitios de potencial cólico en México. . . . .	22
3.1	Figura representativa del movimiento del generador considerado en el modelo . . . . .	27
3.2	Figura representativa del movimiento del generador considerado en el modelo . . . . .	27
4.1	Resultado de simulación de movimiento sinusoidal de la góndola. . . . .	36
4.2	Norma del error de posición para movimiento sinusoidal. . . . .	37
4.3	Par aplicado para movimiento sinusoidal. . . . .	37
4.4	Resultado de simulación de movimiento armónico. . . . .	38
4.5	Norma del error de posición para movimiento armónico. . . . .	38
4.6	Par aplicado para movimiento armónico. . . . .	38
4.7	Resultado de simulación de movimiento sinusoidal para guiñada. . . . .	41
4.8	Norma del error de posición para movimiento sinusoidal. . . . .	42
4.9	Par aplicado para movimiento sinusoidal. . . . .	42
4.10	Resultado de simulación de movimiento armónico en la góndola. . . . .	43
4.11	Norma del error de posición para movimiento armónica. . . . .	43

4.12	Par aplicado para movimiento armónica . . . . .	43
4.13	Resultado de simulación de movimiento sinusoidal del yaw. . . . .	46
4.14	Norma del error de posición para movimiento sinusoidal. . . . .	46
4.15	Par aplicado para movimiento sinusoidal. . . . .	46
4.16	Resultado de simulación de movimiento armónico en yaw. . . . .	47
4.17	Norma del error de posición para movimiento armónico. . . . .	47
4.18	Par aplicado para movimiento armónico. . . . .	48
4.19	Resultado de simulación de señal de viento generada por TurbSim. . . . .	49
4.20	Error de posición para señal de viento generada por TurbSim. . . . .	50
4.21	Par aplicado para señal de viento generada por TurbSim. . . . .	50

# Índice de tablas

3.1 Ecuaciones recursivas . . . . .	25
4.1 Parámetros del aerogenerador . . . . .	32
4.2 Media del error . . . . .	49

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes

Desde tiempos antiguos, el viento ha sido utilizado de diferentes maneras, mayormente en usos de molienda de granos así como en la extracción de agua para la irrigación. Conforme el tiempo avanzó, las personas han venido utilizando la fuerza del viento pacíficamente, estando probablemente su uso más importante en la propulsión de barcos utilizando velas, antes de la invención de la máquina de vapor y la máquina de combustión interna.

En el mes de julio de 1887, se desarrolló la turbina eólica para la generación de electricidad, construida por el profesor James Blyth en Glasgow, Escocia. Aunque el profesor Blyth recibió reconocimiento por sus contribuciones a la ciencia; la generación de energía eléctrica, utilizando la fuerza del viento, fue considerada desfavorable económicamente y por ende no se fabricaron más turbinas eólicas en el Reino Unido hasta el año de 1951.

A principios del siglo XX la electricidad tuvo un uso más amplio y por lo tanto, los molinos de viento se convirtieron gradualmente en turbinas eólicas dado que el rotor estaba conectado a un generador eléctrico. Las primeras redes eléctricas consistían de cables de bajo voltaje de corriente directa y presentando grandes pérdidas, por lo tanto la electricidad tenía que ser generada cerca del sitio de uso. En granjas, se hizo uso de pequeñas turbinas eólicas y en Dinamarca, Poul la Cour, quien fue uno de los primeros en conectar un molino de viento a un generador, dando inicio al concepto de agricultores eléctricos. Poul la Cour instaló uno de los primeros túneles de viento para el estudio de la aerodinámica del rotor.

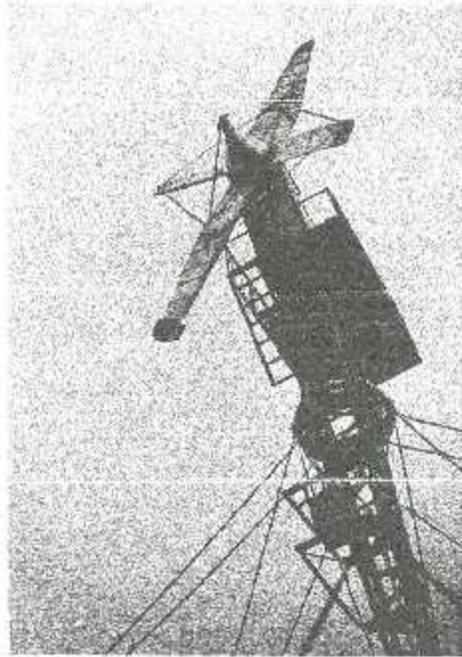


Figura 1.1: Primer prototipo de aerogenerador horizontal (Gedser).

Debido a que los generadores eléctricos a diésel y vapor tomaron un amplio mercado en la producción de la energía eléctrica, los aerogeneradores tuvieron poco uso. Al término de la segunda guerra mundial, el desarrollo de aerogeneradores más eficientes dio comienzo en países como Francia, Alemania, Reino Unido y Dinamarca. En Dinamarca, este trabajo estuvo bajo el mando de Johannes Juul, quien fue un estudiante de la Cour.

A mediados de 1950, Juul introdujo la turbina Gedser (figura 1.1), la cual contaba con un rotor regulado por entrada en pérdida aerodinámica (stall), y estaba conectada a un generador asíncrono de corriente alterna, trabajando a una velocidad casi constante.

Hoy en día, la energía eólica proporciona un 3% de la demanda global de electricidad. La capacidad instalada es de 240 GW con una tasa de crecimiento del 25% anual durante la última década. Actualmente es la principal energía renovable mundial junto a la energía hidráulica.

Los aerogeneradores modernos deben ser capaces de mantenerse conectados a la red eléctrica durante y después de fallas causadas por estrés mecánico, por lo que

diversos trabajos de investigación se efectúan día a día con el fin de hacerlos más eficientes. Entre dichos trabajos, se considera el estudio de los modelos matemáticos y algoritmos de control de los sistemas que componen la turbina eólica. El desarrollo de modelos electromecánicos se ha ido desarrollando a lo largo del tiempo, manteniendo conceptos básicos de dinámica de fluidos. El desarrollo de estos es requerido para el estudio de desempeño de controladores en diferentes condiciones.

El presente trabajo de tesis incluye el modelado dinámico del sistema de orientación (yaw) para un aerogenerador vertical, al cual se le realizaron algunas consideraciones para la simplificación del modelo así como un estudio de perfiles de viento para su implementación en simulación. El trabajo asimismo persigue el estudio y diseño de controladores no lineales para dicho sistema de orientación (yaw), con el fin de que el aerogenerador pueda darle seguimiento a la dirección del viento. Lo anterior es aplicable a aerogeneradores pequeños que no tienen control de cabeceo de las aspas, debido a que si fuese aplicado a aerogeneradores de gran capacidad, el control de cabeceo regularía la potencia del aerogenerador.

### 1.2. Objetivos de la tesis

#### 1.2.1. Objetivo General

Realizar un estudio del estado del arte de un aerogenerador con el fin de desarrollar al menos un controlador para la dinámica de orientación (yaw) de un aerogenerador.

#### 1.2.2. Objetivos específicos

1. Realizar un estudio sobre el modelado y control del sistema de orientación (yaw) de un aerogenerador.
2. Diseñar un algoritmo de control para el sistema yaw.
3. Comparar los controladores que lleguen a diseñarse para este sistema.

### 1.3. Organización del documento

La estructura del presente documento está definida de la forma siguiente:

## CAPITULO 1. INTRODUCCION

---

En el capítulo 2 se presenta el estado del arte, tratando el tema del aerogenerador, así como sus partes mecánicas y eléctricas. Se presenta también una introducción al recurso energético del viento y su interacción con el aerogenerador.

En el capítulo 3, se presenta el modelado dinámico del sistema de orientación (guiñada) del aerogenerador utilizando la formulación de Euler-Lagrange. Lo anterior está basado en modelos ya validados.

En el capítulo 4 se presentan los controladores diseñados para el sistema de orientación (guiñada) del aerogenerador. En este trabajo de tesis se diseñaron tres tipos de controladores para el seguimiento de trayectorias de viento: linealización por realimentación de estados, modos deslizantes y backstepping.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones obtenidas de este trabajo.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. El aerogenerador

Los aerogeneradores son dispositivos mecánicos diseñados específicamente para convertir parte de la energía cinética del viento en energía mecánica. Muchos diseños de aerogeneradores se han desarrollado durante el transcurso del tiempo. La mayoría de ellos, tienen como principal componente al rotor que gira gracias a las fuerzas de arrastre y de elevación de las aspas con la interacción del viento. Dependiendo de la posición del eje del rotor, los aerogeneradores son clasificados como: de eje vertical o eje horizontal.

El aerogenerador de eje vertical más exitoso es el rotor Darrieus, el cual se muestra en la figura (2.1a). Una ventaja que ofrece este aerogenerador es que el generador y la transmisión se encuentran en tierra. Otra ventaja es que el aerogenerador Darrieus puede capturar la energía del viento en cualquier dirección sin la necesidad de un mecanismo de guiñada. Aunque este aerogenerador tiene en su base al generador y a la transmisión, el mantenimiento no es simple debido a que usualmente se requiere la extracción del rotor.

Hoy en día, la mayoría de los aerogeneradores conectados a la red eléctrica son de eje horizontal, los cuales poseen de 2 a 3 aspas como se observa en la figura (2.1b).



(a) Aerogenerador de eje vertical (Darrieus).



(b) Aerogenerador de eje horizontal.

Figura 2.1: Tipos de aerogeneradores.

En un aerogenerador horizontal, el rotor es colocado en la parte superior de la torre donde el viento posee mayor energía y es menos turbulento. La torre también mantiene a la góndola, en la cual, la transmisión y el generador se encuentran ensamblados en su interior. Así mismo, posee un mecanismo de guiñada, el cual gira a la góndola y a las aspas en dirección frontal al viento para extraer la mayor cantidad de energía posible.

Aunque podría ser un sistema muy simple en aerogeneradores de baja potencia, el sistema de guiñada es uno de los componentes más complicados en aerogeneradores de alta potencia.

A continuación, se presentan las ventajas y desventajas de un aerogenerador:

### Ventajas

- El aerogenerador es energizado por un flujo natural de viento, por lo tanto puede ser considerado como una fuente de energía limpia. La energía eólica no contamina el medio ambiente a diferencia de las plantas eléctricas que dependen de la combustión de combustibles fósiles, como lo es el carbón o gas natural.
- El uso de la energía eólica para la generación de energía eléctrica es una de las tecnologías de bajo costo hoy en día.

- A nivel mundial, la energía eólica se encuentra en la mayoría de los países como un recurso doméstico, a diferencia del petróleo.

### Desventajas

- Aunque el costo de la energía eléctrica ha disminuido en los últimos 20 años, se requiere de una alta inversión inicial.
- Un desafío mayor es que el recurso del viento es intermitente y no siempre existe cuando la energía eléctrica se necesita. La energía del viento no puede ser almacenada, y no todos los parques eólicos pueden proveer la energía solicitada en el momento indicado por la demanda. La opción de utilizar bancos de baterías para el almacenamiento de la energía no es viable para aerogeneradores de gran escala.
- Muchos sitios en los cuales la energía eólica es buena, se encuentran muy alejadas de las ciudades donde la electricidad se necesita. Esto resulta en un costo extra por la necesidad de desarrollo de redes eléctricas.

### 2.1.1. Componentes del aerogenerador

Los componentes más importantes del aerogenerador son (ver figura 2.2):

#### Aspas (también llamadas "palas")

El principio básico de trabajo de las alas de los aviones y las aspas del aerogenerador es muy parecido. Aunque, como los aerogeneradores trabajan en diferentes ambientes con velocidades y direcciones de viento cambiantes, existen consideraciones especiales que no son tomadas en cuenta en el diseño de las alas de un avión pero sí en las aspas de un aerogenerador [1].

Debido al perfil aerodinámico de las aspas, una baja presión de aire es generada por encima de la superficie del asa y esto crea sustentación aerodinámica (figura 2.3). La elección de los perfiles para las aspas del aerogenerador involucra un número de compromisos, entre ellos, un control de cabeceo confiable, características de pérdida de sustentación y la habilidad de operar aún cuando existe suciedad en las aspas.

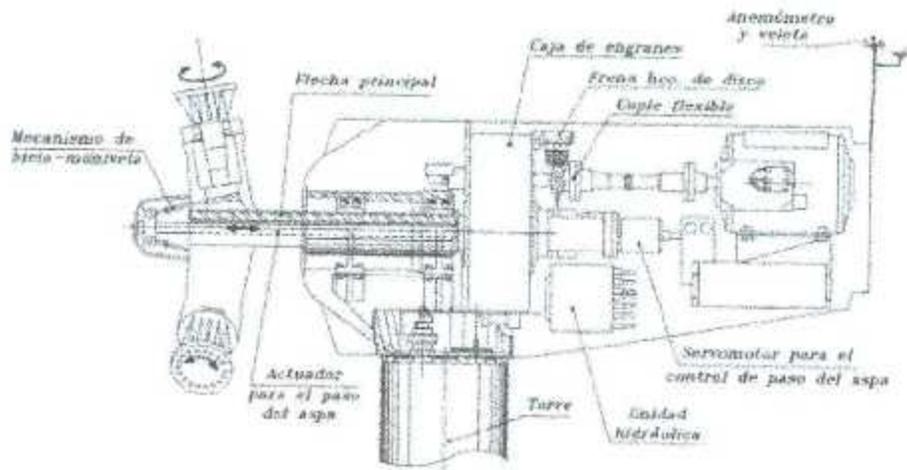


Figura 2.2: Partes de un aerogenerador de eje horizontal.

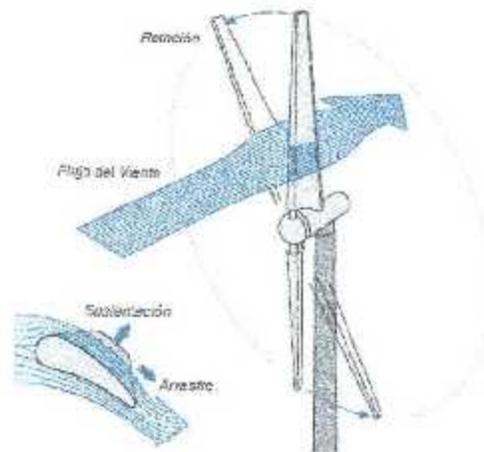


Figura 2.3: Aspa del aerogenerador.

### Torre

La torre de un aerogenerador es aquella cuya función es cargar con la góndola y las aspas. La torre necesita ser lo más alta posible, debido a que el viento incrementa con la altitud. Las torres para grandes aerogeneradores pueden clasificarse como: torres tubulares de acero, torres de concreto y enrejadas (ver figura 2.4).

- En la figura 2.4a, se muestra una torre tubular de acero, la cual es construida en secciones de 20m-30m y después ensambladas en el lugar de su instalación.

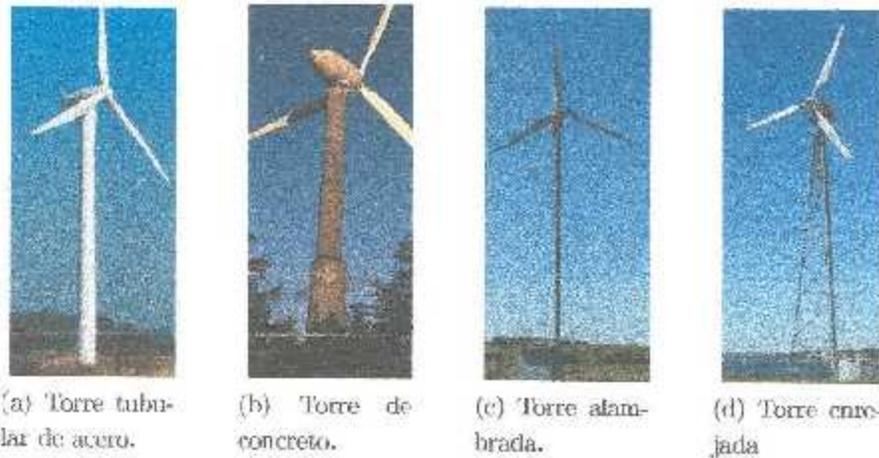


Figura 2.4: Tipos de torres.

Esta torre es cónica para aumentar su fuerza y ahorrar materiales al mismo tiempo.

- En la figura 2.4b, se muestra una torre de concreto, la cuál, con el aumento del costo en el acero, ha sido una opción viable para torres de más de 100m de altura.
- En la figura 2.4c, se muestra una torre alambrada, la cual es usada mayormente con aerogeneradores de 1 kW. Esta torre presenta una ventaja importante en el ahorro de materiales de construcción, pero ocupa una amplia área para su instalación.
- En la figura 2.4d, se muestra una torre enrejada, la cuál es fabricada soldando perfiles de acero. Su principal ventaja es su costo, debido a que sólo la mitad del material usado para la construcción de una torre tubular de acero es utilizado en la construcción de este tipo de torre.

### Transmisión

La mayoría de los aerogeneradores poseen una transmisión, la cual amplifica la velocidad que viene del eje principal y entrega una fuerza al generador a mayor velocidad. En la selección o diseño de una transmisión para un aerogenerador se busca una relación óptima entre su capacidad de carga, su tamaño y su peso.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Si un generador ordinario de 2 polos es usado sin una transmisión, y el generador se encontrara directamente conectado a la red trifásica, sería necesario que el rotor girara a 3000 rpm. Con un diámetro de 50m en las aspas implicaría que la velocidad de punta del aspa es 2 veces la velocidad del sonido, lo cual no es aceptable.

Usualmente, una velocidad de punta de más de 100 m/s no es aceptable en la industria. Una posibilidad de evitar el uso de una transmisión es utilizar un generador de corriente alterna lento con muchos polos. Si un generador se conectara directamente a la red eléctrica, se requerirá de un generador de 300 polos para llegar a una velocidad rotacional de 20 rpm.

El alto torque obtenido por parte del eje de baja velocidad del aerogenerador, puede disminuirse gracias a la transmisión, así obteniendo una alta velocidad en el eje del generador, la cual es requerida para una configuración del generador de pocos polos (figura 2.5). La transmisión en un aerogenerador no realiza cambios como en un automóvil. Normalmente tiene una relación entre la rotación de los ejes. En algunas transmisiones, esta relación es de 30-200.

### Generador

Los generadores eléctricos mayormente utilizados en los aerogeneradores han sido los generadores asíncronos, pero, debido a la reducción de costos en los sistemas eléctricos que separan la producción de energía eólica con la propia red eléctrica, se ha colocado un mayor número de generadores síncronos en los aerogeneradores. La configuración del generador dentro de la góndola es mostrado en la figura 2.6.

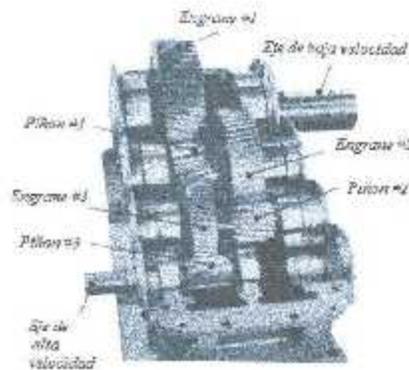


Figura 2.5: Transmisión de un aerogenerador.

### Generador asíncrono

Los generadores asíncronos son motores de inducción que se utilizan en forma inversa, haciéndolos girar a una velocidad mayor a su velocidad de sincronismo. Cuando se le hace girar por encima de su velocidad de sincronismo mediante la aplicación de un par motriz en su eje de rotación, la potencia mecánica aplicada se transforma en energía eléctrica.

Existen 2 tipos de generadores asíncronos que han sido utilizados en aerogeneradores:

- Rotor devanado
- Jaula de ardilla

Los generadores del tipo de jaula de ardilla son mayormente utilizados por su bajo costo debido al poco mantenimiento que requieren. También pueden ser conectados directamente a la línea eléctrica. Los generadores de rotor devanado no son muy utilizados en aerogeneradores, aún cuando tiene como ventaja la facilidad de implementar métodos sencillos de conexión a línea.

El aerogenerador con un generador asíncrono permite que el rotor gire libremente sin estar conectado a la línea, sólo hasta que el eje del generador alcanza una velocidad mayor que su velocidad de sincronismo, es ahí cuando el generador se conecta a la línea y comienza a producir energía eléctrica.

### Generador síncrono

Los generadores síncronos no son apropiados en un aerogenerador de velocidad constante debido a que cuando se conectan directamente a la red eléctrica, el sistema se vuelve demasiado rígido en cuanto a su relación par-velocidad.

En cuanto a velocidad constante, este generador tiende a originar cargas dinámicas que exigen una construcción robusta. Los rotores trabajan a una eficiencia menor debido a que la relación de la velocidad de punta de la aspa a la velocidad del viento varía. Debido a esto, se desarrollaron sistemas de velocidad variable, en los cuales, la velocidad de operación no está limitada por la frecuencia de la línea eléctrica. En máquinas de velocidad variable, los generadores eléctricos no se conectan directamente a la línea eléctrica, para que se le permita al rotor seguir la velocidad

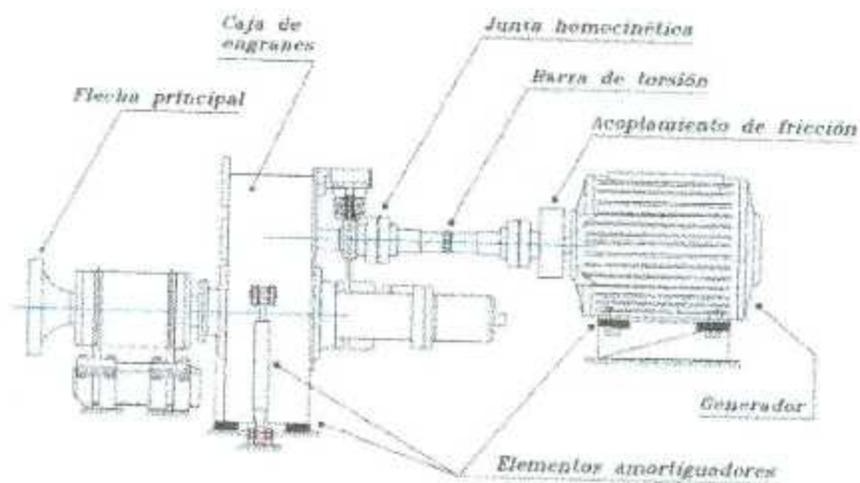


Figura 2.6: Generador conectado a una transmisión.

del viento. Las cargas dinámicas son reducidas y la eficiencia del generador aumenta.

En estos sistemas se produce electricidad de frecuencia variable, la cual hace necesario su conversión de corriente alterna a corriente directa por medio de un acondicionador electrónico de potencia, integrado con un rectificador, y un inversor para convertir la corriente directa en corriente alterna para la conexión a la red.

## 2.2. El viento

En las regiones cercanas al ecuador, en  $0^\circ$  latitud, el calor del sol impacta a la tierra con mayor intensidad que en el resto. El aire caliente es más liviano que el aire frío, éste se eleva en el cielo hasta alcanzar aproximadamente 10km de altitud y se reparte hacia el norte y el sur.

En el hemisferio norte, el viento tiende a rotar en contra de las manecillas del reloj en cuanto se aproxima a regiones de baja presión. En el hemisferio sur, el viento rota en sentido de las manecillas del reloj cerca de regiones de baja presión. Alrededor de  $30^\circ$  latitud en ambos hemisferios, la fuerza de Coriolis prevé que el aire se mueva a distancias más lejanas. En esta latitud, existe una región de alta presión, ya que el aire empieza a caer nuevamente. Como el viento se eleva desde el ecuador, existe un área de baja presión cerca de la tierra que atrae vientos que viajan desde el norte y desde el sur.



Figura 2.7: Direcciones del viento a través de la Tierra.

Estas direcciones de viento predominantes son importantes cuando se desea colocar aerogeneradores, ya que obviamente se desea colocarlos en áreas donde no existan obstáculos que el viento enfrente. En la figura 2.7 se muestra el desplazamiento del viento a través del globo.

Los vientos son influenciados por el terreno de la superficie a más de 100mts. La velocidad del viento es disminuida debido a los obstáculos que se encuentran en la superficie. Pueden existir grandes diferencias entre la dirección de los vientos globales, debido a la rotación de la Tierra, y las direcciones del viento cercanas a la superficie.

Los efectos que modifican el flujo del viento cercanos a la superficie toman una gran importancia en la producción de energía eléctrica, ya que los aerogeneradores pueden estar situados en un lugar favorable geográficamente donde los vientos son predominantes pero aun así pueden ser lentos. Dichos efectos, entre ellos, son las brisas marinas y las brisas de las montañas. Las brisas marinas ocurren cuando el sol calienta el océano, el aire sube, fluye fuera del océano, y crea baja presión al nivel del mar, el cuál atrae vientos fríos del océano.

En las regiones montañosas se muestran muchos patrones climáticos diferentes, entre ellos, cuando se origina el viento en las laderas orientadas al sur. Cuando las laderas y el viento cercano se calientan, la densidad del aire desciende, y éste desciende a la parte superior siguiendo la superficie de la ladera.

### Turbulencia

El término turbulencia está referido a las fluctuaciones en la velocidad del viento en una escala de tiempo amplia, típicamente menos de 10 minutos. La turbulencia es causada básicamente por 2 razones: la fricción con la superficie de la tierra, la cual puede representarse como perturbaciones de flujo causadas por razones topológicas, como montañas y llanuras; y efectos térmicos, los cuales pueden causar que grandes masas de aire se muevan verticalmente como resultante de variaciones de temperatura, y por ende, la densidad del aire.

El proceso de turbulencia es complejo, y el cual no puede ser representado simplemente por ecuaciones deterministas [2]. Aunque obedece ciertas leyes físicas como conservación de masa, momento y energía, es necesario tomar en cuenta la temperatura, presión, densidad y humedad así como el movimiento del aire en tres dimensiones para lograr describir la turbulencia.

#### 2.2.1. Energía contenida en el viento

El aerogenerador transforma la energía cinética del viento en energía mecánica a través del eje del rotor, y finalmente en energía eléctrica en el generador. La cantidad de energía, la cuál el viento transfiere al rotor, depende de la densidad del aire, el área del rotor, y de la velocidad del viento. [2,3]

La energía cinética del viento es caracterizada por la siguiente ecuación:

$$K_v = \frac{1}{2} \rho R^2 V_{viento}^3 \quad (2.1)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $R$  es el radio de las aspas y  $V_{viento}$  es la velocidad del viento. La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa. La energía cinética en el viento entonces depende de la densidad del aire. En otras palabras, mientras más pesado sea el aire, mayor energía será recabada por el aerogenerador. Con una presión atmosférica normal (a nivel del mar) y con 15 ° C, la densidad del aire es de 1.225 kg/m<sup>3</sup>, el cual incrementa a 1.293 kg/m<sup>3</sup> a 0 ° C, y baja a 1.163 kg/m<sup>3</sup> a 30 ° C. Además de que la densidad del aire depende de la temperatura, la densidad baja cuando la humedad es alta. En grandes altitudes, la presión del aire es baja, y por lo tanto el aire es menos denso.

### 2.2.2. Distribución del viento

La distribución del viento puede ser usada para determinar un valor estimado de cierta cantidad como lo es la energía producida. La función de probabilidad de densidad, mayormente conocida para describir la velocidad del viento, es la función de Weibull [2]. La distribución de Weibull es descrita por la siguiente función:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k} \quad (2.2)$$

donde  $k$  es un parámetro de forma de distribución.  $c$  es un parámetro de escala y  $v$  es la velocidad del viento. Entonces, la velocidad del viento estimada,  $\bar{v}$ , puede ser calculada a partir de:

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \int_0^{\infty} v f(v) dv \\ &= \frac{c}{k} \Gamma\left(\frac{1}{k}\right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

donde  $\Gamma$  es la función de Euler de gamma:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt. \quad (2.4)$$

Si se tiene el parámetro  $k = 2$ , la distribución de Weibull es mejor conocida como la distribución de Rayleigh. El factor de escalamiento  $c$  en la distribución de Rayleigh, dada la velocidad de viento media, puede encontrarse en la forma ( $k = 2, \Gamma(1/2) = \sqrt{\pi}$ )

$$c = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \bar{v} \quad (2.5)$$

### 2.2.3. Dirección del viento

El programa TurbSim, proporcionado por el laboratorio nacional de energías renovables de los Estados Unidos de America (NREL), ofrece al usuario perfiles de velocidad media de viento. Los perfiles de velocidad determinan la media de las componentes cartesianas  $x$  y  $y$  como cero. Los perfiles de dirección de viento determinan la media de viento horizontal a cierta altura. El perfil de dirección de viento es calculado utilizando el modelo de chorros de bajo nivel en planicies [4].

TurbSim utiliza una velocidad de referencia y una altura de referencia como entradas en su programa para calcular la velocidad media que impacta en el eje del aerogenerador.

### 2.3. Sistema de orientación del aerogenerador (yaw)

El sistema de guiñada del aerogenerador es utilizado para colocar el rotor de cara al viento. Un gran número de aerogeneradores horizontales utilizan actuadores de yaw, los cuales consisten de motores eléctricos y transmisiones para mantener el aerogenerador en la dirección del viento.

La figura 2.8 muestra el mecanismo de guiñada de una máquina típica de 750 kW. Se puede observar el engranaje de yaw, los ejes de los motores junto a sus transmisiones y los frenos. Un gran número de fabricantes prefieren frenar el mecanismo cuando no se encuentra en uso.

El mecanismo es activado por un controlador electrónico, el cual, mide la posición de la aleta de viento varias veces por segundo cuando el aerogenerador se encuentra activo.

Los cables que llevan la corriente del generador a la base de la torre tienden a doblarse debido a la acción del sistema de orientación. Por lo que el aerogenerador está equipado con un sensor que detecta el giro de los cables y envía la señal al controlador para reestablecer los cables.

Existe redundancia como cualquier sistema de seguridad en el aerogenerador, y, debido a esto, también está equipado con un switch para que la máquina vuelva a su origen si los cables se encuentran muy doblados [5]. Existe un error en la orientación  $\gamma_e$  si el rotor no se encuentra perpendicular a la dirección del viento, por lo que este error implica que sólo una fracción de la energía del viento se encontrará en el área de barrido de las aspas [6]:

$$\gamma_e = \cos(D_{viento} - \gamma) \quad (2.6)$$

donde  $\gamma$  es la posición de la góndola con respecto a un marco fijo y  $D_{viento}$  es la dirección del viento.

El control del yaw sería excelente para controlar la energía de entrada al aerogenerador si solo fuera la dirección del viento la que lo afectara. El mecanismo del yaw se encontraría sujeto a mayores fuerzas (torque) que el resto de rotor. Los aerogeneradores que trabajan con error en su orientación se encuentran sujetos a grandes cargas de fatiga, a diferencia de los aerogeneradores que trabajan de manera

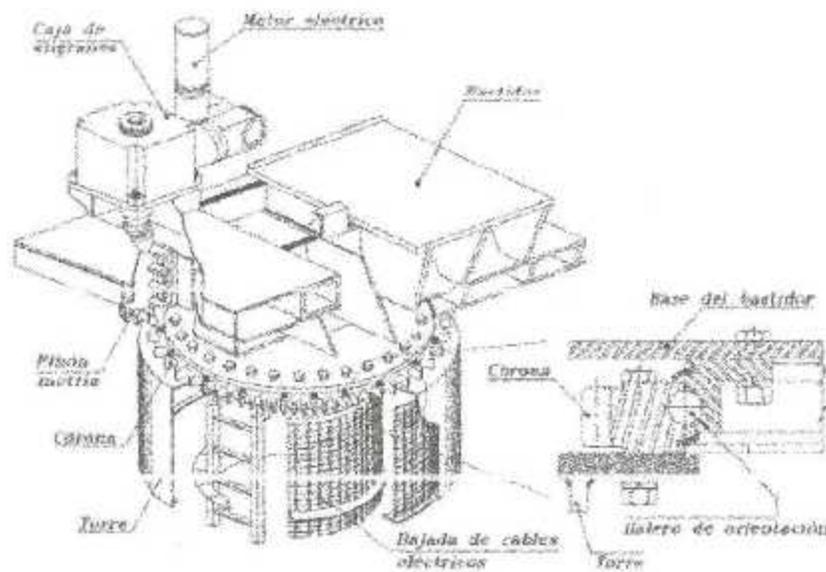


Figura 2.8: Sistema de guiñada del aerogenerador.

perpendicular a la dirección del viento.

Para crear un área de rotor efectiva, se multiplica la energía cinética del viento (2.1) por el coseno del error de orientación (2.6), obteniendo así una energía cinética como se ve en [6, 7]:

$$K_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{viento}^3 \cos(D_{viento} - \gamma) \quad (2.7)$$

### Otras cargas

Un rotor real está sujeto a diferentes fuentes de cargas; entre ellas, la masa, el centro de gravedad y las diferencias en ángulo de cabeceo son unas de las fuentes de gran interés [2, 7].

#### Masa no balanceada

Si las aspas del rotor no se encuentran perfectamente alineadas, entonces, las fuerzas centrífugas causarán momentos en yaw. La fuerza centrífuga al centro de masa será una fuerza en el plano, la cual, rota a la velocidad del rotor.

#### Desbalanceo en cabeceo

Si la carga se presenta en el rotor, el cual está cuidadosamente balanceado en su peso, es muy probable que sea a causa de un desbalance aerodinámico. Las diferencias en el cabeceo de aspas o en la distribución de giro son comúnmente

a causa de un desbalance aerodinámico. Si una de las aspas es colocada en un ángulo de cabeceo diferente a las otras, una carga cíclica se generará en el rotor.

### Cabeceo cíclico

Es otra fuente de carga, la cual resulta de la construcción imperfecta del rotor. Un rotor con controles de cabeceo o un rotor tambaleante, puede tener variaciones cíclicas no planificadas en las aspas.

#### 2.3.1. Coeficiente de potencia y par del generador

La potencia generada por el aerogenerador está en relación con la energía cinética del viento ( $K_v$ ), la cual depende del coeficiente de potencia ( $C_P$ ) para así obtener la siguiente expresión [1-3, 8]:

$$P_v = C_P K_v \quad (2.8)$$

El coeficiente de potencia es único para cada turbina, el cual es el rendimiento de éste y expresa qué fracción de la potencia total que posee el viento incidente es realmente capturada por el rotor del aerogenerador para ser transformada en energía rotacional cuyo máximo valor teórico es el límite de Betz (0.5926) [1, 2, 9], y puede ser escrito como:

$$C_P(\lambda, \beta_{pitch}) = c_1 \left( c_2 \frac{1}{\Delta} - c_3 \beta_{pitch} - c_4 \beta_{pitch}^{c_5} - c_6 \right) e^{-c_7 \frac{1}{\Delta}} \quad (2.9)$$

donde  $\beta_{pitch}$  es el ángulo de alabeo, y  $\lambda$  es la relación de velocidad de aspa definida como:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_{viento}} \quad (2.10)$$

y

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{1}{\lambda + c_8 \beta_{pitch}} - \frac{c_9}{1 + \beta_{pitch}^3} \quad (2.11)$$

donde  $\omega$  es la velocidad del rotor y  $c_1 \dots c_9$  son las constantes características para cada turbina.

Ahora, resolviendo para  $C_P(\lambda, \beta_{pitch})$ :

$$C_P = -c_1 \left( c_6 + \beta c_2 + \beta^{c_5} c_4 + \frac{c_2}{c_9 - \beta c_8 + \beta^3 - \frac{V_{viento}}{R\omega}} \right) e^{\left( \frac{-c_7}{c_9 - \beta c_8 - \beta^3 - \frac{V_{viento}}{R\omega}} \right)} \quad (2.12)$$

Para el cálculo del par aerodinámico (par en el rotor), se toma (2.8) y se realiza la siguiente operación [9-16]:

$$T_a = \frac{P_r}{\lambda} \quad (2.13)$$

## 2.4. Parámetros en TurbSim

A continuación se presentan algunos de los parámetros utilizados para generar perfiles de dirección de viento en el programa computacional TurbSim.

### Ley de potencia de perfil de viento

El perfil de velocidad media de potencia utiliza el parámetro PLExp para calcular la velocidad media a una altura  $h$  utilizando las siguientes ecuaciones:

$$PLExp = \frac{\ln\left(\frac{\bar{v}(h_{max})}{\bar{v}(h_{min})}\right)}{\ln\left(\frac{h_{max}}{h_{min}}\right)} \quad (2.14)$$

$$\bar{v}(h) = \bar{v}(h_{ref}) \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^{PLExp} \quad (2.15)$$

donde  $\bar{v}(h)$  es la velocidad media en  $h$ ,  $h_{ref}$  es la altura de referencia,  $h_{max}$  es la altura máxima de medida y  $h_{min}$  es la altura mínima de medida. El parámetro PLExp es usado para calcular la media de velocidad del componente  $v$  (velocidad del viento horizontal al aerogenerador) que cruza el disco del rotor.

### RICH\_NO: Número de gradiente de Richardson

El parámetro RICH\_NO corresponde a la estabilidad vertical de la turbina, dada por el número de gradiente adimensional de Richardson, el cual es definido como:

$$RICH\_NO = \frac{g}{v} \frac{\partial \psi}{\partial h} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial h}\right)^{-2} \quad (2.16)$$

donde  $g$  es la aceleración gravitacional,  $h$  es la altura desde la superficie y  $v$  es la velocidad del viento. La variable  $\psi$  representa el potencial de temperatura, la cual es calculada usando la media del absoluto de la temperatura del aire,  $T$ , y la presión atmosférica,  $p$ :

$$\psi = T \left(\frac{1000}{p}\right)^{0.286} \quad (2.17)$$

El parámetro  $RICH\_NO$  es usado para calcular el espectro de velocidad y los perfiles de JET y LOG de viento, escalas de estructuras coherentes, y para determinar los valores predeterminados para muchos parámetros de entrada.

#### UStar: Velocidad promedio de fricción del rotor

El parámetro  $UStar$  es la fricción de velocidad de corte,  $v_c$ , promedio sobre el disco del rotor:

$$\begin{aligned} UStar &= \bar{v}_* \\ &= \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \sqrt{|v'w'|_i} \end{aligned} \quad (2.18)$$

donde las cantidades primas indican la fluctuación longitudinal ( $u$ ) y la vertical ( $w$ ) de componentes de viento medidos en puntos ( $n_p$ ) del disco del rotor. El modelo de chorros de bajo nivel en planicies (GP\_LLJ), el cual escala el espectro de velocidad con velocidades de fricción locales, asume que  $UStar$  es la velocidad de fricción media en tres puntos del perfil  $v_*$ : uno en el eje, otro por debajo del rotor y otro por encima del rotor.

$UStar$  es usado para escalar el espectro de velocidad de modelos espectrales diferentes al de la Comisión Internacional de Electromecánica (IEC), para escalar los perfiles de velocidad del JET y H2L [4], y para calcular los valores predeterminados de entrada.

#### Perfil de corriente de viento en chorro

Utilizando las mediciones de un sistema meteorológico para medir las dispersiones de ondas acústicas (SODAR), se deriva el perfil de viento en chorro. Este perfil es especial debido a que no sólo genera perfiles de velocidad de viento, sino también de dirección. El perfil de viento en chorro está definido utilizando los polinomios de Chebyshev,

$$\bar{v}(h) = \sum_{n=0}^{10} c_n T_n(h), \quad (2.19)$$

donde  $h$  es la altura con respecto a la superficie,  $\bar{v}(h)$  es la velocidad media del viento con respecto a la altura  $h$ ,  $T_n$  es el orden del polinomio de Chebyshev y  $c_n$  es el coeficiente de Chebyshev. Los coeficientes de Chebyshev son:

$$c_n = c_{1,n} \bar{v}_{ZJdMax} + c_{2,n} RICH\_NO + c_{3,n} UStar + c_{4,n}. \quad (2.20)$$

En las figuras (2.9 y 2.10) se muestran los perfiles de velocidad y dirección del viento horizontal obtenido a través del programa TurbSim, utilizando el modelo de la Comisión Internacional de Electromecánica, desarrollado por Theodore von Kármán, utilizando los perfiles de viento en chorro [4].

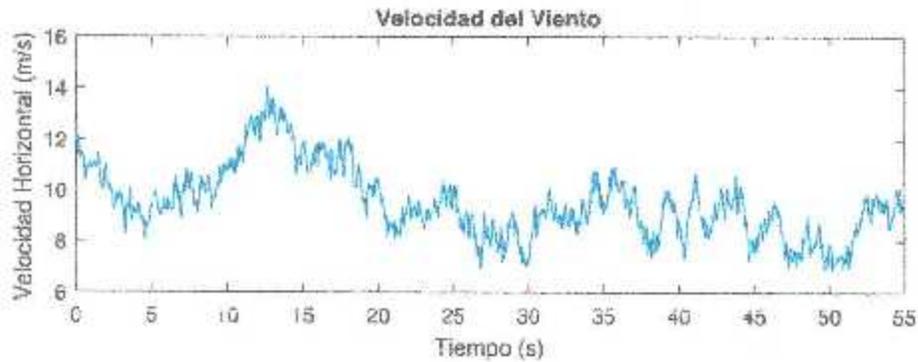


Figura 2.9: Velocidad del viento horizontal en el eje.

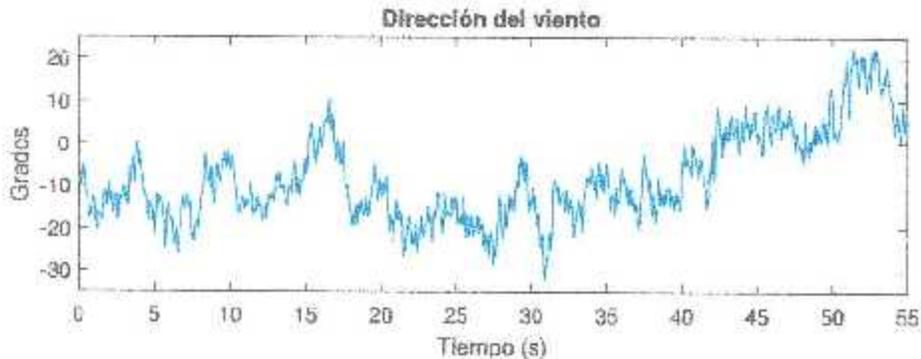


Figura 2.10: Dirección del viento horizontal en el eje.

## 2.5. Energía eólica en México

En México se han realizado investigaciones del recurso energético eólico a nivel exploratorio, de reconocimiento y de pequeñas redes climatológicas realizadas por parte de entidades federales mexicanas, las cuales han servido para confirmar la factibilidad de áreas para establecer centrales eólicas [17]. En la figura (2.11) se muestran las zonas con potencial eólico de México.

En [18], se realizó un análisis por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)



## Capítulo 3

# Modelado del aerogenerador

En este capítulo, se diseña un modelo dinámico para el sistema de orientación, tomando en consideración dos grados de libertad: el sistema de orientación y el generador. Visto de esta manera, el aerogenerador puede ser interpretado como un robot manipulador de dos grados de libertad, cuyo extremo del robot es actuado por la fuerza del viento. Dicho esto, el modelo del sistema de orientación tomará los movimientos giroscópicos del generador para su modelado.

### 3.1. Modelo por formulación de Lagrange

La formulación Euler-Lagrange describe el comportamiento de un sistema dinámico en términos de trabajo y la energía almacenada en el sistema, en vez de las fuerzas y momentos de los miembros individuales involucrados. Las fuerzas de restricción comprometidas en el sistema quedan automáticamente eliminadas en las ecuaciones dinámicas obtenidas por este método. Las ecuaciones dinámicas de forma cerrada pueden ser derivadas sistemáticamente en cualquier sistema de coordenadas.

La función Lagrangiana de un robot manipulador está definida como la energía cinética del sistema menos su energía potencial:

$$L = K_{robot} - U_{robot} \quad (3.1)$$

donde:

- $k_{robot}$  es la energía cinética total del robot
- $u_{p\ robot}$  es la energía potencial total del robot

Esta función se aplica para determinar las ecuaciones de movimiento de Lagrange del manipulador. Si se considera que el robot es de  $n$  grados de libertad, tales ecuaciones son expresadas como:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.2)$$

donde:

- $L$  es la función lagrangiana del robot
- $q_i$  es la  $i$ -ésima variable articular.
- $\tau_i$  es la fuerza generalizada que actúa en el  $i$ -ésimo eslabón del robot.

### 3.1.1. Energía cinética y potencial de un sólido

La energía cinética de un sólido en movimiento está dada por:

$$K = \frac{1}{2} v_G^T l + \frac{1}{2} \Omega^T h_G \quad (3.3)$$

donde:

- $v_G$  es la velocidad del centro de masa del sólido
- $l$  es el momento lineal del sólido ( $l = m v_G$ , siendo  $m$  la masa)
- $\Omega$  es la velocidad angular
- $h_G$  es el momento angular del sólido respecto a su centro de masa ( $h_G = I \Omega$ , siendo  $I$  la matriz de inercia del sólido referida a un marco ortogonal unido al sólido, con origen en su centro de masa)

La energía potencial gravitatoria de un sólido se define como el trabajo que realiza el peso del cuerpo al desplazar su centro de masa hasta un plano de referencia normal a la aceleración de la gravedad, partiendo desde una cierta altura respecto a dicho plano. Para alturas relativamente pequeñas en comparación con el radio de la tierra, esta energía se determina mediante

$$u_p = w d \quad (3.4)$$

donde  $w$  es la magnitud del peso del sólido y  $d$  es la altura de su centro de masa respecto al plano de referencia.

Tabla 3.1: Ecuaciones recursivas

Ecuación
Para $i = 2, 3, \dots, n$ :
${}^i p_{i-1,i} = R_{i-1}^{i-1} p_{i-1,i}$
${}^i \Omega_{i-1} = R_{i-1}^{i-1} \Omega_{i-1}$
${}^i v_{oi-1} = R_{i-1}^{i-1} v_{oi-1}$
Para $n = 1, 2, \dots, n$ :
${}^i \Omega_i = {}^i \Omega_{i-1} + \dot{\theta}_i z_i$
${}^i v_{oi/i-1} = \dot{r}_i z_i$
${}^i v_{oi} = {}^i v_{oi-1} + {}^i v_{oi/i-1} + {}^i \Omega_{i-1} \times {}^i p_{i-1,i}$
${}^i v_{Gi} = {}^i v_{oi} + {}^i \Omega_i \times {}^i c_i$

$\dot{r}_i = \ddot{r}_i = 0$  si la articulación  $i$  es de revolución.

### Esquema recursivo para el cálculo de velocidades y aceleraciones

Con el fin de minimizar el número de operaciones en el cálculo de las velocidades y aceleraciones concernientes a un eslabón, todos los vectores que intervienen en las ecuaciones obtenidas deben proyectarse en el marco de referencia asociado al eslabón.

Esto significa que en la iteración  $i$  de un proceso recursivo, es necesario transformar las componentes de los vectores requeridos para referirlos al marco  $i$ . En la tabla 3.1 se representa el algoritmo completo para el cálculo de las velocidades y aceleraciones, incluyendo las transformaciones de coordenadas que se necesiten a partir de la segunda iteración.

Todo superíndice izquierdo en un vector denota el marco en el cual se proyectan sus componentes. Bajo este esquema es necesario conocer el vector  $q$  de la configuración instantánea del manipulador, así como sus derivadas primera y segunda respecto al tiempo.

donde:

${}^i p_{i-1,i}$  = Vector de posición

${}^i \Omega_{i-1}$  = Velocidad angular

${}^i v_{oi-1}$  = Velocidad del origen con respecto al marco del eslabón

${}^i v_{oi/i-1}$  = Velocidad aparente = 0 (si el eslabón  $i$  es de revolución)

${}^i v_{oi}$  = Velocidad del eslabón

${}^i v_{G_i}$  = Velocidad del centro de masa

### 3.2. Modelado del sistema de orientación del aerogenerador

A continuación, se desarrolla el modelo dinámico por medio de ecuaciones recursivas de cinemática para el modelado dinámico inverso [21–23].

Para este caso, el aerogenerador se considera como un sistema de 2 grados de libertad, despreciando el aleteo de las aspas y la torsión de la torre hacia el viento en contra, visto en [3, 7, 24–26].

Para las coordenadas del centro de masa, se tiene:

$${}^1 e_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad {}^2 e_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \text{cm} \end{bmatrix}$$

donde  ${}^1 e_1$  es el vector de posición del centro de masa de guiñada, la cual se encuentra en las mismas coordenadas del marco fijo, referido a él mismo, y el  ${}^2 e_2$  es el vector de posición del centro de masa (cm) del rotor.

Las matrices de inercia referidas a sus ejes principales son:

$$I_1^1 = \begin{bmatrix} I_{1x} & 0 & 0 \\ 0 & I_{1y} & 0 \\ 0 & 0 & I_{1z} \end{bmatrix} \quad I_2^2 = \begin{bmatrix} I_{2x} & 0 & 0 \\ 0 & I_{2y} & 0 \\ 0 & 0 & I_{2z} \end{bmatrix}$$

Las matrices de rotación vistas desde la perspectiva de la figura 3.2 :

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\text{sen}(\gamma) & 0 \\ \text{sen}(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(\omega) & -\text{sen}(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ \text{sen}(\omega) & \cos(\omega) & 0 \end{bmatrix}$$

y

$$p_{0,1}^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad p_{0,1}^2 = \begin{bmatrix} 0 & r_2 & 0 \end{bmatrix}$$

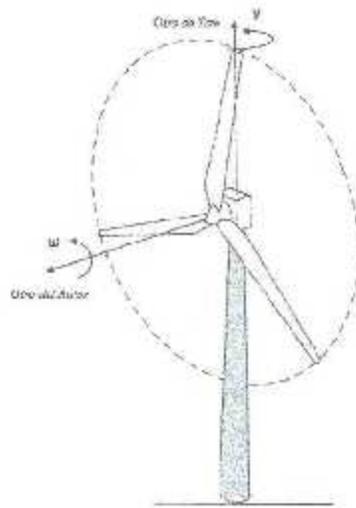


Figura 3.1: Figura representativa del movimiento del generador considerado en el modelo

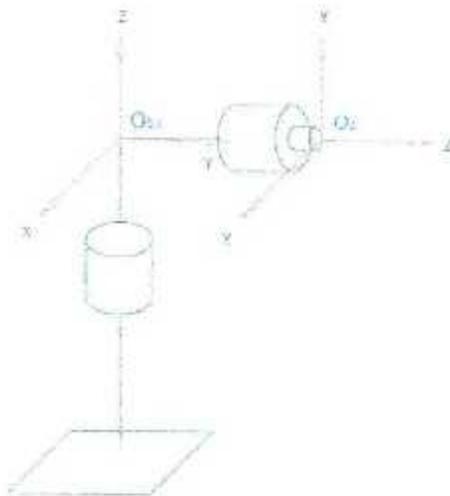


Figura 3.2: Figura representativa del movimiento del generador considerado en el modelo

Entonces, siguiendo el cuadro 3.1 a partir de la velocidad angular del primer

### CAPITULO 3. MODELADO DEL AEROGENERADOR

eslabón (velocidad angular del sistema de orientación), se obtiene que:

$$\omega_1^1 = \omega_0^1 + \dot{\theta}_1 z_1^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix}$$

$$V o_{1/0}^1 = \dot{r}_1 z_1^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V o_1^1 = V o_0^1 + V o_{1/0}^1 + \omega_0^1 \times p_{0,1}^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_{G1}^1 = V o_1^1 + \omega_1^1 \times e_1^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$p_{1,2}^2 = R_1^2 p_{1,2}^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_2 \end{bmatrix}$$

Continuando con las iteraciones del cuadro 3.1 para el segundo eslabón, se empieza calculando la velocidad angular de éste con respecto al eslabón anterior ( $\omega_1^2$ ), entonces:

$$\omega_1^2 = R_1^2 \omega_1^1 = \begin{bmatrix} \frac{\dot{\gamma} \sin(\omega)}{\cos(\omega)^2 + \sin(\omega)^2} \\ \frac{\dot{\gamma} \cos(\omega)}{\cos(\omega)^2 + \sin(\omega)^2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V o_1^2 = R_1^2 V o_1^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\omega_2^2 = \omega_1^2 + \dot{\theta}_2 z_2^2 = \begin{bmatrix} \frac{\dot{\gamma} \sin(\omega)}{\cos(\omega)^2 + \sin(\omega)^2} \\ \frac{\dot{\gamma} \cos(\omega)}{\cos(\omega)^2 + \sin(\omega)^2} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix}$$

$$V_{o_{2/1}}^2 = \dot{r}_2 z_2^2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_{o_2}^2 = V_{o_1}^2 + V_{o_{2/1}}^2 + \omega_1^2 \times p_{1,2}^2 = \begin{bmatrix} \frac{r_2 \dot{\gamma} \text{sen}(\omega)}{\cos(\omega)^2 + \text{sen}(\omega)^2} \\ -\frac{r_2 \dot{\gamma} \cos(\omega)}{\cos(\omega)^2 + \text{sen}(\omega)^2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_{G2}^2 = V_{o_2}^2 + \omega_2^2 \times e_2^2 = \begin{bmatrix} \dot{\gamma} \cos(\omega)(cm + r_2) \\ -\dot{\gamma} \text{sen}(\omega)(cm + r_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

donde:

- $\omega$  = Posición del rotor
- $\dot{\omega}$  = Velocidad del rotor
- $\ddot{\omega}$  = Aceleración del rotor
- $\gamma$  = Posición de la gondola
- $\dot{\gamma}$  = Velocidad de la gondola
- $\ddot{\gamma}$  = Aceleración de la gondola

### Solución mediante la formulación de Lagrange

La energía cinética para la gondola es:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{1}{2} {}^1V_{G1}^T {}^1l_1 + \frac{1}{2} {}^1\Omega_1^T {}^1h_{G1} \\ &= \frac{1}{2} I_{1x} \dot{\gamma}^2 \end{aligned} \tag{3.5}$$

donde:

$${}^1l_1 = m_1 {}^1V_{G1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^1h_{G1} = {}^1I_1 {}^1\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_{1x} \dot{\gamma} \end{bmatrix}$$

La energía cinética para el rotor es:

$$\begin{aligned}
 K_2 &= \frac{1}{2} {}^2V_{G2}^T {}^2I_2 {}^2V_{G2} + \frac{1}{2} {}^2\Omega_2^T {}^2h_{G2} {}^2\Omega_2 \\
 &= \frac{1}{2} (\dot{\gamma}^2 m_2 (cm + r_2)^2) + \frac{1}{2} (I_{2y} \dot{\gamma}^2 + I_{2z} \dot{\omega}^2 + I_{2x} \dot{\gamma}^2 \sin(\omega)^2 - I_{2y} \dot{\gamma}^2 \sin(\omega)^2)
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

donde:

$${}^2I_2 = m_2 {}^4V_{G2} = \begin{bmatrix} m_2 \dot{\gamma} \cos(\omega) (cm + r_2) \\ -m_2 \dot{\gamma} \sin(\omega) (cm + r_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^2h_{G2} = {}^2I_2 {}^2\Omega_2 = \begin{bmatrix} I_{2x} \dot{\gamma} \sin(\omega) \\ I_{2x} \dot{\gamma} \cos(\omega) \\ I_{2z} \dot{\omega} \end{bmatrix}$$

donde se tiene que el Lagrangiano es:

$$\begin{aligned}
 L &= K_1 + K_2 \\
 L &= \frac{1}{2} I_{1x} \dot{\gamma}^2 + \frac{1}{2} (\dot{\gamma}^2 m_2 (cm + r_2)^2) \\
 &\quad + \frac{1}{2} (I_{2y} \dot{\gamma}^2 + I_{2z} \dot{\omega}^2 + I_{2x} \dot{\gamma}^2 \sin(\omega)^2 - I_{2y} \dot{\gamma}^2 \sin(\omega)^2)
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Entonces, resolviendo las ecuaciones de Euler-Lagrange para guiñada:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial \dot{\gamma}} &= 0 \\
 \frac{\partial L}{\partial \dot{\gamma}} &= I_{2y} \dot{\gamma} + I_{1x} \dot{\gamma} + I_{2x} \dot{\gamma} \sin(\omega)^2 - I_{2y} \dot{\gamma} \sin(\omega)^2 + \dot{\gamma} m_2 (cm + r_2)^2 \\
 \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\gamma}} \right) &= \dot{\omega} (2 I_{2x} \dot{\gamma} \cos(\omega) \sin(\omega) - 2 I_{2y} \dot{\gamma} \cos(\omega) \sin(\omega)) \\
 &\quad + \ddot{\gamma} (I_{2y} + I_{1x} + m_2 (cm + r_2)^2 + I_{2x} \sin(\omega)^2 - I_{2y} \sin(\omega)^2)
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Por lo tanto la fuerza generalizada en el sistema de orientación, sin tener en cuenta el efecto de fricción es:

$$\begin{aligned}
 \tau_{\dot{\gamma}} &= \dot{\omega} (2 I_{2x} \dot{\gamma} \cos(\omega) \sin(\omega) - 2 I_{2y} \dot{\gamma} \cos(\omega) \sin(\omega)) \\
 &\quad + \ddot{\gamma} (I_{2y} + I_{1x} + m_2 (cm + r_2)^2 + I_{2x} \sin(\omega)^2 - I_{2y} \sin(\omega)^2)
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Sumando el término de la fricción, entonces se tiene:

$$\begin{aligned}
 \tau_{\dot{\gamma}} &= \dot{\omega} (2 I_{2x} \dot{\gamma} \cos(\omega) \sin(\omega) - 2 I_{2y} \dot{\gamma} \cos(\omega) \sin(\omega)) \\
 &\quad + \ddot{\gamma} (I_{2y} + I_{1x} + m_2 (cm + r_2)^2 + I_{2x} \sin(\omega)^2 - I_{2y} \sin(\omega)^2) \\
 &\quad + F_{vy} \dot{\gamma}
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

### CAPÍTULO 3. MODELADO DEL AEROGENERADOR

Entonces, resolviendo las ecuaciones de Euler-Lagrange para el rotor resulta:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \omega} &= \frac{\dot{\gamma}^2 \operatorname{sen}(2\omega) (I_{2x} - I_{2y})}{2} \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{\omega}} &= I_{2z} \dot{\omega} \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\omega}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \omega} &= \ddot{\omega} I_{2z} - \frac{\dot{\gamma}^2 \operatorname{sen}(2\omega) (I_{2x} - I_{2y})}{2} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Por lo tanto la fuerza generalizada en el rotor, sin tener en cuenta el efecto de fricción da:

$$\tau_{\omega} = \ddot{\omega} I_{2z} - \frac{\dot{\gamma}^2 \operatorname{sen}(2\omega) (I_{2x} - I_{2y})}{2} \quad (3.12)$$

Sumando el término de la fricción, se tiene que:

$$\tau_{\omega} = \ddot{\omega} I_{2z} - \frac{\dot{\gamma}^2 \operatorname{sen}(2\omega) (I_{2x} - I_{2y})}{2} + F_{\text{fr}} \dot{\omega} \quad (3.13)$$

Despejando las aceleraciones de (3.10) y (3.13) se obtiene:

$$\ddot{\gamma} = \frac{\tau_{\gamma} - F_{\text{fr}} \dot{\gamma} - I_{2x} \dot{\gamma} \dot{\omega} \operatorname{sen}(2\omega) + I_{2y} \dot{\gamma} \dot{\omega} \operatorname{sen}(2\omega)}{I_{2x} + I_{1x} + cm^2 m_2 + m_2 r_2^2 - I_{2x} \cos(\omega)^2 + I_{2y} \cos(\omega)^2 + 2 cm m_2 r_2} \quad (3.14)$$

$$\ddot{\omega} = \frac{\tau_{\omega} - F_{\text{fr}} \dot{\omega} + \frac{I_{2x} \dot{\gamma}^2 \operatorname{sen}(2\omega)}{2} - \frac{I_{2y} \dot{\gamma}^2 \operatorname{sen}(2\omega)}{2}}{I_{2z}} \quad (3.15)$$

De manera que el par en el rotor es representado como el par aerodinámico visto en [6, 9-11, 27-29], por lo tanto la ecuación (2.13) es sustituida en (3.15):

$$\ddot{\omega} = \frac{T_a - F_{\text{fr}} \dot{\omega} + \frac{I_{2x} \dot{\gamma}^2 \operatorname{sen}(2\omega)}{2} - \frac{I_{2y} \dot{\gamma}^2 \operatorname{sen}(2\omega)}{2}}{I_{2z}} \quad (3.16)$$

Reemplazando  $x_1 = \omega$ ,  $x_2 = \dot{\omega}$ ,  $x_3 = \gamma$ ,  $x_4 = \dot{\gamma}$  y  $\tau_{\gamma} = u$  se puede obtener una representación en ecuaciones de estado:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ T_a - F_{\text{fr}} x_2 + \frac{x_4^2 \operatorname{sen}(2x_1) (I_{2x} - I_{2y})}{2} \\ x_4 \\ \frac{-F_{\text{fr}} x_4 - I_{2x} x_4 x_3 \operatorname{sen}(2x_1) + I_{2y} x_4 x_3 \operatorname{sen}(2x_1)}{I_{2x} + I_{1x} + cm^2 m_2 + m_2 r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2 cm m_2 r_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{I_{2x} + I_{1x} + cm^2 m_2 + m_2 r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2 cm m_2 r_2} \end{bmatrix} u \quad (3.17)$$

## Capítulo 4

### Diseño de controladores

El presente capítulo trata sobre el diseño de controladores para el sistema de orientación del aerogenerador. Las técnicas de control diseñadas fueron: Linealización por realimentación, Modos deslizantes, y Backstepping. Los resultados obtenidos en simulación de dichos controladores se muestran primero sin perturbaciones de viento y después, considerando perturbaciones de viento, utilizando los parámetros en el cuadro 4.1 vistos en [6].

Parámetros	Valor
Diámetro del rotor	6.17 [m]
Altura de la torre	37 [m]
Masa de la góndola	260.5 [kg]
Masa de las aspas	10.84 [kg]
Número de aspas	3
Potencia de guiñada	12 [kw]
Inercia de guiñada	38.91 [kgm <sup>2</sup> ]
Inercia del generador	25 [kgm <sup>2</sup> ]
Coefficiente de fricción viscosa	$6.3e^{-1}$ [Nms/rad]

Tabla 4.1: Parámetros del aerogenerador

Tomando en consideración la referencia [6] y suponiendo que la góndola gira a 5 revoluciones por minuto, podemos suponer que el par máximo soportado por el actuador es de 235 [Nm].

### 4.1. Control de linealización por realimentación

La linealización por realimentación [30] es un método de diseño por el cual se transforma de forma parcial o total, la dinámica no lineal del sistema a controlar en una dinámica lineal.

El hecho de obtener una dinámica resultante lineal, permite aplicar técnicas de diseño de controladores lineales para estabilizar el sistema en lazo cerrado en un valor deseado. Para realizar el diseño del controlador, se considera el sistema del aerogenerador (3.17) de manera que:

$$\dot{x} = f(x) - g(x)u$$

y procediendo con el primer paso del diseño, se define la ecuación de salida como  $y = x_3$ , por lo que utilizando la derivada de Lie se tiene:

$$\begin{aligned} h(x) &= x_3 \\ L_f h(x) &= \frac{\partial h}{\partial x} f(x) = [0 \ 0 \ 1 \ 0] f(x) = x_2 \\ L_g h(x) &= \frac{\partial h}{\partial x} g(x) = [0 \ 0 \ 1 \ 0] g(x) = 0 \end{aligned}$$

Como en  $L_g h(x) = 0$ , no se encuentra la presencia de control  $u$ , se sigue con el proceso hasta que  $L_g L_f^{r-1} \neq 0$ :

$$\begin{aligned} L_f^2 h(x) &= \frac{\partial L_f h}{\partial x} f(x) = [0 \ 0 \ 0 \ 1] f(x) \\ &= \frac{-F_{xy} x_4 - I_{2x} x_4 x_2 \operatorname{sen}(2x_1) + I_{2y} x_4 x_2 \operatorname{sen}(2x_1)}{I_{2x} + I_{1z} + cm^2 m_2 + m_2 r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2cm m_2 r_2} \\ L_g L_f h(x) &= \frac{\partial L_f h}{\partial x} g(x) = [0 \ 0 \ 0 \ 1] g(x) \\ &= \frac{1}{I_{2x} + I_{1z} + cm^2 m_2 - m_2 r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2cm m_2 r_2} \end{aligned}$$

Calculando las derivadas de salida, se obtiene:

$$\begin{aligned} y &= h(x) = x_3 \\ \dot{y} &= L_f h(x) + L_g h(x)u = x_2 \\ \ddot{y} &= L_f^2 h(x) + L_g L_f h(x)u = (\cdot) + (\cdot)u \end{aligned}$$

Por lo tanto, se confirma que el sistema tiene un grado relativo 2. Debido a que el sistema es de grado relativo  $r = 2$  con  $n = 4$ , se debe completar la transformación

de coordenadas.

Se tiene que:

$$\begin{aligned} z_1 &= \phi_1(x) = h(x) = x_3 \\ z_2 &= \phi_2(x) = L_f h(x) = x_4 \end{aligned}$$

Se debe encontrar  $z_3 = \phi_3(x)$  y  $z_4 = \phi_4$  tal que  $\frac{\partial \phi_3(x)}{\partial x} g(x) = 0$  y  $\frac{\partial \phi_4(x)}{\partial x} g(x) = 0$ . Se propone que  $\phi_3 = x_1$  y  $\phi_4 = -x_2$ .

Verificando la singularidad de la matriz Jacobiana

$$\frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

se puede comprobar por simple inspección que no es singular. Resolviendo la inversa de  $\Phi(x)$ , se tiene que:

$$\begin{aligned} x_1 &= z_3 \\ x_2 &= -z_4 \\ x_3 &= z_1 \\ x_4 &= z_2 \end{aligned}$$

En las nuevas coordenadas, se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= a(z) + b(z)u = L_f^2 h(x) + L_g L_f h(x)u \\ &= \frac{u - F_{xy} x_4 - I_{2x} x_4 x_2 \sin(2x_1) + I_{2y} x_1 x_2 \sin(2x_1)}{I_{2x} + I_{1z} + cm^2 m_2 + m_2 r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2cm m_2 r_2} \\ \dot{z}_3 &= -z_4 - x_2 \\ \dot{z}_4 &= \frac{T_a - F_{xy} x_2 + \frac{I_{2x} x_4^2 \sin(2x_1)}{2} - \frac{I_{2y} x_4^2 \sin(2x_1)}{2}}{I_{2z}} \end{aligned}$$

#### 4.1.1. Ley de control (Seguimiento)

Se tiene una ley de control dada por [30]-[34]:

$$u = a(x) + b(x)[-K(-\Phi_2(x) - R) + y_R^{(r)}] \quad (4.1)$$

Realizando las operaciones requeridas se tiene:

$$a(x) = \frac{-L_f^2 h(x)}{L_g L_f h(x)} = x_4 (F_{vy} + I_{2x} x_2 \operatorname{sen}(2x_1) - I_{2y} x_2 \operatorname{sen}(2x_1))$$

$$b(x) = \frac{1}{L_g L_f h(x)} = I_{1x} + I_{1z} + cm^2 m_2 + m_2 r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2cmm_2 r_2$$

y  $\Phi_2$  son todas las  $\phi_i$  hasta  $r = 2$ , por lo tanto:

$$\begin{aligned} u &= a(x) + b(x)[-K(\Phi_2(x) - R) + y_H^{(r)}] \\ &= x_4 (F_{vy} + I_{2x} x_2 \operatorname{sen}(2x_1) - I_{2y} x_2 \operatorname{sen}(2x_1)) \\ &\quad + \left[ (I_{1x} + I_{1z} + cm^2 m_2 + m_2 r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2cmm_2 r_2) \right. \\ &\quad \left. (-K(\Phi_2(x) - R) + y_H^{(r)}) \right] \\ &= x_4 (F_{vy} + I_{2x} x_2 \operatorname{sen}(2x_1) - I_{2y} x_2 \operatorname{sen}(2x_1)) \\ &\quad + \left[ (I_{1x} + I_{1z} + cm^2 m_2 + m_2 r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2cmm_2 r_2) \right. \\ &\quad \left. (-K_1(x_3 - r) - K_2(x_4 - \dot{r}) + \ddot{r}) \right] \end{aligned} \tag{4.2}$$

Tomando como errores:

$$\begin{aligned} e_1 &= x_3 - r \\ e_2 &= \dot{e}_1 \\ &= \dot{x}_3 - \dot{r} \\ &= x_4 - \dot{r} \end{aligned}$$

Entonces nuestra señal de control es:

$$\begin{aligned} u &= x_4 (F_{vy} + I_{2x} x_2 \operatorname{sen}(2x_1) - I_{2y} x_2 \operatorname{sen}(2x_1)) \\ &\quad + \left[ (I_{1x} + I_{1z} + cm^2 m_2 + m_2 r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2cmm_2 r_2) \right. \\ &\quad \left. (-K_1(e_1) - K_2(e_2) + \ddot{r}) \right] \end{aligned}$$

#### 4.1.2. Simulación del controlador por realimentación de estados

En esta sección se mostrarán los resultados para el control de realimentación de estados en simulación. Se realizaron 2 pruebas en donde la referencia será la señal

de dirección de viento. Se utilizará una referencia sinusoidal para la posición de:

$$\begin{aligned} r &= \frac{1}{6} \sin\left(\frac{t}{12\pi}\right) \\ \dot{r} &= \frac{\pi \cos\left(\frac{\pi t}{12}\right)}{72} \\ \ddot{r} &= \frac{\pi^2 \text{sen}\left(\frac{\pi t}{12}\right)}{864} \end{aligned}$$

En la figura 4.1, se toma como referencia una señal sinusoidal para el seguimiento de trayectoria. Se logra observar un muy aceptable seguimiento para este tipo de señal. El error de seguimiento es mostrado en la figura 4.2, donde se observa la evolución del error a través del tiempo, en el cual su máximo valor logra alcanzar un grado. En el caso de la fuerza ejercida en la orientación, se observa en la figura 4.3 que el torque se mantiene dentro de los límites aceptados por el actuador, con un máximo par de 89 [Nm].

Se analizan los errores de cada simulación utilizando la norma  $L_2$  del error cuya ecuación es:

$$|\varepsilon| = \sqrt{e^2}$$

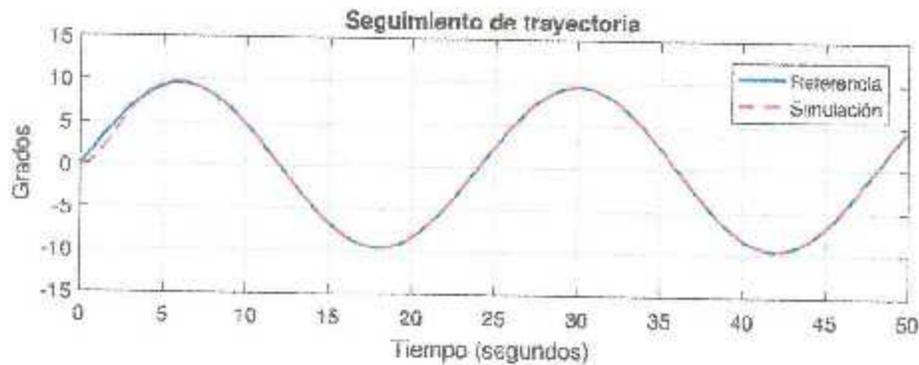


Figura 4.1: Resultado de simulación de movimiento sinusoidal de la gondola.



Figura 4.2: Norma del error de posición para movimiento sinusoidal.



Figura 4.3: Par aplicado para movimiento sinusoidal.

Ahora utilizando un movimiento armónico como señal de referencia, se tiene que:

$$r = \frac{0.392}{2} \left( 1 - \cos \left( \frac{\pi t}{20} \right) \right)$$

$$\dot{r} = \frac{\pi 0.392}{40} \left( \sin \left( \frac{\pi t}{20} \right) \right)$$

$$\ddot{r} = \frac{\pi^2 0.392}{800} \left( \cos \left( \frac{\pi t}{20} \right) \right)$$

En la figura 4.4 se observa cómo la trayectoria sigue a la señal armónica sin ningún problema desde un inicio, debido a que la velocidad y la aceleración de dicha señal son de naturaleza cicloidal. El error de posición del orientación del aerogenerador visto en la figura 4.5 es muy pequeño, llegando a fracciones de milésimas de grados. El esfuerzo realizado por el actuador de orientación del aerogenerador visto en la figura 4.6 es menor debido a que el movimiento es suave.

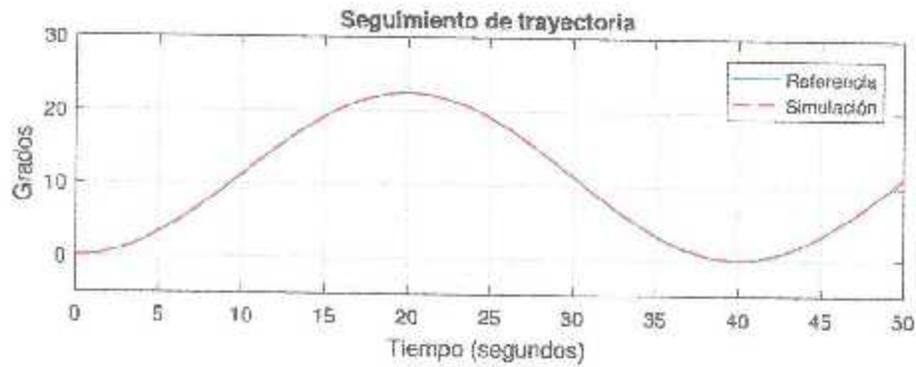


Figura 4.4: Resultado de simulación de movimiento armónico.

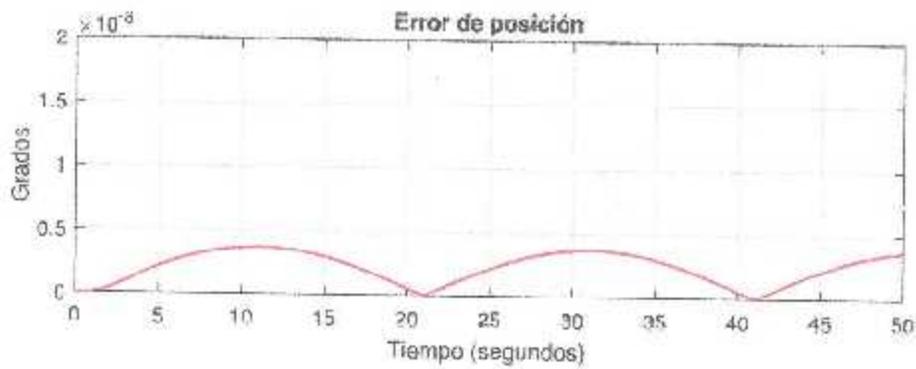


Figura 4.5: Norma del error de posición para movimiento armónico.



Figura 4.6: Par aplicado para movimiento armónico.

## 4.2. Control por modos deslizantes

En el control por modos deslizantes, las trayectorias son forzadas a seguir una variedad deslizante en un tiempo finito y que permanezcan en la variedad para todo tiempo futuro. El movimiento dentro de la variedad es independiente del apareamiento de las incertidumbres paramétricas [35]. Al utilizar un modelo de orden reducido, la variedad deslizante es diseñada para alcanzar los objetivos de control.

El sistema visto en la ecuación (3.17) tiene un grado relativo  $\rho = 2$  con  $n = 4$ , debido a que  $\rho \neq n$ , se requieren funciones  $\eta$  para completar la transformación, por lo tanto el sistema no tiene linealización exacta, y tomando los términos de  $\xi$ , se tiene que [30, 35]:

$$\begin{aligned}\xi_1 &= h(x) \\ \xi_2 &= L_f h(x) \\ \dot{\xi}_1 &= \xi_2 \\ \dot{\xi}_2 &= L_f^2 h(x) + L_g L_f h(x)u\end{aligned}$$

Realizando las derivadas de Lie, se obtiene ahora:

$$\begin{aligned}h(x) &= x_3 \\ L_f h(x) &= \frac{\partial h}{\partial x} f(x) = [0 \ 0 \ 1 \ 0] f(x) = x_4 \\ L_g h(x) &= \frac{\partial h}{\partial x} g(x) = [0 \ 0 \ 1 \ 0] g(x) = 0 \\ L_f^2 h(x) &= \frac{\partial L_f h}{\partial x} f(x) = [0 \ 0 \ 0 \ 1] f(x) \\ &= \frac{-F_{vy}x_4 - I_{2x}x_4x_2 \operatorname{sen}(2x_1) + I_{2y}x_4x_2 \operatorname{sen}(2x_1)}{I_{2x} + I_{1z} + cm^2m_2 + m_2r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2cm m_2 r_2} \\ L_g L_f h(x) &= \frac{\partial L_f h}{\partial x} g(x) = [0 \ 0 \ 0 \ 1] g(x) \\ &= \frac{1}{I_{2x} + I_{1z} + cm^2m_2 + m_2r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2cm m_2 r_2}\end{aligned}$$

Entonces:

$$\begin{aligned}\xi_1 &= x_3 = y \\ \xi_2 &= x_4 \\ \dot{\xi}_1 &= \xi_2 \\ \dot{\xi}_2 &= \frac{-F_{vy}x_4 - I_{2x}x_4x_2 \operatorname{sen}(2x_1) + I_{2y}x_4x_2 \operatorname{sen}(2x_1) + u}{I_{2x} + I_{1z} + cm^2m_2 + m_2r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2cm m_2 r_2}\end{aligned}$$

Luego, tomando los errores  $e = \xi - \mathcal{R}$ , se tiene:

$$\mathcal{R} = \begin{bmatrix} r(t) \\ \dot{r}(t) \end{bmatrix} \quad e = \begin{bmatrix} \xi_1 - r(t) \\ \xi_2 - \dot{r}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$$

$$e_1 = x_3 - r = y - r$$

$$e_2 = x_4 - \dot{r}$$

$$\dot{e}_1 = e_2$$

$$\dot{e}_2 = \frac{-F_{vy}x_4 - I_{2x}x_4x_2 \sin(2x_1) + I_{2y}x_4x_2 \cos(2x_1) + u}{I_{2x} + I_{1z} + cm^2m_2 + m_2r_2^2 - I_{2x}\cos(x_1)^2 + I_{2y}\cos(x_1)^2 + 2cm m_2 r_2} - \ddot{r}$$

Para lograr el objetivo de control de seguimiento, se propone  $e_p$  para estabilizar el origen (en este caso, el error de posición), haciendo que  $e_2 = -(k_1 e_1)$ , donde  $k_1$  se elige de manera que el polinomio  $s + k_1$  sea Hurwitz, (Que los polos se encuentren en el semiplano izquierdo del plano complejo) en este caso  $k_1 > 0$ . Luego, la variedad deslizante estará dada por:

$$\begin{aligned} s &= (k_1 e_1) + e_2 = 0 \\ &= k_1(x_3 - r) + x_4 - \dot{r} \end{aligned}$$

y la derivada de la variedad deslizante es:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= k_1 \dot{e}_1 + \dot{e}_2 = 0 \\ &= k_1(x_4 - \dot{r}) + H \end{aligned} \quad (4.3)$$

donde:

$$H = \frac{-F_{vy}x_4 - I_{2x}x_4x_2 \sin(2x_1) + I_{2y}x_4x_2 \cos(2x_1) + u}{I_{2x} + I_{1z} + cm^2m_2 + m_2r_2^2 - I_{2x}\cos(x_1)^2 + I_{2y}\cos(x_1)^2 + 2cm m_2 r_2} - \ddot{r}$$

#### Ley de control (seguimiento)

Se calcula la ley de control como propuesta en [30]:

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{L_g L_f^{p-1} h(x)} [L_f^p h(x) - r^{(p)}(t)] + v \\ &= v - k_1(x_4 - \dot{r}) \\ &\quad + H (I_{2x} + I_{1z} + cm^2m_2 + m_2r_2^2 - I_{2x}\cos(x_1)^2 + I_{2y}\cos(x_1)^2 + 2cm m_2 r_2) \end{aligned} \quad (4.4)$$

## CAPÍTULO 4. DISEÑO DE CONTROLADORES

Substituyendo la ecuación (4.4) en (4.3) se tiene que :

$$\dot{\delta} = \frac{v}{I_{2x} + I_{1z} + cm^2 m_2 + m_2 r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2 cm m_2 r_2}$$

Usando  $v$  como propuesta en [28]:

$$v = -(\beta_0 + I_{2x} + I_{1z} + cm^2 m_2 + m_2 r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2 cm m_2 r_2) \operatorname{sgn}(s)$$

Finalmente, la entrada de control queda definida como:

$$u = -H (I_{2x} + I_{1z} + cm^2 m_2 + m_2 r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2 cm m_2 r_2) - k_1(c_2) - v \quad (4.5)$$

### 4.2.1. Simulación del controlador por modos deslizantes

Utilizando una señal sinusoidal como referencia, de igual manera como se utilizó en el controlador de linealización por realimentación, se tiene que:

$$\begin{aligned} r &= \frac{1}{6} \operatorname{sen}\left(\frac{t}{12\pi}\right) \\ \dot{r} &= \frac{\pi \cos\left(\frac{t}{12}\right)}{72} \\ \ddot{r} &= -\frac{\pi^2 \operatorname{sen}\left(\frac{t}{12}\right)}{864} \end{aligned}$$

En la figura 4.7 se observa cómo la trayectoria sigue a la señal deseada, estabilizando a partir de los 8 segundos, con un error máximo de 1.7 grados, cuya gráfica se muestra en la figura 4.8. El esfuerzo del actuador de orientación tiene como valor máximo 96 [Nm] tal como se muestra en la figura 4.9.

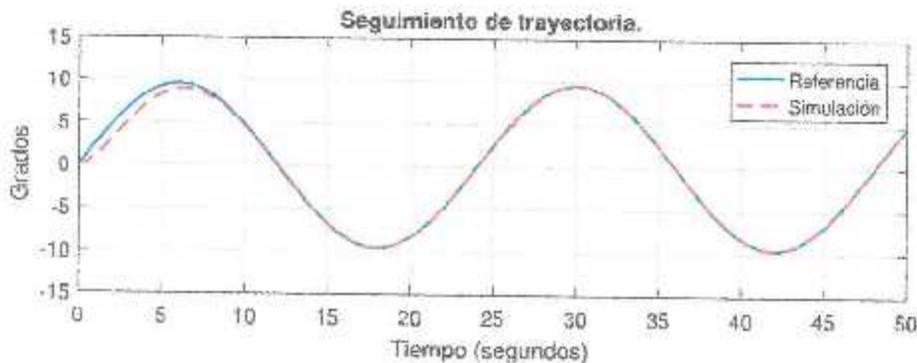


Figura 4.7: Resultado de simulación de movimiento sinusoidal para guiñada.



Figura 4.8: Norma del error de posición para movimiento sinusoidal.



Figura 4.9: Par aplicado para movimiento sinusoidal.

Ahora, utilizando un movimiento armónico, como señal de referencia de la misma manera que se utilizó en el control de linealización por realimentación, se tiene que:

$$r = \frac{0.392}{2} \left( 1 - \cos \left( \frac{\pi t}{20} \right) \right)$$

$$\dot{r} = \frac{\pi 0.392}{40} \left( \sin \left( \frac{\pi t}{20} \right) \right)$$

$$\ddot{r} = \frac{\pi^2 0.392}{800} \left( \cos \left( \frac{\pi t}{20} \right) \right)$$

En la figura 4.10 se observa cómo la trayectoria sigue a la señal armónica sin ningún problema desde el inicio de la simulación. Sin embargo, en esta simulación, el error de seguimiento de orientación del aerogenerador presenta un chattering, debido a la naturaleza del controlador por modos deslizantes [30], visto en la figura 4.11.

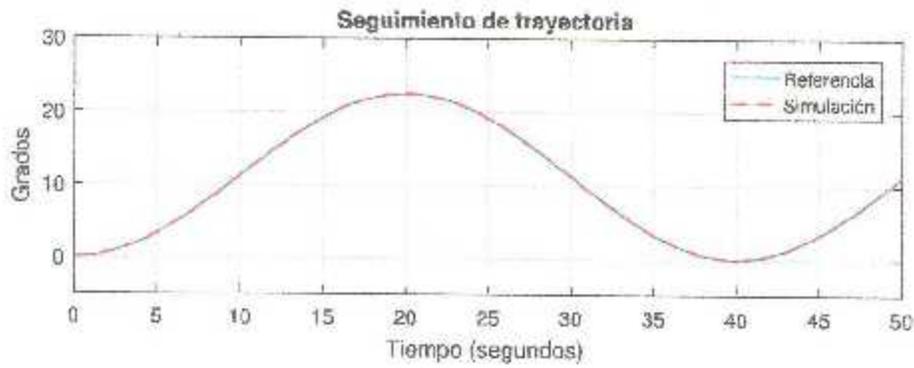


Figura 4.10: Resultado de simulación de movimiento armónico en la gondola.

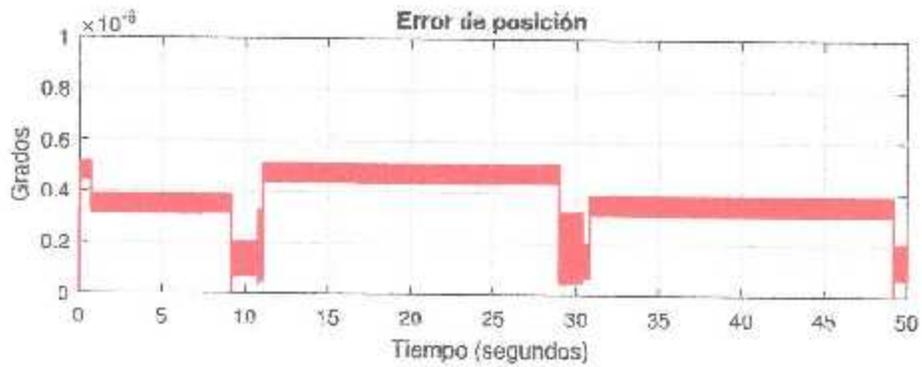


Figura 4.11: Norma del error de posición para movimiento armónica.

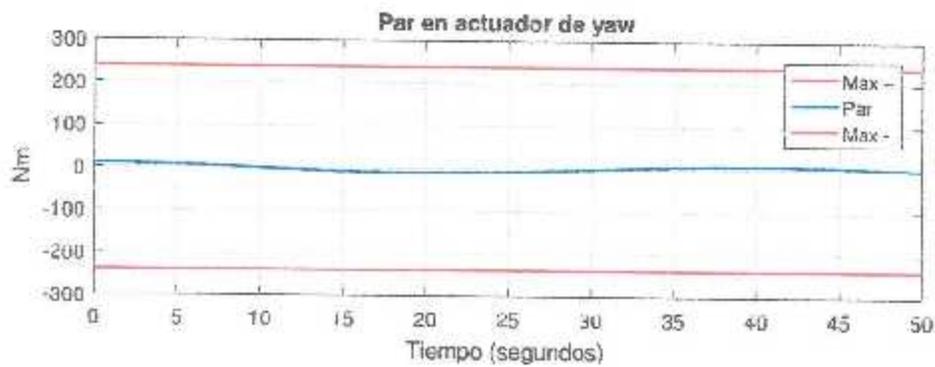


Figura 4.12: Par aplicado para movimiento armónica

### 4.3. Control por Backstepping

El backstepping es una técnica recursiva que combina la elección de una función de Lyapunov con el diseño de un control de realimentación. Esta técnica descompone el problema original en una secuencia de problemas de diseño para sistemas de orden reducido. El backstepping a menudo puede resolver problemas de estabilización, seguimiento y control robusto bajo condiciones menos restrictivas que las encontradas en otros métodos.

La combinación de la teoría de control de Lyapunov y el control backstepping garantiza la estabilidad de un sistema en lazo cerrado, así como su buen desempeño. Para realizar el controlador por backstepping, las ecuaciones del sistema son primeramente descompuestas en subsistemas de menor orden. El controlador backstepping tiene una estructura recursiva, por lo que en cada paso, una función de Lyapunov y una ley de control virtual son creadas para cada subsistema. Como paso final, todas las leyes de control son integradas y una función Lyapunov es introducida, la cuál satisface la estabilidad de todo el sistema.

El subsistema de orientación del aerogenerador es tomado de la ecuación (3.17) y queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{-F_{iy} x_4 - I_{2x} x_4 x_2 \sin(2x_1) + I_{2y} x_4 x_2 \cos(2x_1)}{I_{2x} + I_{1z} + cm^2 m_2 + m_3 r_2^2 - I_{3x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2cm m_2 r_2} \end{aligned} \quad (4.6)$$

#### Ley de control (seguimiento)

Utilizando el método de backstepping para diseñar una ley de control que garantice una trayectoria deseada, se define el error de seguimiento:

$$z_1 = x_{3d} - x_3 \quad (4.7)$$

Definiendo una función de Lyapunov, definida positiva y para la cual su derivada con respecto al tiempo sea definida negativa o semi definida negativa:

$$V(z_1) = \frac{1}{2} z_1^2$$

con su derivada:

$$\begin{aligned} \dot{V}(z_1) &= z_1 \dot{z}_1 \\ &= z_1 (\hat{x}_{3d} - x_4) \end{aligned}$$

Considerando como control virtual a  $x_4$  para generar estabilidad en  $z_1$ , se tiene que:

$$x_4 = \dot{x}_{3d} + \alpha_1 z_1 \quad (4.8)$$

donde  $\alpha_1$  es definida positiva, así se garantiza que la derivada de la función de Lyapunov propuesta sea definida negativa, esto es:

$$\dot{V}(z_1) = -\alpha_1 z_1^2 \quad (4.9)$$

Utilizando una función de Lyapunov donde se puedan combinar los estados  $x_3$  y  $x_4$ , generado de (4.8), la nueva variable  $z_2$  es:

$$z_2 = x_4 - x_{3d} - \alpha_1 z_1 \quad (4.10)$$

donde para eliminar el nuevo error generado, se propone la siguiente función de Lyapunov

$$V(z_1, z_2) = \frac{1}{2}(z_1^2 + z_2^2) \quad (4.11)$$

y su derivada temporal queda definida como:

$$\dot{V} = -\alpha_1 z_1^2 + z_2(\dot{x}_4(u) - \ddot{x}_{3d} - \alpha_1 \dot{z}_1) \quad (4.12)$$

Con una ley de control:

$$u = (-2\alpha_2 z_2 + \frac{\xi}{\zeta} - (\alpha_1^2 z_1) + \dot{z}_1)\xi \quad (4.13)$$

donde:

$$\begin{aligned} \xi &= I_{2x} + I_{1z} + cm^2 m_2 + m_2 r_2^2 - I_{2x} \cos(x_1)^2 + I_{2y} \cos(x_1)^2 + 2 cm m_2 r_2 \\ \zeta &= -Fvr x_4 - (I_{2x} x_4 x_2 \operatorname{sen}(2x_1)) + (I_{2y} x_4 x_2 \operatorname{sen}(2x_1)) \end{aligned}$$

Con una señal de control (4.13), se obtiene que:

$$\dot{V}(z_1, z_2) = -\alpha_1 z_1^2 - \alpha_2 z_2^2 \quad (4.14)$$

donde el término  $\alpha_2 z_2$ , con  $\alpha_2$  definido positivo, se añade para estabilizar  $z_1$ .

### 4.3.1. Simulación del controlador por backstepping

Utilizando una señal sinusoidal como referencia, de igual manera como se utilizó en el controlador de linealización por realimentación, se tiene que:

$$\begin{aligned} r &= \frac{1}{6} \operatorname{sen}\left(\frac{t}{12\pi}\right) \\ \dot{r} &= \frac{\pi \cos\left(\frac{\pi t}{12}\right)}{72} \\ \ddot{r} &= -\frac{\pi^2 \operatorname{sen}\left(\frac{\pi t}{12}\right)}{864} \end{aligned}$$

## CAPÍTULO 4. DISEÑO DE CONTROLADORES

En la figura 4.13 se observa cómo la trayectoria sigue a la señal deseada, estabilizando a partir de los 3 segundos, con un error máximo de 1 grado en guiñada, cuya gráfica se muestra en la figura 4.14. El esfuerzo del actuador de orientación tiene como valor máximo 133 [Nm] tal como se muestra en la figura 4.15.

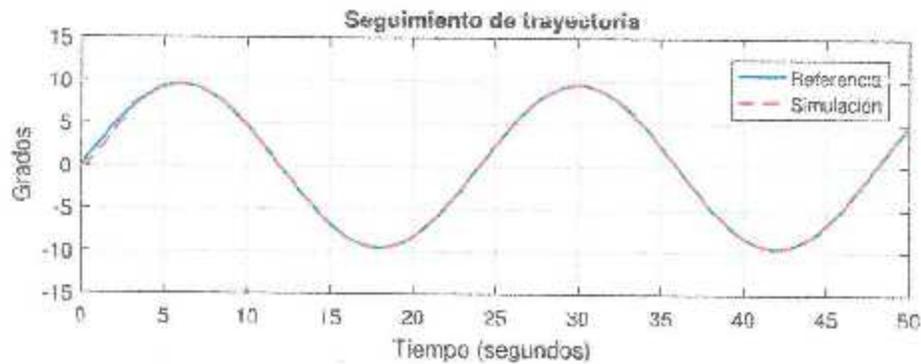


Figura 4.13: Resultado de simulación de movimiento sinusoidal del yaw.



Figura 4.14: Norma del error de posición para movimiento sinusoidal.



Figura 4.15: Par aplicado para movimiento sinusoidal.

## CAPÍTULO 4. DISEÑO DE CONTROLADORES

Ahora, utilizando un movimiento armónico como señal de referencia, de la misma manera que se utilizó en el control de linealización por realimentación, se tiene que:

$$\begin{aligned}r &= \frac{0.392}{2} \left( 1 - \cos \left( \frac{\pi t}{20} \right) \right) \\ \dot{r} &= \frac{\pi 0.392}{40} \left( \text{sen} \left( \frac{\pi t}{20} \right) \right) \\ \ddot{r} &= \frac{\pi^2 0.392}{800} \left( \cos \left( \frac{\pi t}{20} \right) \right)\end{aligned}$$

En la figura 4.16 se observa cómo la trayectoria sigue a la señal armónica sin ningún problema desde el inicio de la simulación. Con un error insignificante visto en la figura 4.17 menor a un nano grado.



Figura 4.16: Resultado de simulación de movimiento armónico en yaw.

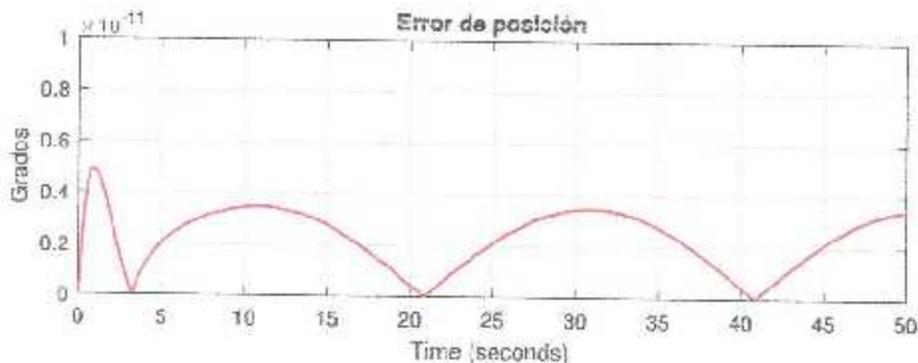


Figura 4.17: Norma del error de posición para movimiento armónico.

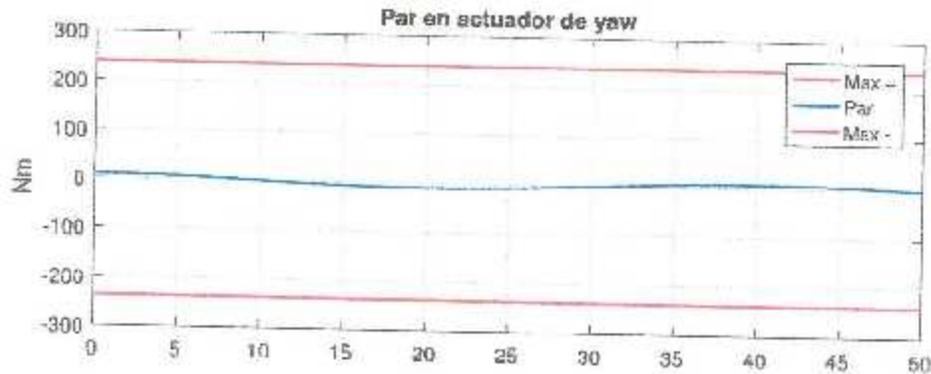


Figura 4.18: Par aplicado para movimiento armónico.

#### 4.4. Resultados de simulación con señales de dirección de viento extraídas de TurbSim

Para el perfil de dirección y velocidad de viento, visto en las figuras 2.9 y 2.10 y creadas en el programa llamado TurbSim, proporcionado por el laboratorio nacional de energías renovables (NREL). Debe mencionarse que el parámetro introducido en dicho programa fue la velocidad media del viento, la cual es 9 [m/s], con una máxima turbulencia de 15%. La señal de dirección de viento fue filtrada por un filtro pasabajas y se obtuvo la derivada numérica para crear la velocidad y aceleración.

En la figura 4.19, se pueden observar los 3 controladores diseñados, los cuales fueron: linealización por realimentación (L.R), Modos deslizantes (M.D) y el controlador por backstepping (BS). En la figura 4.20 se muestran los errores de seguimiento de trayectoria para los 3 controladores diseñados, donde el controlador por linealización por realimentación alcanza un máximo de 2.5 grados, el control por modos deslizantes un máximo de 2 grados, y finalmente el controlador por backstepping con un máximo de 4.3 grados.

En el caso del esfuerzo aplicado al sistema de orientación del aerogenerador, el control por linealización por realimentación alcanza un máximo torque de 180 [Nm] a lo largo de toda la simulación creada. Por otra parte, el control por modos deslizantes muestra un máximo par de 190 [Nm], y por último, el control por backstepping, se muestra más amigable con el actuador, debido a que el par exigido por él, es más consistente entre las fluctuaciones de dirección de viento, alcanzando un máximo par de 183 [Nm].

CAPÍTULO 4. DISEÑO DE CONTROLADORES

Controlador	Error medio (grados)
Control de linealización por realimentación	1.1661
Control por modos deslizantes	0.8336
Control por backstepping	1.4963

Tabla 4.2: Media del error

En la tabla 4.2 se muestra la media del error de posición para los 3 controladores calculado para toda la simulación, cuya ecuación es:

$$e_m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |e|^2} \quad (4.15)$$

donde  $N$  es el número de muestras y  $e$  es el error del controlador.

El resultado de la simulación presenta como conclusión que, el control por backstepping presenta mejores características para preservar la salud del actuador debido a que el torque aplicado en el sistema de guiñada es mas suave y con esfuerzos menos pronunciados, a diferencia de los otros controladores estudiados. Considerando el estudio de los esfuerzos presentados en el actuador de guiñada, como objetivo principal de esta prueba, se concluye que el controlador por backstepping presenta un mejor desempeño.

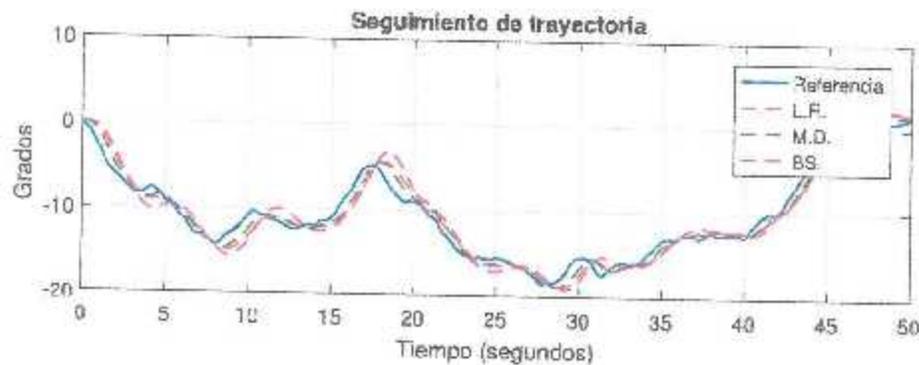


Figura 4.19: Resultado de simulación de señal de viento generada por TurbSim.

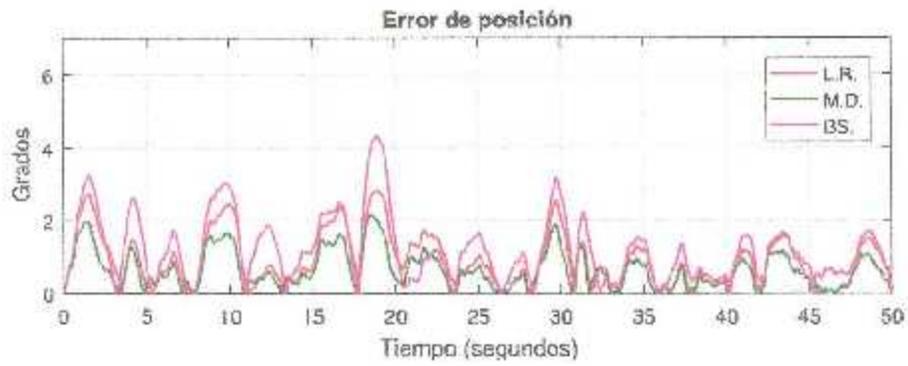


Figura 4.20: Error de posición para señal de viento generada por TurbSim.



Figura 4.21: Par aplicado para señal de viento generada por TurbSim.

## Capítulo 5

### Conclusiones

Hoy en día, el desarrollo, investigación e innovación de tecnologías para la generación de energía alternas se encuentra en crecimiento continuo a nivel mundial. Con los altos niveles de  $CO_2$  producidos por la generación de energía mediante combustibles fósiles, se ha tomado conciencia de la contaminación producida, incrementándose el interés por el desarrollo de nuevas formas de generación eléctrica en los últimos 40 años.

Por lo tanto, el trabajo desarrollado en esta tesis contribuye con el estudio del aprovechamiento de la energía del viento para los sistemas de generadores eólicos con sistemas de guiñada.

Con la investigación realizada en este trabajo de tesis, la cual consiste en el estudio de controladores para el sistema de guiñada de un aerogenerador, se logra concluir que el sistema no necesita de un modelo complejo para la dinámica de guiñada, ya que en la literatura y trabajos estudiados, el modelo consta de una función de transferencia para describir el comportamiento de éste, haciendo énfasis para el caso de control. Por lo tanto, se desarrolló un modelado matemático para la dinámica de guiñada tomando en cuenta que el aerogenerador puede ser visto como un sistema de 2 grados de libertad rígido.

Para la generación de perfiles de viento, se utilizó el programa TurbSim que proporciona el laboratorio nacional de energías renovables (NREL) de los Estados Unidos de América. Dicho programa puede trabajar en conjunto con otros programas desarrollados por dicho laboratorio como el AeroDyn y el YayDyn, los cuales son utilizados para la investigación y desarrollo de tecnologías.

El objetivo de esta tesis es el estudio de controladores para el sistema de guiñada de un aerogenerador, por lo tanto, la dinámica eléctrica es despreciada del modelado del aerogenerador, así como el actuador de cabeceo de las aspas y así también, el modelo del sistema de reducción de velocidad, obteniéndose al final, un modelo que considera al sistema de orientación desacoplado del sistema total. Se estudiaron 3 controladores no lineales: linealización por realimentación, modos deslizantes y backstepping, de los cuales se concluye que para el caso de las señales sinusoidales y armónicas, el error de seguimiento del controlador backstepping es el mejor en su caso.

Aún cuando el propósito de los controladores es que sigan la señal de dirección de viento en su totalidad, hay que tomar en cuenta que en el caso real, el sistema de guiñada presenta grandes esfuerzos para mover la góndola en dirección al viento, por ello, los muestreos de dirección de viento en el caso real se realizan haciendo estimaciones y estudios de campo para preservar la salud de los rodamientos de dicho sistema, ya que realizar el mantenimiento del aerogenerador presentaría mayores costos si éste tiende a realizarse con mayor frecuencia, además de que el generador tendría que apagarse para realizarlo.

## Bibliografía

- [1] W. H. M. J., *Introduction to Wind Energy Systems*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009.
- [2] N. J. Tony Burton, David Sharpe, *Wind Energy Handbook*. West Sussex, England: John Wiley and Sons, 2001.
- [3] H. H. Muyeen S. M., Al-Durra A., *Modeling and Control Aspects of Wind Power Systems*. Croatia: InTech DTP, 2013.
- [4] B. Jonkman, *TurbSim User's Guide: Version 1.06.00*. Golden, Colorado, U.S.A.: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2012.
- [5] C. Dai, J. Yuan, and F. Zhang, "Study on the prevent cable twisting control strategy of wind turbine yaw control system," in *2013 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA)*, Dec 2013, pp. 420–424.
- [6] H. Shariatpanah, R. Fadaeinedjad, and M. Rashidinejad, "A new model for pmsg-based wind turbine with yaw control," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, no. 4, pp. 929–937, Dec 2013.
- [7] A.C.Hansen, *Yaw Dynamics of Horizontal Axis Wind Turbines*. University of Utah, Salt Lake City, Utah, U.S.A.: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 1992.
- [8] M. de Prada Gil, A. Sumper, and O. Gomis-Bellmunt, "Modeling and control of a pitch-controlled variable-speed wind turbine driven by a dfig with frequency control support in pss/e," in *2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications*, July 2012, pp. 1–8.
- [9] R. A. Manwell J.F., McGowan J.G., *Wind Energy Explained - Theory, Design and Application*. West Sussex, England: John Wiley and Sons, 2002.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [10] M. Shasadeghi, M. Mardanah, M. Nayeripour, and M. Mansuri, "Sensor less control of pmsg-based wind turbine with parallel distributed compensator with fuzzy observer," in *Power Electronics, Drives Systems Technologies Conference (PEDSTC), 2015 6th*, Feb 2015, pp. 35–40.
- [11] A. E. Magri, F. Giri, A. Abouloifa, and A. E. fadili, "Nonlinear control of associations including wind turbine, pmsg and ac/dc/ac converters," in *Control Conference (ECC), 2009 European*, Aug 2009, pp. 4338–4343.
- [12] J. G. Sloopweg, H. Polinder, and W. L. Kling, "Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator," in *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*, vol. 1, July 2001, pp. 644–649 vol.1.
- [13] ———, "Initialization of wind turbine models in power system dynamics simulations," in *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502)*, vol. 4, 2001, pp. 6 pp. vol.4-.
- [14] B. Rabelo, W. Hofmann, and M. Gluck, "Emulation of the static and dynamic behaviour of a wind-turbine with a dc-machine drive," in *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, vol. 3, June 2004, pp. 2107–2112 Vol.3.
- [15] H. M. Kojabadi, L. Chang, and T. Boutot, "Development of a novel wind turbine simulator for wind energy conversion systems using an inverter-controlled induction motor," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 3, pp. 547–552, Sept 2004.
- [16] Q. Wang and L. Chang, "An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1242–1249, Sept 2004.
- [17] O. A. Maria, B. Luis F., "Wind energy potential for electricity generation in rural zones of mexico," *Interviencia*, vol. 31, pp. 240 – 245, 04 2006.
- [18] O. Jaramillo and M. Borja, "Wind speed analysis in la ventosa, mexico: a bimodal probability distribution case," *Renewable Energy*, vol. 29, no. 10, pp. 1613 – 1630, 2004. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148104000618>
- [19] S. de Energia, "Prospectiva de energias renovables 2011 - 2025," 2011.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [20] S. de EnergĀya, "Prospectiva de energias renovables 2011 - 2025," 2012.
- [21] J. A. Pámanes, "Modelado dinámico," in *Curso de Robótica*, Enero-Junio 2015, pp. 8-14.
- [22] T. Yoshikawa, *Foundations of robotics: analysis and control*. Massachusetts, U.S.A.: MIT press, 1990.
- [23] R. Gorla, *Models des robots manipulateurs; application a leur commande*. France: Cepaudes, 1994.
- [24] G. M. Madsen, P.H. McNeerney, "Frequency domain modeling of free yaw response of wind turbines to wind turbulence," 1991.
- [25] M. H. Hansen, "Improved modal dynamics of wind turbines to avoid stall-induced vibrations," *Wind Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 179-195, 2003. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/we.79>
- [26] B. C. P. Hansen, M. H., "Yaw loads and motions of a horizontal axis wind turbine," 1990.
- [27] N. Chuang, "Robust h<sub>∞</sub> control of variable-speed wind turbines in partial load," in *Power Engineering Conference (AUPEC), 2014 Australasian Universities*, Sept 2014, pp. 1-6.
- [28] A. Merabet, R. Beguenane, J. S. Thongam, and I. Hussein, "Adaptive sliding mode speed control for wind turbine systems," in *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Nov 2011, pp. 2461-2466.
- [29] T. Thiringer and J. Linders, "Control by variable rotor speed of a fixed-pitch wind turbine operating in a wide speed range," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 8, no. 3, pp. 520-526, Sep 1993.
- [30] H. Khalil, *Nonlinear Systems*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [31] A. C. Huang and S. Y. Yu, "Input-output feedback linearization control of uncertain systems using function approximation techniques," in *2016 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, June 2016, pp. 132-137.

- [32] M. H. Chiang, C. S. Wang, and J. Liu, "Feedback linearization control for a wind turbine driven by a variable-speed pump-controlled hydraulic servo system," in *11th IEEE International Conference on Control Automation (ICCA)*, June 2014, pp. 815–820.
- [33] J. Chen, L. Jiang, W. Yao, and Q. H. Wu, "A feedback linearization control strategy for maximum power point tracking of a pmg based wind turbine," in *2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Oct 2013, pp. 79–84.
- [34] A. D. Giorgio, L. Pimpinella, and A. Mercurio, "A feedback linearization based wind turbine control system for ancillary services and standard steady state operation," in *Control Automation (MED), 2010 18th Mediterranean Conference on*, June 2010, pp. 1585–1590.
- [35] D. Jeong, C. Kim, Y. Gui, and C. C. Chung, "Sliding mode control for lvr of a pmg wind turbine using stored energy in rotor inertia," in *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, July 2016, pp. 1–5.

