



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Doctorado

**Estrategias de Control Tolerante a Fallas de
Sistemas de Generación de Energía Eólica e
Integración a la Red**

presentada por

MC. Vicente Borja Jaimes

como requisito para la obtención del grado de
**Doctor en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

Dr. Manuel Adam Medina

Codirector de tesis

Dr. Jarniel García Morales

Cuernavaca, Morelos, México. Enero de 2022.



Cuernavaca, Mor.,

18/enero/2022

No. de Oficio:

SAC/10/2022

Asunto:

Autorización de
impresión de tesis

**VICENTE BORJA JAIMES
CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E**

Por este conducto tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "Estrategias de Control Tolerante a Fallas de Sistemas de Generación de Energía Eólica e Integración a la Red", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

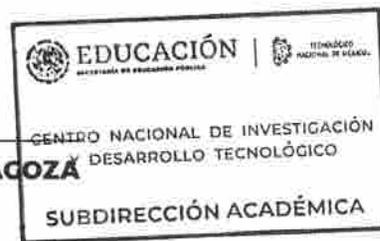
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Excelencia en Educación Tecnológica"

"Educación Tecnológica al Servicio de México"

**DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



C.c.p. Lic. Silvia del Carmen Ortiz Fuentes. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Expediente
CMAZ/CHG



 <small>Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico</small>	ACEPTACIÓN DE IMPRESIÓN DEL DOCUMENTO DE TESIS DOCTORAL	Código: CENIDET-AC-006-D20
		Revisión: 0
	Referencia a la Norma ISO 9001:2008 7.1, 7.2.1, 7.5.1, 7.6, 8.1, 8.2.4	Página 1 de 1

Cuernavaca, Mor., a 12 de enero de 2022.

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Subdirector Académico
Presente

At'n: Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Presidente del Claustro Doctoral
Del Departamento De Ing. Electrónica

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del estudiante **Vicente Borja Jaimes**, manifiestan que después de haber revisado el documento de tesis titulado "Estrategias de Control Tolerante a Fallas de Sistemas de Generación de Energía Eólica e Integración a la Red", realizado bajo la dirección del **Dr. Manuel Adam Medina** y la codirección del **Dr. Jarniel García Morales**, el trabajo se **ACEPTA** para proceder a su impresión.

ATENTAMENTE



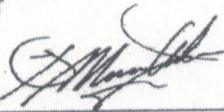
Dr. Manuel Adam Medina
CENIDET



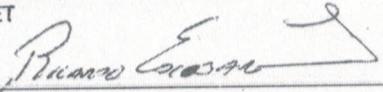
Dr. Jarniel García Morales
CENIDET



Dr. Abraham Claudio Sánchez
CENIDET



Dr. Jesús Darío Mina Antonio
CENIDET



Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
CENIDET



Dr. Carlos Daniel García Beltrán
CENIDET

Reciba un cordial saludo.

c.c.p: Mtra. Rosa Olivia Maquinay Díaz / Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
c.c.p: Dr. Hugo Estrada Esquivel / Jefe del Departamento de Ingeniería Electrónica.
c.c.p: Expediente.

Dedicatoria

Con amor para mi esposa e hijos.

Ustedes son mi mayor motivación.

A la memoria de Hilaric Salazar Santibáñez,

un gran maestro de vida.

Agradecimientos

A mi esposa, por su amor y paciencia en aquellos momentos en que el estudio y el trabajo ocuparon mi tiempo y esfuerzo.

A mis padres, por todo su apoyo durante mi formación profesional.

A mi hermana Adalid, por su apoyo y confianza.

A Hilario Salazar Santibáñez, por sus amistad y cariño.

Al Dr. Manuel Adam Medina, gracias por su tiempo, sus consejos, su apoyo y su amistad. Sin usted esto no hubiese sido posible.

A mis revisores, Dr. Abraham Claudio Sánchez, Dr. Jesús Darío Mina Antonio y Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez por el apoyo brindado y los comentarios y sugerencias para enriquecer el trabajo.

Gracias a todos aquellos que olvide mencionar, pero que me ayudaron a que este gran esfuerzo se volviera realidad.

Al CENIDET por facilitar sus instalaciones y al personal que me apoyo en los tramites y gestiones para obtener el grado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado a través de la beca de doctorado.

Resumen

Este documento presenta el diseño de esquemas de detección y aislamiento de fallas, así como de esquemas de control tolerante a fallas en sensores y actuadores del sistema de *pitch* y sensores del tren de transmisión de un sistema de conversión de energía eólica.

En el área de la detección y aislamiento de fallas se proponen dos esquemas. El primero, desde un enfoque basado en datos que utiliza el algoritmo de la máquina de vectores de soporte. Para entrenar el algoritmo se utilizaron datos con y sin falla y la función *kernel* utilizada es de tipo gaussiana. Los resultados obtenidos en simulación muestran que el esquema permite la detección de fallas de tipo valor fijo y factor de escalamiento en sensores del sistema del *pitch*. Mientras, que en el tren de transmisión sólo es posible detectar fallas de tipo valor fijo.

El segundo esquema propuesto, se realiza desde un enfoque basado en modelo que emplea una configuración en banco de observadores por modos deslizantes para la generación de residuos. Los observadores propuestos mostraron tener propiedades de robustez, al ser capaces de rechazar perturbaciones que aparecen por el canal de entrada del sistema. Los resultados obtenidos en simulación demuestran la efectividad del esquema para detectar y aislar fallas en sensores del sistema de *pitch* y tren de transmisión.

En el área del control tolerante a fallas, se propone un control tolerante a fallas pasivo, a partir de un control robusto basado en las técnicas de control por modos deslizantes para hacer frente a dos tipos de fallas en actuadores del sistema de *pitch*. Por otra parte, para lograr la tolerancia a fallas en sensores se propone un control tolerante a fallas activo, el cual utiliza la información del esquema de detección de fallas basado en observadores. Debido a que el sistema cuenta con redundancia de hardware. Para eliminar la dinámica de la falla sobre el sistema, se utiliza el método conocido como reconfiguración, que consiste en reemplazar la señal del sensor con falla por la señal del sensor libre de falla.

Abstract

This document presents the design of fault detection and isolation schemes, as well as fault-tolerant control schemes in sensors and actuators of the pitch system and sensors of the drive train of a wind energy conversion system.

In the area of fault detection and isolation, two schemes are proposed. The first, from a data-driven approach that uses the support vector machine algorithm. To train the algorithm, data with and without failure were used and the kernel function used is of the Gaussian type. The results obtained in simulation show that the scheme allows the detection of faults of type fixed value and scaling factor in sensors of the pitch system. Meanwhile, in the drive train it is only possible to detect fixed value type faults.

The second proposed scheme is carried out from a model-based approach that uses a bench configuration of observers by sliding modes for the generation of residuals. The proposed observers showed robustness properties, being able to reject disturbances that appear through the input channel of the system. The results obtained in simulation demonstrate the effectiveness of the scheme to detect and isolate faults in sensors of the pitch and drive train system.

In the area of fault-tolerant control, a passive fault-tolerant control is proposed, which consists of a robust control based on sliding mode control techniques to deal with two types of faults in pitch system actuators. On the other hand, to achieve fault tolerance in sensors, an active fault tolerant control is proposed, which uses the information of the observer-based fault detection scheme. Because the system has hardware redundancy. To eliminate the dynamics of the fault on the system, the method known as reconfiguration is used, which consists of replacing the signal of the faulty sensor with the signal of the fault-free sensor.

Índice general

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
1. Introducción	8
1.1. Introducción	8
1.2. Estado del arte	9
1.3. Planteamiento del problema	14
1.4. Propuesta de solución	14
1.5. Objetivos	15
1.5.1. General	15
1.5.2. Específicos	15
1.6. Justificación	15
1.7. Estructura de la tesis	16
2. Marco teórico	17
2.1. Introducción	17
2.2. Terminología	18
2.3. Algoritmo de la máquina de vectores de soporte	20
2.4. Diseño de observadores de estado	23

2.4.1. Observadores por modos deslizantes	24
2.5. Conclusiones parciales	36
3. Sistema de conversión de energía eólica	37
3.1. Introducción	37
3.2. Modelo <i>benchmark</i> de un sistema de conversión de energía eólica	38
3.3. Modelo de la dinámica del viento	40
3.4. Modelo aerodinámico de la turbina	41
3.5. Modelo del sistema de <i>pitch</i>	43
3.6. Modelo del sistema de transmisión	44
3.7. Modelo del generador y convertidor	47
3.8. Control por regiones de operación del modelo <i>benchmark</i>	47
3.9. Simulación del modelo <i>benchmark</i>	51
3.10. Conclusiones parciales	53
4. Detección y aislamiento de fallas en sensores	54
4.1. Introducción	54
4.2. Fallas en sistemas de conversión de energía eólica	55
4.2.1. Panorama general de las fallas	55
4.2.2. Definición de fallas en el sistema	58
4.2.3. Propagación de fallas en el sistema	60
4.3. Detección de fallas basado en la máquina de vectores de soporte	63
4.4. Detección y aislamiento de fallas basado en observadores	65

4.4.1.	Detección y aislamiento de fallas en sensores del sistema de <i>pitch</i> . . .	67
4.4.2.	Detección y aislamiento de fallas en sensores del tren de transmisión .	74
4.5.	Resultados de la detección y aislamiento de fallas	78
4.5.1.	Esquema basado en la máquina de vectores de soporte	78
4.5.2.	Esquema basado en observadores	81
4.6.	Conclusiones parciales	86
5.	Control tolerante a fallas en sensores y actuadores	87
5.1.	Introducción	87
5.2.	Elementos de un sistema tolerante a fallas	88
5.3.	Control por modos deslizantes	92
5.4.	Control tolerante a fallas pasivo en actuadores del sistema de <i>pitch</i>	95
5.5.	Control tolerante a fallas activo en sensores del sistema de <i>pitch</i> y tren de transmisión	102
5.6.	Conclusiones parciales	108
6.	Conclusiones	109
6.1.	Conclusiones generales	109
6.2.	Trabajos futuros	110
	Referencias	111
I	Glosario	120

Índice de figuras

2.1. Clasificación de fallas con base en su gravedad.	19
2.2. SVM para dos clases lineales.	22
2.3. Error de estimación del estado y la salida.	26
2.4. Señal de inyección del error.	27
2.5. Estimación de estados.	32
2.6. Término de inyección del error equivalente.	33
3.1. Principales elementos de un WECS.	38
3.2. Modelo <i>benchmark</i> del WECS.	39
3.3. Curvas de C_p contra λ para distintos ángulos de <i>pitch</i>	43
3.4. Componentes del sistema de <i>pitch</i>	44
3.5. Componentes del tren de transmisión.	45
3.6. Curva de operación de un WECS.	48
3.7. Esquema de control de la velocidad del generador.	49
3.8. Dinámica del sistema de conversión de energía eólica.	51
4.1. Simulación de fallas en sensores del sistema de <i>pitch</i> y de velocidad del rotor.	59

4.2. Análisis de propagación de fallas	61
4.3. Dinámica de la potencia eléctrica sujeta a fallas en sensores de <i>pitch</i>	62
4.4. Arquitectura general de la detección de fallas basado en observadores.	66
4.5. Arquitectura del esquema FDI para el sistema de <i>pitch</i>	68
4.6. Convergencia del observador del sistema de <i>pitch</i>	69
4.7. Esquema FDI para el tren de transmisión.	74
4.8. Convergencia del observador del tren de transmisión	76
4.9. Detección de fallas con SVM escenario 1.	80
4.10. Detección de fallas con SVM escenario 2.	81
4.11. Señales residuales en el sistema de <i>pitch</i> 1.	82
4.12. Señales residuales en el sistema de <i>pitch</i> 2.	83
4.13. Señales residuales en el sistema de <i>pitch</i> 3.	84
4.14. Señales residuales para la falla en sensores de velocidad del rotor.	85
4.15. Señales residuales para la falla en sensores de velocidad del generador.	86
5.1. Arquitectura del control tolerante a fallas pasivo.	89
5.2. Arquitectura del control tolerante a fallas activo.	89
5.3. Control tolerante a fallas por adaptación de parámetros.	90
5.4. Control tolerante a fallas por reconfiguración del controlador.	92
5.5. Dinámica del sistema de <i>pitch</i> con falla en actuador.	98
5.6. Comparación entre el control por modos deslizantes y el control nominal.	100
5.7. Control tolerante a fallas con la falla 6 en el actuador de <i>pitch</i>	101

5.8. Control tolerante a fallas con la falla 7 en el actuador de <i>pitch</i>	102
5.9. Respuesta del FTC ante la falla 1.	104
5.10. Respuesta del FTC ante la falla 2.	105
5.11. Respuesta del FTC ante la falla 3.	106
5.12. Respuesta del FTC ante la falla 4.	107
5.13. Respuesta del FTC ante la falla 5.	107

Índice de Tablas

3.1. Parámetros del modelo del viento.	52
3.2. Parámetros del modelo de la turbina y el sistema de <i>pitch</i>	52
3.3. Parámetros del modelo del tren de transmisión.	52
3.4. Parámetros del modelo del convertidor y generador.	52
3.5. Parámetros del controlador.	52
4.1. Resumen de fallas.	63
4.2. Firmas de falla en el <i>pitch</i> 1.	72
4.3. Firmas de falla en el <i>pitch</i> 2.	73
4.4. Firmas de falla en el <i>pitch</i> 3.	74
4.5. Firmas de falla en el tren de transmisión.	78
5.1. Parámetros para modelar fallas en el actuador de <i>pitch</i>	97

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Hoy en día los sistemas de conversión de energía eólica (WECS, por sus siglas en inglés) contribuyen de forma importante con la producción de energía eléctrica a nivel mundial [1]. Sin embargo, aún falta trabajo por hacer para posicionarla como una forma de energía competitiva frente a la generación de energía convencional. Para lograrlo, es necesario incrementar su eficiencia, continuidad y confiabilidad. Por otro lado, debido a que los WECS se localizan en ambientes hostiles y aislados, si una falla no se detecta a tiempo puede derivar en una avería e incluso dependiendo de la gravedad de la falla en la destrucción del sistema. Además, generalmente el mantenimiento en los WECS es costoso e involucra la interrupción prolongada del sistema.

Para superar estos inconvenientes, en la actualidad existe un creciente interés por el desarrollo de los denominados sistemas de control tolerante a fallas (FTCS, por sus siglas en inglés). El FTCS permite mantener el funcionamiento del WECS a pesar de la presencia de fallas y además, permite realizar una mejor gestión en la programación de acciones de mantenimiento preventivo y correctivo.

1.2. Estado del arte

Derivado del reciente interés en los sistemas de conversión de energía eólica, existe una gran variedad de trabajos de investigación enfocados al control de estos sistemas. En los últimos años se han desarrollado estrategias de control utilizando distintas metodologías como lo son: el control no lineal [2], control adaptable [3], control predictivo [4], control por ganancia programada [5], control difuso [6], control por redes neuronales [7], control por modos deslizantes [8], control basado en pasividad [9], entre otras [10]. A continuación, se describen los trabajos más relevantes en el área del control de sistemas de conversión de energía eólica.

Control de WECS

En [11] se propone un controlador predictivo a partir de la optimización de una función objetivo. La predicción se realiza sobre la base de un esquema de linealización por retroalimentación entrada-salida y se considera que el sistema está conectado a una red no balanceada.

Por otra parte, en [12] y [13] se proponen dos controladores por modos deslizantes de segundo orden aplicados a un WECS con generador de inducción doblemente alimentado (DFIG, por sus siglas en inglés). Los resultados obtenidos muestran ser robustos a perturbaciones externas (por ejemplo, fallas en la red) y no presentan el efecto conocido como *chattering*. Así mismo, en [14] se presenta un control por modos deslizantes diseñado para regular de manera independiente la potencia activa y la potencia reactiva generada en la DFIG.

En [15] y [16] se reportan los resultados de la comparación de algunas técnicas de control. En [15] se compara una estrategia de control orientado a voltaje (VOC, por sus siglas en inglés) sin estimación del flujo magnético con un controlador VOC tradicional. Por otro lado, en [16] se presenta un análisis comparativo de cinco estrategias de control: DCC (*Demagnetizing Current Control*), FLTC (*Flux Linkage Tracking Control*), MCC (*Magnetizing Current Control*), FFCC (*Feed-forward Compensation Control*) y SRCC (*Stator and Rotor Current Control*). La comparación se realiza a partir de los índices de desempeño de los controladores cuando el sistema se somete a fallas en la red eléctrica.

Diagnóstico de fallas en WECS

En los últimos años ha crecido el interés por el diseño de sistemas de monitoreo, detección y diagnóstico de fallas en WECS. Los sistemas de monitoreo y detección de fallas permiten evitar que las fallas deriven en averías que ocasionen la interrupción inesperada del sistema o incluso su destrucción. Además de reducir los tiempos de inactividad en los WECS, los esquemas inteligentes de diagnóstico de fallas permiten sustituir sensores de *hardware* por sensores virtuales [17]. Esto elimina la necesidad de una mayor redundancia de *hardware* en el sistema. Los esquemas de diagnóstico de fallas utilizados en WECS suelen estar en el nivel del control de supervisión, donde las estrategias de uso común incluyen la comparación de sensores, la comparación de modelos y el umbral [18].

Una revisión general de las técnicas de monitoreo de condiciones y detección de fallas en turbinas eólicas se presenta en [18]-[21]. Además de las estrategias básicas de detección de fallas (ver por ejemplo, [22]) los sistemas de monitoreo de condiciones (MCS, por sus siglas en inglés) son cada vez más comunes en sistemas de conversión de energía eólica. Los sistemas MCS utilizan métodos basados en señales como por ejemplo, el análisis vibratorio utilizado para predecir daños estructurales en cojinetes o la caja de cambios [23]-[25] (véase también [26]).

En [27] se presenta la evaluación de un esquema de detección y diagnóstico de fallas en el tren de transmisión sujeto a fallas simultáneas. El enfoque utilizado es denominado aprendizaje profundo (*Deep Learning*). Para disminuir el efecto del ruido presente en el sistema, se utiliza una red neuronal convolucional junto con la técnica de aprendizaje métrico basada en criterios discriminantes lineales. La solución presentada permite extraer de manera eficiente las características de las fallas mecánicas. Los resultados numéricos demostraron que la solución presentada puede detectar y diagnosticar fallas múltiples simultáneas en la caja de cambios del WECS. Por otra parte, en [28] los autores proponen un método para la extracción y clasificación de fallas en un WECS sujeto a diferentes condiciones de operación. El método utiliza la técnica de análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés). El método permite realizar una caracterización completa del sistema y además proporciona la información de las fallas por medio de herramientas estadísticas. Otros esquemas de diagnóstico de fallas basados en datos aplicado a turbinas eólicas se reportan en [29]-[35].

En [36] se propone un observador en modos deslizantes *Takagi-Sugeno* para realizar la detección de fallas en un modelo *benchmark*. En [37] se presenta un método de diagnóstico y detección de fallas en el sistema de *pitch* del WECS. Para la detección de fallas se emplea un filtro Kalman que estima el ángulo de paso de las palas. El esquema de diagnóstico de fallas se basa en un método de red neuronal artificial con aprendizaje supervisado capaz de diagnosticar un tipo de falla predeterminado. El método se valida sobre un modelo de turbina eólica *offshore*, que considera componentes estocásticas de viento y los efectos del oleaje. Las fallas consideradas son sesgos y salidas fijas en los sensores de paso, fricción excesiva, bloqueo de hendidura, lectura incorrecta de voltaje y pérdida de actuadores. Otros esquemas de diagnóstico de fallas basados en modelo se reportan en [38]-[41].

Control tolerante a fallas en WECS

La ubicación de los sistemas de generación de energía eólica dificulta y eleva el costo de los procedimientos de mantenimiento preventivo y correctivo. Varios algoritmos de control tolerante a fallas se han introducido en [42]. En su mayoría se propone la tolerancia a fallas en los sensores y componentes electrónicos del sistema. La atención se centra en las fallas electromecánicas en el generador. Los generadores junto con la caja de cambios y el convertidor de potencia son los elementos donde se presentan la mayor cantidad de fallas de los WECS [43].

En [44], los autores proponen un control tolerante a fallas en turbinas eólicas. El objetivo del esquema propuesto es minimizar la degradación en la producción de potencia debido a fallas en alguno de los actuadores del sistema de *pitch*. Para ello, se utiliza un enfoque de control por modos deslizantes con una componente adaptable. La estabilidad del sistema se comprueba vía la teoría de Lyapunov.

Por otra parte, [45] presenta el diseño de un control tolerante a fallas aplicado a turbinas eólicas con capacidad de 2 MW, utilizando el simulador *FAST* diseñado por el Laboratorio Nacional Americano de Energías Limpias. La estrategia utilizada se basa en el principio de control suave, el cual consiste en disminuir la tensión y fatiga de los componentes mecánicos (la caja de cambios principalmente) mediante una operación suave. Para esto, se emplean técnicas de lógica difusa que permiten ajustar la potencia eléctrica de salida en función de indicadores del estado de la turbina

En [46] se presenta un esquema de control tolerante a fallas para el sistema de *pitch*,

considerando cada uno de los subsistemas de *pitch* de forma individual. Para caracterizar la dinámica del sistema bajo la influencia de las fallas en el sistema de *pitch*, se emplea la identificación basado en subespacios. La dinámica del sistema con falla se considera en el diseño de una estrategia de control predictivo capaz de lograr la reducción del efecto de la falla sobre el sistema. Los resultados presentados muestran la efectividad del esquema propuesto para de forma simultánea acomodar eficazmente las fallas en el sistema de *pitch* y restringir la cantidad de energía utilizada por la ley de control. Mientras en [47] proponen un control tolerante a fallas activo. Para el control del ángulo de *pitch* se utiliza una estrategia de control adaptable en modos deslizantes. El control se aplica sobre un modelo de turbina eólica de velocidad variable en presencia de fallas en actuadores y sensores. Para detectar, aislar y acomodar las fallas, se utiliza un algoritmo de estimación de fallas en línea. Para atenuar el problema del *chattering* se emplean modos deslizantes de orden superior. Además, los perfiles de velocidad del viento se generan utilizando *TurbSim*. Los resultados presentados en simulación muestran la efectividad del controlador propuesto en presencia de fallas, incertidumbres y perfiles de viento turbulentos.

En [48] se aborda el diseño de dos sistemas de control de tolerancia a fallas. Esto con la finalidad de conseguir una regulación confiable del par de carga del generador eléctrico en un sistema WECS el cual puede ser afectada tanto por las incertidumbres del modelo como por las fallas del actuador. El primer diseño, es un sistema de control tolerante a fallas pasivo (PFTCS, por sus siglas en inglés) basado en un enfoque de control adaptable con referencia de modelo difuso. El esquema utiliza un mecanismo de inferencia difusa para la adaptación de los parámetros sin tener conocimiento previo de las fallas y sin la necesidad de contar con un sistema de diagnóstico y detección de fallas. El segundo sistema, es un sistema de control tolerante a fallas activo (AFTCS, por sus siglas en inglés). Este sistema se diseña a partir de un esquema de detección y diagnóstico de fallas. Las simulaciones se han realizado utilizando un modelo de referencia de la turbina eólica *offshore* en presencia de turbulencias de viento, ruidos de medición y escenarios de falla reales en el generador y el convertidor. Los resultados numéricos y los estudios de simulación indican claramente la eficacia y la robustez de los esquemas propuestos en toda la gama de perfiles de viento probados, tanto para las condiciones sin falla como en las condiciones defectuosas.

En [49] se propone una estrategia de FTC para la turbina eólica para hacer frente a fallas del sensor de velocidad del viento. El esquema de mínimos cuadrados con máquina de

soporte vectorial (SVM, por sus siglas en inglés) se utiliza para estimar la velocidad efectiva del viento (EWS, por sus siglas en inglés) que es una señal no medible. Dos unidades de FDI basadas en SVM se proponen para cada una de los dos sensores de velocidad del viento. Con base en el esquema FDI y FTC se logra conmutar el sensor sano o el EWS estimado por la señal de velocidad del viento cuando hay una falla en uno o en ambos sensores. El error de estimación o ruido del sensor se formula como la incertidumbre limitada y por lo tanto un controlador predictivo basado en modelo (MPC, por sus siglas en inglés) robusto es propuesto. Las restricciones físicas del sistema son respetadas por el MPC. El desempeño del esquema FTC se muestra en simulación. El rendimiento mejorado de seguimiento del MPC en comparación con un estándar también es presentado

En [50] se propone un control tolerante a fallas activo basado en un observador descriptor. El diseño se realiza utilizando un marco robusto (LPV) que toma en cuenta las incertidumbres del modelo que surgen de: variaciones en los parámetros del sistema, falta de conocimiento exacto de la velocidad del viento y el ruido en sensores. Algunos otros trabajos en el área del control tolerante a fallas se reportan en [51]-[56].

Conclusiones del estado del arte

En los últimos años el problema del diagnóstico y control tolerante a fallas en WECS se ha enfocado mayormente en el generador y el tren de transmisión. Las fallas consideradas se presentan en actuadores y sensores. Sin embargo, las soluciones presentadas tienen poca aplicación práctica y no presentan robustez ante perturbaciones e incertidumbre del sistema. Además, existen relativamente pocos trabajos que aborden de forma simultánea fallas en sensores del sistema de *pitch* y tren de transmisión, así como en el actuador de *pitch*.

A partir de la revisión del estado del arte se encontró un área de oportunidad para realizar aportaciones en el área de la detección de fallas y el control tolerante a falla de un WECS. Se busca que las soluciones propuestas tengan dos características distintivas: robustez y facilidad de implementación.

1.3. Planteamiento del problema

De acuerdo con los reportes de fallas en WECS, las fallas más comunes en sensores se presentan en el sistema de *pitch* y el tren de transmisión. A pesar de que estos componentes no son críticos para el funcionamiento del WECS, es necesario detectar y compensar sus fallas para evitar una avería en el sistema. Por otro lado, el actuador de *pitch* es un componente crítico. Una falla en el actuador de *pitch* puede provocar serios daños estructurales en la turbina.

Debido a que el sistema de *pitch* se modela como un sistema en lazo cerrado, una falla en el sensor del ángulo de *pitch* se propaga por el sistema por medio del lazo de retroalimentación. En consecuencia, la dinámica de falla debe ser compensada o bien considerada en el diseño del esquema de detección y aislamiento de fallas.

Por otro parte, las fallas en sensores del tren de transmisión son difíciles de detectar y aislar debido a que el sistema presenta un alto grado de incertidumbre y perturbaciones externas. Además, el par aerodinámico (una de las entradas del sistema) no es medible y presenta una dinámica no lineal dependiente del viento. Por lo tanto, la estrategia de detección y aislamiento de fallas debe ser robusta a la incertidumbre y dinámica no lineal del sistema.

1.4. Propuesta de solución

Para superar los inconvenientes y desafíos de los WECS, se propone realizar un control tolerante a fallas que permita mantener la operación continua y confiable del sistema de generación de energía eólica. Para ello, en primera instancia se propone el diseño de un control tolerante a fallas pasivo que permita la tolerancia a fallas en actuadores del sistema de *pitch*. Por otro lado, para lograr la tolerancia a fallas en sensores, se propone el diseño de un control tolerante a fallas desde un enfoque activo. El cual involucra el diseño de un esquema de detección y diagnóstico de fallas. Para solucionar el problema de detección de fallas se proponen dos soluciones desde dos enfoques distintos. La primera desde un enfoque basado en datos utiliza el método de la máquina de vectores de soporte. Mientras la segunda solución se propone desde un enfoque basado en modelo utilizando observadores en modos deslizantes.

El diseño de las estrategias de control tolerante a fallas y los esquemas de detección de fallas se realizan sobre un modelo *benchmark*. El diseño propuesto considera fallas en sensores y actuadores del sistema de *pitch*, sensores del tren de transmisión y sensores del generador.

1.5. Objetivos

1.5.1. General

Aplicar esquemas de control tolerante a fallas a un sistema de conversión de energía eólica.

1.5.2. Específicos

- Modelar, integrar y simular los subsistemas del WECS.
- Definir, modelar y simular fallas en el modelo del WECS.
- Diseñar un esquema de detección y diagnóstico de fallas en el WECS.
- Diseñar un esquema de control tolerante a fallas pasivo para la tolerancia a fallas en actuadores del WECS.
- Diseñar un esquema de control tolerante a fallas activo para la tolerancia a fallas en sensores del WECS.

1.6. Justificación

Desde principios del año 2000 la capacidad instalada de energía eólica ha venido incrementándose, pasando de unos pocos cientos de kilowatts a varios Megawattss. Para cubrir las necesidades de producción de potencia eléctrica, el tamaño de las turbinas eólicas y la complejidad de los componentes ha aumentado. Sin embargo, el tamaño y la complejidad de los sistemas que integran los WECS presenta retos importantes a la hora de garantizar

la confiabilidad del sistema. Además, el número de componentes de hardware también ha aumentado haciendo al sistema más susceptible a fallas. Dentro de las alternativas para resolver este problema, sobresale el control tolerante a fallas (FTC, por sus siglas en inglés) como una de las alternativas más adecuadas para mejorar la confiabilidad del sistema [57].

La consecuencia inmediata de una falla en WECS, es una disminución inmediata en la eficiencia del sistema. Además, debido a que una falla puede llevar a la inactividad del sistema por meses, desde un punto de vista económico, los propietarios de parques eólicos no aceptan la pérdidas económicas derivadas de una operación deficiente o al tiempo de inactividad del sistema. Este es otro factor que ha estimulado el interés por el desarrollo de esquemas de FTC.

Por otra parte, los trabajos de mantenimiento en WECS son costosos y difíciles de realizar. Esto se debe a que pueden ser necesarios barcos o helicópteros para respaldar las operaciones de mantenimiento. Además, es posible que el personal de mantenimiento no pueda acceder a las turbinas eólicas debido a las condiciones meteorológicas (sobre todo en turbinas *offshore*). Este escenario presenta una oportunidad importante para el desarrollo e implementación de sistemas de FTC en WECS.

1.7. Estructura de la tesis

El presente documento está organizado como sigue. En el capítulo 2 se presenta el fundamento teórico utilizado para el diseño de los esquemas de detección y aislamiento de fallas. En el capítulo 3 se muestra el modelo matemático del modelo *benchmark* utilizado.

En el capítulo 4 se presenta el diseño de esquemas de detección y aislamiento de fallas en el WECS.

El capítulo 5 está dedicado a la aplicación de estrategias de control tolerante a fallas en el WECS.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y los trabajos futuros.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Introducción

La detección y diagnóstico de fallas (FDD, por sus siglas inglés) busca por medio de la aplicación de diversos enfoques y métodos obtener una caracterización completa de las fallas que se presentan en un sistema dinámico [58]. En los últimos años las técnicas de FDD han ganado relevancia debido a que la detección temprana de fallas permite tomar acciones preventivas y correctivas para reducir el daño potencial de la falla sobre el sistema o proceso.

Por ello, en los últimos años la comunidad científica ha venido realizando un esfuerzo importante por desarrollar métodos y técnicas que permitan resolver el problema de la detección, aislamiento y diagnóstico de fallas. En la actualidad es posible clasificar los métodos para realizar FDD en dos grandes grupos: los métodos basados en datos y los métodos basados en modelo. Ambos métodos abordan el problema de forma distinta.

Por un lado, la idea general del enfoque basado en datos es resolver el problema de la detección de fallas como un problema de clasificación. Para ello, se ha propuesto el uso de clasificadores difusos, análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés), redes neuronales artificiales, funciones de base radial, máquina de vectores de soporte (SVM, por sus siglas en inglés), etcétera. Por otro lado, el enfoque basado en modelo aborda el problema a partir de la obtención de un modelo matemático mediante el cual se reconstruye la dinámica del sistema a partir de sus entradas y salidas. La diferencia entre las salidas del

sistema y las salidas del modelo matemático se utiliza para construir un conjunto de señales denominadas residuos, las cuales permiten inferir sobre la presencia de fallas en el sistema.

De entre la variedad de métodos que abordan el problema de la detección y aislamiento de fallas en WECS, en el presente trabajo doctoral se proponen dos soluciones: La primera consiste en un enfoque basado en datos donde se utiliza el algoritmo SVM y la segunda consta de un enfoque basado en modelo, donde se propone el uso de un banco de observadores para la generación de las señales residuales. En este capítulo se presentan las bases matemáticas de ambos enfoques. La teoría presentada se utiliza en el diseño de los esquemas de detección y aislamiento de fallas desarrollados en el capítulo 4. .

2.2. Terminología

De acuerdo con Isermann [59], una falla se define como una desviación de al menos una propiedad o parámetro característico de una variable de su condición aceptable, es decir, una falla es todo cambio no permitido en el comportamiento de alguno de los componentes del sistema, de manera que éste ya no puede satisfacer la función para la que fue diseñado. Las fallas en un sistema pueden conducir a la disminución del rendimiento, a un mal funcionamiento o a averías. A diferencia de las fallas, las consecuencias de una avería suelen ser más graves, como la interrupción parcial o completa del sistema.

En función de su gravedad las fallas se pueden clasificar en duras, incipientes e intermitentes. Las fallas duras, a veces llamadas fallas abruptas, por lo general se modelan con un cambio de tipo escalón en las señales de los actuadores, sensores o bien en los parámetros del sistema. Por otro lado, una falla suave, también llamada falla incipiente, por lo general se modela mediante cambios en los parámetros del sistema o valores de *offset* en las mediciones de los sensores. En cuanto a las fallas intermitentes, estas se presentan durante intervalos de tiempo arbitrarios y se modelan por medio de señales continuas actuando sobre los parámetros del sistema, o bien sobre las mediciones de los sensores [60]. Estos tres tipos de fallas se muestran en la Figura 2.1.

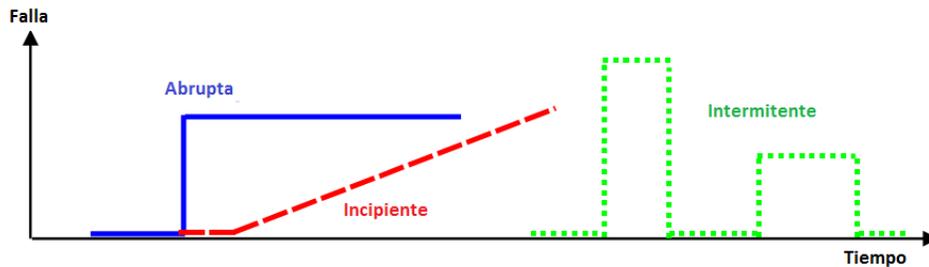


Figura 2.1: Clasificación de fallas con base en su gravedad.

Con base en su influencia sobre el sistema, las fallas se pueden clasificar en fallas aditivas y fallas multiplicativas. La falla aditiva influye sobre la o las variables de salida del sistema mediante una simple adición de la falla sobre la señal medida. Una falla multiplicativa tiene un impacto más complejo en un sistema, ésta se modela como el producto entre ella y la variable. Las fallas aditivas por lo general se modelan como niveles de *offset* en sensores, mientras que las fallas multiplicativas se modelan con cambios de parámetros dentro del sistema.

Según la definición de Iserman y Ulieru en [61], la tarea principal del esquema de FDD se puede dividir en dos partes. En primer lugar, detectar si existe una falla en el sistema por medio de la generación de un síntoma analítico y, en segundo lugar, diagnosticar la falla sobre la base del o los síntomas observados. El diagnóstico de fallas por lo general consiste en la identificación del tipo de falla, su ubicación, su magnitud y su instante de aparición. Sin embargo, el concepto de diagnóstico de fallas no se ha estandarizado. Por ejemplo, en [60] Gertler define la tarea de diagnóstico de fallas como el aislamiento y la identificación de fallas. El aislamiento de fallas especifica las fuentes asociadas con la falla detectada, mientras la identificación de fallas determina la magnitud y características generales de la falla. Estos términos son consistentes con Isermann en [61]. En esta tesis, la detección y aislamiento de fallas se integran como el diagnóstico de fallas.

2.3. Algoritmo de la máquina de vectores de soporte

El método de la máquina vectores de soporte (SVM, por sus siglas en inglés) pertenece a la categoría de los denominados enfoques basados en datos, cuya característica principal es que no requieren de un modelo matemático del sistema.

V. Vapnik [62], a inicios de los 80's desarrolló la teoría que fundamenta el método de la SVM, el cual pertenece a una clase de algoritmos de *Machine Learning* denominados "métodos de *kernel*".

El algoritmo de la SVM se puede aplicar a problemas de clasificación, regresión e identificación [63]. Al considerar el problema de separación de un conjunto de datos de entrada $x = \{x_i, i = 1, \dots, n\}$, perteneciente a dos clases distintas $Y = \{-1, 1\}$. Donde el conjunto de vectores de entrenamiento es $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ con $x_i \in \mathbb{R}^d$ e $y_i \in \{-1, 1\}$. Se busca un hiperplano que separe los datos pertenecientes a la clase $y_i = 1$ de aquellos pertenecientes a la clase $y_i = -1$.

El hiperplano que permite separar ambas clases viene dado por:

$$w \cdot x + b = 0, \tag{2.1}$$

donde $w \in \mathbb{R}^n$ es un vector normal y b es un valor escalar.

Apartir del hiperplano definido en la Ec. (2.1) se pueden representar dos hiperplanos paralelos como:

$$y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 \tag{2.2}$$

El algoritmo SVM busca maximizar la separación entre las dos clases. La separación entre los dos hiperplanos paralelos está dada por: $d = \frac{2}{\|w\|}$, por lo cual en el caso de una separación lineal es posible encontrar el hiperplano óptimo al resolver el problema de optimización dado por:

$$\begin{aligned} & \text{mín } \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ & \text{sujeto a } : y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Se pueden utilizar multiplicadores de Lagrange para resolver la restricción, con lo que el problema toma la forma:

$$\begin{aligned} \text{máx } L(\alpha) &= \sum_i^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i \cdot x_j) \\ \text{sujeto a } &: \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0, \alpha_i \geq 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

A partir del problema de optimización planteado se puede establecer la siguiente condición:

$$\alpha_i [\mathbf{y}_i (w \cdot x_i + b) - 1] = 0, \quad (2.5)$$

denominada condición de *Karush-Kuhn-Tucker* [62]. Por lo que la solución óptima para el vector normal viene dada por:

$$w^* = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i x_i, \quad (2.6)$$

donde el número de vectores de soporte está dado por N . Al elegir un vector soporte arbitrario (x_k, y_k) , a partir de la Ec. (2.5) resulta que $b^* = y_k - w^* x_k$. Con esto, el par arbitrario (w^*, b) queda determinado y, a partir de la Ec. (2.6) el hiperplano viene dado por:

$$f(x) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_i y_i (x \cdot x_i) + b \right), \quad (2.7)$$

con sgn como la función signo y el vector de datos $x = \begin{cases} +1 & \text{si } f(x) > 0 \\ -1 & \text{si } f(x) < 0 \end{cases}$

En general, se puede decir que el algoritmo SVM debe encontrar un hiperplano que permita separar de la mejor forma posible dos clases distintas de grupos de datos. El decir "de la mejor forma posible" implica encontrar el hiperplano con el margen más amplio posible entre las dos clases. Los puntos más cercanos entre sí de cada clase, reciben el nombre de vectores de soporte, esto se puede observar en la Figura 2.2.

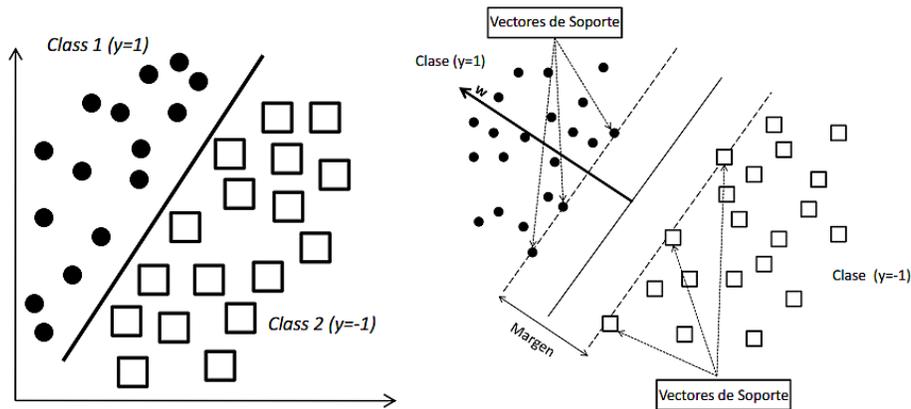


Figura 2.2: SVM para dos clases lineales.

Es importante hacer notar que el algoritmo puede encontrar el hiperplano antes mencionado para aquellos conjuntos de datos que sean linealmente separables, permitiendo un pequeño número de clasificaciones erróneas al tratar de maximizar el margen flexible.

El algoritmo SVM se puede modificar para resolver el problema de clasificación de datos que no son linealmente separables. Para ello, se pueden utilizar los denominados métodos *kernel*, en los que se emplea una función *kernel* para mapear el vector de entrada en un espacio de mayor dimensión donde la separación resulte más simple. Logrando de esta manera simplificar también las complejas reglas de decisión no lineales, haciéndolas lineales en un espacio dimensional de característica superior [63].

Las funciones *kernel* más empleadas son:

- Kernel Lineal

$$K(x_1, x_2) = x_1^T x_2 \quad (2.8)$$

- *Kernel* polinomial

$$K(x_1, x_2) = (x_1^T x_2 + 1)^p \quad (2.9)$$

- Función de base radial (RBF) o gaussiana

$$K(x_1, x_2) = \exp\left(-\frac{\|x_1 - x_2\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.10)$$

- *Kernel* sigmoideo

$$K(x_1, x_2) = \tanh(\beta_0 x_1^T x_2 + \beta_1) \quad (2.11)$$

Con lo que el hiperplano óptimo de la Ec. (2.7) se puede escribir como:

$$f(x) = \operatorname{sgn} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_i y_i K(x \cdot x_i) + b \right) \quad (2.12)$$

2.4. Diseño de observadores de estado

El propósito de un observador es estimar los estados no medibles de un sistema. En esencia un observador es un modelo matemático del sistema que recibe las señales de entrada y salida del sistema, así como la diferencia entre salida del sistema y la salida del propio observador [64]. La diferencia entre la señal medida y la señal estimada (la salida del observador) se realimenta a través de una ganancia apropiada para conseguir que la salida del observador siga a la salida del sistema.

La forma más simple de un observador es el observador de Luenberger. Considere el sistema lineal en el espacio de estado representado por:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (2.13)$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$, $y \in \mathbb{R}^p$ y $u \in \mathbb{R}^m$ representan los estados, las salidas y las entradas del sistema, respectivamente. Además $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ y $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$, son la matriz del sistema, la matriz de entrada y la matriz de salida, respectivamente, con $p \geq m$.

Un observador Luenberger para el sistema (2.13), toma la forma:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) - L(\hat{y}(t) - y(t)) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t), \end{aligned} \quad (2.14)$$

donde $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$ es el estado estimado del sistema, $\hat{y} \in \mathbb{R}^p$ es la salida estimada y $L \in \mathbb{R}^{n \times p}$ es una matriz diseñada para asegurar la convergencia del observador. Al definir el error de

estimación de los estados como $e(t) = \hat{x}(t) - x(t)$, la dinámica del error de estimación de los estados se puede obtener de (2.13) y (2.14) y tiene la forma:

$$\dot{e}(t) = (A - LC) e(t) \quad (2.15)$$

Por lo que el problema de convergencia del observador, es decir, $\hat{x}(t) \rightarrow x(t)$ se reduce a garantizar la convergencia de la dinámica del error del sistema dado por la Ec. (2.15). Si el par (A, C) es observable, se puede elegir la ganancia L para asegurar que los eigenvalores de $(A - LC)$ sean estables y por lo tanto la dinámica del error de estimación converja a cero.

En el enfoque de detección y diagnóstico de fallas basado en modelo, una práctica frecuente es usar la señal del error de estimación de la salida $e_y(t) = \hat{y}(t) - y(t)$, para generar residuos que permitan la detección y el aislamiento de fallas. Idealmente se espera que cuando el sistema esté libre de fallas $e_y(t) = 0$ y que cuando se presente alguna falla $e_y(t) \neq 0$.

Sin embargo, debido a que el diseño de un observador se realiza a partir de un modelo matemático que representa de forma aproximada al sistema real, su dinámica está sujeta a incertidumbre. Además, debido al entorno donde se encuentre el sistema, es posible se presenten perturbaciones externas que afectan su comportamiento. Esto deriva en una falta de precisión en las estimaciones del observador y, por lo tanto, que la señal de error de estimación de la salida y los residuos, presenten desviaciones significativas incluso cuando no se tienen fallas en el sistema [65].

Por lo tanto, el reto en el diseño del esquema de FDI basado en observadores es garantizar su robustez ante incertidumbres y perturbaciones presentes en el sistema. Esto permitirá evitar falsas alarmas y problemas de detectabilidad de fallas.

2.4.1. Observadores por modos deslizantes

A diferencia de un observador tipo Luenberger, donde el error de estimación de la salida se realimenta de forma lineal para forzar un comportamiento asintótico estable, en un observador por modos deslizantes el error se realimenta a través de un término no lineal discontinuo [66]. Para ilustrar esta idea, considere la representación de un sistema lineal en

el espacio de estados:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\tag{2.16}$$

En la Ec.(2.16) las matrices A , B y C son:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ y } C = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Para el sistema representado por la Ec. (2.16) un observador en modos deslizantes toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + G_n v \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t),\end{aligned}\tag{2.17}$$

donde el término discontinuo v se define como:

$$v = \begin{cases} 1 & \text{si } e_y(t) > 0 \\ -1 & \text{si } e_y(t) < 0 \end{cases}\tag{2.18}$$

Y la dinámica del error de estimación del sistema viene dada por:

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + G_n v\tag{2.19}$$

A partir de las ecuaciones (2.18) y (2.19) es claro que la dinámica asociada al error de estimación es discontinua. El término de inyección del error cambia deliberadamente de acuerdo con alguna regla predefinida que depende de la trayectoria del error de estimación de la salida. Se puede notar de (2.18) que el término discontinuo v conmuta sobre la superficie $S = \{e : Ce = 0\}$. El objetivo del término discontinuo v es dirigir las trayectorias del error de estimación del sistema sobre la superficie de deslizamiento y forzarlas a permanecer sobre ella o al menos en una vecindad.

Para mostrar este principio se selecciona la ganancia del observador $G_n = \begin{bmatrix} 1 & -2 \end{bmatrix}^T$. Las condiciones iniciales para los estados del sistema se suponen como $x = \begin{bmatrix} 0.5 & -0.8 \end{bmatrix}^T$,

mientras que las condiciones iniciales para el observador son cero. Por simplicidad la entrada se asume igual a cero. Los resultados obtenidos se describen a continuación.

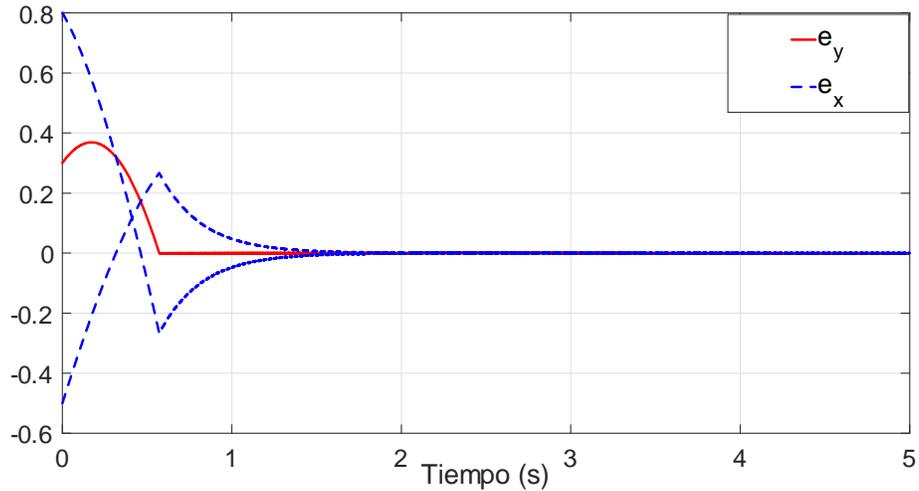


Figura 2.3: Error de estimación del estado y la salida.

En la Figura 2.3 se muestra el error de estimación de los estados y la salida. Se puede observar que el error de estimación de la salida es forzado a cero en un tiempo finito (aproximadamente en 0.66 segundos). La convergencia en tiempo finito se alcanza debido a la acción del término discontinuo v . También se observa que el error de estimación de los estados decae asintóticamente a cero.

En la Figura 2.4 se muestra el comportamiento del término no lineal discontinuo; se puede observar que una vez que el error de estimación de la salida es forzado a cero, se presenta un comportamiento en modo deslizante sobre la superficie S y el término v inicia una conmutación de alta frecuencia.

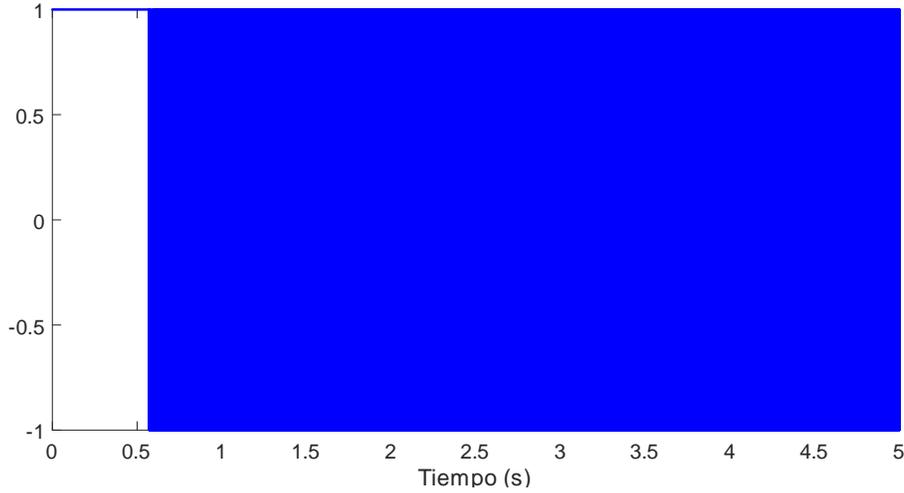


Figura 2.4: Señal de inyección del error.

Cuando el error de estimación de los estados es forzado a alcanzar y permanecer dentro de la superficie de deslizamiento se dice que el observador está en modo deslizante. Una vez que el observador alcanza esta condición presenta dos características de suma importancia, reducción de orden y rechazo a perturbaciones.

La característica de reducción de orden se observa mejor mediante una transformación de coordenadas $z = T_c x$, donde:

$$T_c = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Al aplicar la transformación de coordenadas el sistema toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= TAT^{-1}z(t) + TBu(t) \\ y_z(t) &= CT^{-1}z(t), \end{aligned} \quad (2.21)$$

con $z(t) = \begin{bmatrix} x_{1z}(t) & y_z(t) \end{bmatrix}^T$, donde las salidas aparecen como componentes del vector de estados. Bajo esta transformación de coordenadas y, además de definir $e_{1z}(t) = \hat{x}_{1z}(t) - x_{1z}(t)$

y $e_{yz}(t) = \hat{y}_z(t) - y_z(t)$ la dinámica del error de la Ec. (2.19) se puede escribir como:

$$\dot{e}_z(t) = \begin{bmatrix} \dot{e}_{1z}(t) \\ \dot{e}_{yz}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4 & 6 \\ -3 & -4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{1z}(t) \\ e_{yz}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} v \quad (2.22)$$

Una vez que se alcanza la condición de modo deslizante ($e_{yz}(t) = 0$) la Ec. (2.22) se reduce a:

$$\dot{e}_{1z}(t) = -4e_{1z}(t) \quad (2.23)$$

Esta ecuación describe la dinámica de orden reducido. La dinámica converge a cero asintóticamente debido que su eigenvalor es negativo.

A partir del ejemplo presentado, se puede concluir que el diseño de un observador en modos deslizantes consta de dos partes: el diseño del término discontinuo v y la obtención de una matriz de ganancia. Tanto el término discontinuo como la matriz de ganancia deben diseñarse de forma que garanticen que la dinámica del error de estimación de la salida tienda a cero en un tiempo finito y que la dinámica de orden reducido sea estable.

Observador utkin

En esta sección se introduce de manera formal el marco para el diseño de observadores discontinuos. El primer diseño considerado es conocido en la literatura como observador Utkin [66]. Para la presentación del diseño del observador se considera un sistema lineal en el espacio de estados descrito por:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y_x(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Si el par (A, C) es observable, es posible introducir una transformación de coordenadas $z = T_c x$ con la matriz T_c dada por:

$$T_c = \begin{bmatrix} N_c^T \\ C \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

donde las columnas de $N_c \in \mathbb{R}^{n \times (n-p)}$ generan el espacio nulo de la matriz C . Al aplicar la transformación de coordenadas el sistema original se escribe como:

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ y(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u(t) \\ y_z(t) &= \begin{bmatrix} 0 & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Este sistema se puede escribir de forma compacta de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= A_z z(t) + B_z u(t) \\ y_z(t) &= C_z z(t) \end{aligned} \quad (2.27)$$

El observador Utkin para el sistema representado por la Ec. (2.27) toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}}(t) &= A_z \hat{z}(t) + B_z u(t) + G_n v \\ \hat{y}_z(t) &= C_z \hat{z}(t) \end{aligned} \quad (2.28)$$

El error de estimación de estados y el error de estimación de las salidas se definen respectivamente como:

$$\begin{aligned} e_z(t) &= \hat{z}(t) - z(t) \\ e_y(t) &= \hat{y}_z(t) - y_z(t) \end{aligned} \quad (2.29)$$

El término v se diseña para conmutar de forma infinita sobre la superficie deslizante $S = \{e_z : C e_z = 0\}$ y, por tanto, dirigir las trayectorias del error $e_z(t)$ sobre la superficie S . El término v tiene la característica de ser discontinuo y no lineal y, se define como:

$$v = \rho \cdot \text{sgn}(\hat{y}_{z,i}(t) - y_{z,i}(t)), \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad (2.30)$$

con ρ un escalar positivo y sgn como la función signo.

La matriz de ganancia G_n tiene la siguiente estructura:

$$G_n = \begin{bmatrix} G_{n,1} \\ -I_p \end{bmatrix}, \quad (2.31)$$

donde la matriz $G_{n,1} \in \mathbb{R}^{(n-p) \times p}$ es un parámetro de diseño del observador. A partir de la definición del error de estimación de los estados, la dinámica del error viene dada por:

$$\dot{e}_z(t) = \begin{bmatrix} \dot{e}_1(t) \\ \dot{e}_y(t) \end{bmatrix} = A_z e_z(t) + G_n v \quad (2.32)$$

La dinámica se puede particionar de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1(t) &= A_{11}e_1(t) + A_{12}e_y(t) + G_n v \\ \dot{e}_y(t) &= A_{21}e_1(t) + A_{22}e_y(t) + (-v) \end{aligned} \quad (2.33)$$

donde $e_1 \in \mathbb{R}^{(n-p)}$ y $e_y \in \mathbb{R}^p$. A partir de la definición del término discontinuo v , la dinámica del error de estimación de la salida se puede escribir como:

$$\dot{e}_{y,i}(t) = A_{21,i}e_1(t) + A_{22,i}e_y(t) - \rho \cdot \text{sgn}(e_{y,i}(t)) \quad (2.34)$$

Para lograr la dinámica en modos deslizantes es necesario que se cumpla la condición de alcanzabilidad dada por:

$$\begin{aligned} e_{y,i}(t)\dot{e}_{y,i}(t) &= e_{y,i}(t)(A_{21,i}e_1(t) + A_{22,i}e_y(t)) - \rho |e_{y,i}(t)| \\ &< -|e_{y,i}(t)|(\rho - |(A_{21,i}e_1(t) + A_{22,i}e_y(t))|) \end{aligned} \quad (2.35)$$

Si el escalar ρ satisface $\rho > |(A_{21,i}e_1(t) + A_{22,i}e_y(t))| + \eta$ para algún $\eta > 0$ entonces la condición de alcanzabilidad se puede escribir como:

$$e_{y,i}(t)\dot{e}_{y,i}(t) < -\eta |e_{y,i}(t)| \quad (2.36)$$

Una vez se satisface la condición de alcanzabilidad cada una de las componentes del error de estimación de la salida son forzadas a cero en un tiempo finito. Cuando esto ocurre se dice que el movimiento en modo deslizante tiene lugar.

El concepto de control equivalente

Cuando se alcanza un comportamiento en modo deslizante $e_y = \dot{e}_y = 0$, la dinámica del error de la Ec. (2.33) se reduce a:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1(t) &= A_{11}e_1(t) + G_{n,1}v_{eq} \\ 0 &= A_{21}e_1(t) - v_{eq} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Al término v_{eq} se le denomina inyección de error equivalente. Es importante hacer notar que el término v_{eq} no es realmente el término de inyección v aplicado sobre el observador, sino un promedio de dicha señal, que luego se utiliza para mantener el movimiento en modo deslizante. Es importante aclarar que el concepto de inyección de error equivalente sólo es válido una vez que se alcanza el movimiento en modo deslizante. Una forma de extraer el término de inyección de error equivalente es a través de la aplicación de un filtro pasa bajas sobre la señal v . Esto se puede realizar al implementar siguiente ecuación diferencial para un filtro de primer orden:

$$\tau \dot{v}_{eq} + v_{eq} = v \quad (2.38)$$

Para ejemplificar el diseño del observador Utkin considere la representación de un oscilador armónico simple dado por la Ec. (2.24), donde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Por simplicidad se considera $u(t) = 0$. A partir de la Ec.(2.25), la matriz de cambio de coordenadas T_c es:

$$T_c = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.40)$$

con lo que las matrices A_z , B_z y C_z son:

$$A_z = \begin{bmatrix} 0.5 & 1.5 \\ -1.5 & 0.5 \end{bmatrix}, B_z = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}, C_z = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Al seleccionar la ganancia $G_{n,1} = 3$ la dinámica del movimiento en modo deslizante es gobernada por $A_{11} + G_{n,1}A_{21} = -4$ que presenta una dinámica estable.

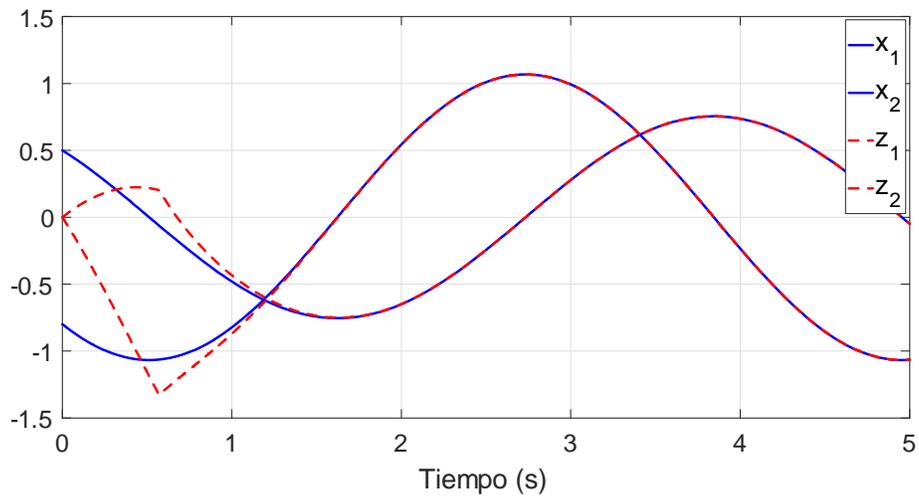


Figura 2.5: Estimación de estados.

La Figura 2.5 muestra los estados del sistema y los estados estimados por el observador Utkin. Se puede apreciar que aproximadamente en 1.5 segundos el observador alcanza la convergencia de los estados. En la Figura 2.6 se presenta la señal correspondiente al término de inyección del error equivalente obtenido al pasar la señal v a través de un filtro pasa bajas con $\tau = 0.02$. Se puede notar que una vez que se alcanza el movimiento en modo deslizante el término de inyección del error equivalente y la dinámica representada por la Ec. (2.37) presentan el mismo comportamiento dinámico.

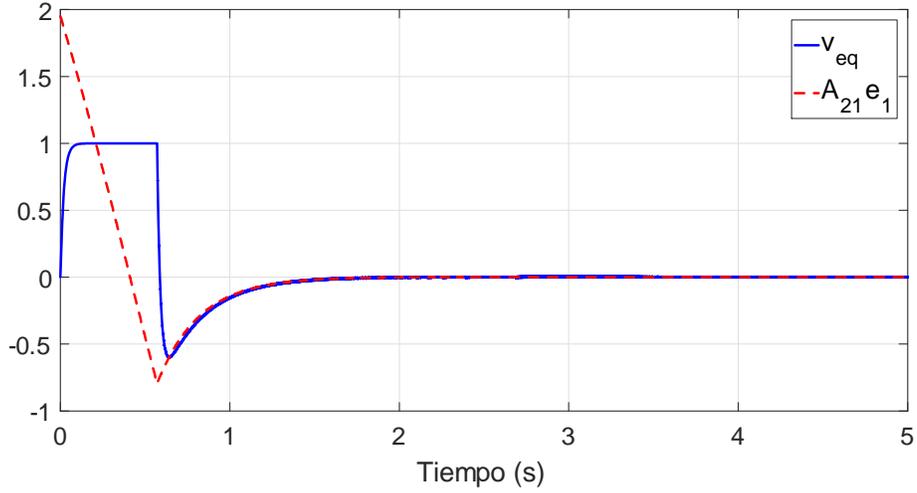


Figura 2.6: Término de inyección del error equivalente.

Observador discontinuo

A diferencia del observador previamente descrito, en el siguiente observador discontinuo el error se realimenta tanto con una ganancia lineal como con una ganancia no lineal. Esto ha mostrado tener ventajas importantes en la convergencia y robustez del observador [66].

Con la finalidad de apreciar la robustez ante incertidumbres de modelado y perturbaciones, el procedimiento de diseño considera un sistema dinámico en espacio de estados con incertidumbre descrito por:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + M\xi(t, x, u) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\tag{2.42}$$

En esta ecuación $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ y $M \in \mathbb{R}^{n \times q}$ con la restricción de que $p \geq q$. Se supone que las matrices B , C y M son de rango completo. La función $\xi : \mathbb{R}_+ \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^q$ se desconoce pero está acotada de forma que $\|\xi(t, x, u)\| \leq r_1 \|u\| + \alpha(t, y)$, con $\alpha : \mathbb{R}_+ \times \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}_+$, una función conocida.

Para el diseño del observador en modos deslizantes se debe realizar una transformación de coordenadas. Esta transformación debe tener la particularidad de considerar a las salidas como variables de estado. Por lo tanto, supongamos que existe una transformación de coordenadas T_c , tal que el sistema con incertidumbre representado en la Ec. (2.42) se pueda escribir como:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= A_{11}x_1(t) + A_{12}y(t) + B_1u(t) \\ \dot{y}(t) &= A_{21}x_1(t) + A_{22}y(t) + B_2u(t) + M_2\xi,\end{aligned}\tag{2.43}$$

donde $x_1 \in \mathbb{R}^{(n-p)}$, $y \in \mathbb{R}^p$ y la matriz A_{11} tiene eigenvalores estables.

A partir de la representación del sistema en el nuevo espacio de coordenadas, el objetivo es diseñar un observador que permita estimar estados y salidas de forma que se alcance un movimiento en modo deslizante, donde el error estimado de la salida $e_y(t) = \hat{y}(t) - y(t)$ se lleve a cero en tiempo finito.

La estructura particular del observador considerado se puede escribir en la forma:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_1(t) &= A_{11}\hat{x}_1(t) + A_{12}\hat{y}(t) + B_1u(t) - A_{12}e_y \\ \dot{\hat{y}}(t) &= A_{21}\hat{x}_1(t) + A_{22}\hat{y}(t) + B_2u(t) - (A_{22} - A_{22}^s)e_y + v\end{aligned}\tag{2.44}$$

donde A_{22}^s es una matriz de diseño estable. El término de inyección discontinuo viene dado por:

$$v = \left\{ \begin{array}{ll} -\rho \|M_2\| \frac{P_2 e_y}{\|P_2 e_y\|} & \text{si } e_y \neq 0 \\ 0 & \text{si } e_y = 0 \end{array} \right\}\tag{2.45}$$

con $P_2 \in \mathbb{R}^{p \times p}$, una matriz definida positiva que es solución de la ecuación de Lyapunov:

$$P_2 A_{22}^s + (A_{22}^s)^T = -Q_2\tag{2.46}$$

donde la matriz simétrica definida positiva Q es un parámetro de diseño. El escalar ρ se elige de forma tal que $\|\xi\| < \rho$. Al definir la componente del vector de error $e_1(t) = \hat{x}_1(t) - x_1(t)$, entonces la dinámica del vector de error de estimación viene dada por:

$$\begin{aligned}\dot{e}_1(t) &= A_{11}e_1(t) \\ \dot{e}_y(t) &= A_{21}e_x(t) + A_{22}^s e_y(t) + v - M_2\xi\end{aligned}\tag{2.47}$$

En [67] se muestra que el error de estimación descrito en la Ec. (2.47) es cuadráticamente estable y un modo deslizante tiene lugar al forzar el error $e_y(t) = 0$ en tiempo finito.

Si \hat{x} representa la estimación de estado x y $e(t) = \hat{x}(t) - x(t)$ entonces el observador descrito en la Ec. (2.44) se puede escribir en el espacio original de coordenadas como:

$$\dot{\hat{x}}(t) = Ax(t) + Bu(t) - G_l Ce(t) + G_{nl}v, \quad (2.48)$$

con la ganancia lineal G_l dada por:

$$G_l = T_c^{-1} \begin{bmatrix} A_{12} \\ A_{22} - A_{22}^s \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

La ganancia no lineal G_{nl} está dada por:

$$G_{nl} = \|M_2\| T_c^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ I_p \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

y finalmente, el término no lineal de inyección discontinuo viene dado por:

$$v = \left\{ \begin{array}{ll} -\rho \|M_2\| \frac{P_2 Ce(t)}{\|P_2 Ce(t)\|} & \text{si } e_y \neq 0 \\ 0 & \text{si } e_y = 0 \end{array} \right\} \quad (2.51)$$

2.5. Conclusiones parciales

En este capítulo se introdujo el concepto de falla y se describió algunas de las formas más comunes en las que se pueden presentar. Así como los principales enfoques para realizar detección y aislamiento de fallas.

Por otro lado, se introdujo la teoría del algoritmo de la máquina de vectores de soporte. Un algoritmo que permite realizar la detección de fallas al resolver un problema de clasificación.

También se presentó un marco general para el diseño de observadores por modos deslizantes. Se mostró que la característica distintiva de los observadores por modos deslizantes deriva del uso de un término no lineal de inyección del error. El método de diseño propuesto se reduce a dos etapas: el diseño del término no lineal discontinuo y la obtención de una matriz de ganancia para realimentarlo. Además, se presentó un marco general de diseño de observadores para sistemas lineales sujetos a perturbaciones e incertidumbres. De acuerdo con los ejemplos presentados, se encontró que una vez se cumple la denominada condición de alcanzabilidad y un movimiento en modo deslizante tiene lugar, la dinámica del sistema experimenta una reducción de orden.

Capítulo 3

Sistema de conversión de energía eólica

En este capítulo se presentan los diferentes subsistemas que integran un Sistema de Conversión de Energía Eólica (WECS, por sus siglas en inglés), su modelo matemático y un análisis de su comportamiento dinámico. Los resultados obtenidos serán utilizados en secciones posteriores para el diseño de esquemas de detección y diagnóstico de fallas, así como para el desarrollo del esquema de control tolerante a fallas propuesto.

3.1. Introducción

Un sistema de conversión de energía eólica convierte la energía cinética que captura del viento en energía eléctrica. Un WECS se integra por tres componentes principales: la turbina, el generador (en conjunto con el convertidor) y un sistema de transmisión (o caja de cambios) [68]. La turbina transforma la energía cinética del viento en energía mecánica rotacional y la transmite a través de una caja multiplicadora a un generador eléctrico, el cual a su vez la convierte en energía eléctrica, que finalmente es transmitida a una carga. La carga generalmente es representada por la red eléctrica. En la Figura 3.1 se presenta una vista general de los principales elementos que integran un WECS.

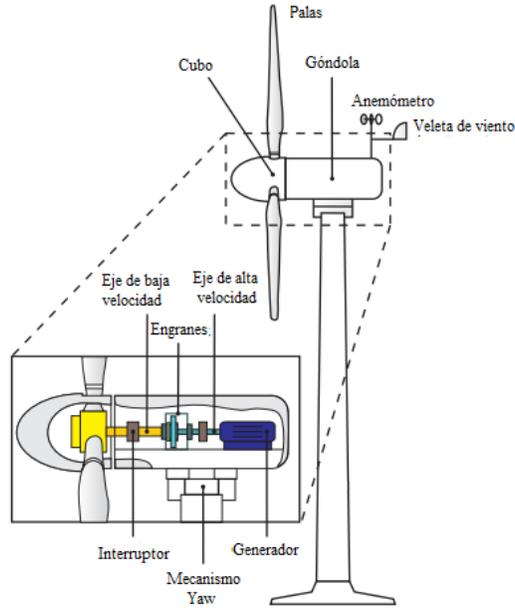


Figura 3.1: Principales elementos de un WECS.

3.2. Modelo *benchmark* de un sistema de conversión de energía eólica

El modelo *benchmark* considerado en este trabajo fue propuesto por P. F. Odgaard y J. Stoustrup en [69]. El modelo considera a una turbina tripala de eje horizontal de velocidad variable con una potencia de 4.8 MW, la cual está integrado por los elementos mostrados en el diagrama a bloques de la Figura 3.2. La entrada al sistema es la velocidad del viento v_w , la cual provoca el giro de las palas de la turbina. Este movimiento se propaga a través del rotor de la turbina a una velocidad ω_r y con un par τ_r . El eje de transmisión (caja multiplicadora) acopla este movimiento con el eje del generador el cual gira a una velocidad ω_g y tiene un par τ_g . El generador es el encargado de transformar la energía mecánica en energía eléctrica. El generador se conecta a la red por medio de un convertidor y un transformador de alto voltaje.

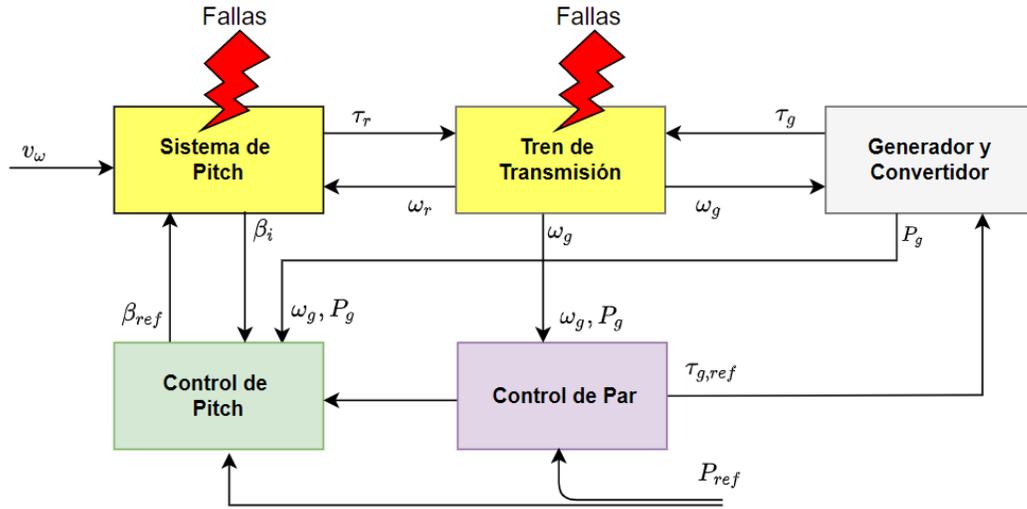


Figura 3.2: Modelo *benchmark* del WECS.

La potencia eléctrica generada por el sistema se controla modificando la aerodinámica de la turbina mediante el control de *pitch* o bien mediante el control de la velocidad de rotación del generador (control de par). En cualquier caso, el objetivo del sistema de control es realizar un seguimiento de la potencia eléctrica de referencia P_{ref} , o bien, si no es posible al menos minimizar el error de seguimiento.

El bloque de control de *pitch* de la Figura 3.2 recibe como entradas las mediciones del ángulo de *pitch* β_i , de la velocidad del generador ω_g y, de la potencia eléctrica generada P_g . La salida es la señal de referencia de posición del *pitch* β_r que permite la captura óptima de la energía cinética.

Por otro lado, el bloque control de par tiene como entradas; la medición de velocidad del generador y la potencia eléctrica generada. El controlador proporciona como salida el par de referencia $\tau_{g,ref}$ para alcanzar la potencia eléctrica de salida deseada.

En las siguientes secciones los diversos subsistemas del modelo *benchmark* se presentan de acuerdo con el siguiente orden; modelo de la dinámica del viento, modelo de la turbina, modelo del tren de transmisión, modelo de generador y convertidor, así como el diseño del controlador.

3.3. Modelo de la dinámica del viento

El modelo del viento lo integran cuatro partes: la velocidad media (variaciones de viento suaves) $v_m(t)$; una parte estocástica $v_s(t)$; la cizalladura del viento $v_{ws}(t)$ resultado del efecto de la energía eólica desperdiciada en la superficie de la tierra; y la sombra de la torre $v_{ts}(t)$. La combinación de estos cuatro elementos resulta en:

$$v_\omega(t) = v_m(t) + v_s(t) + v_{ws}(t) + v_{ts}(t) \quad (3.1)$$

En este modelo cuatro diferentes tipos de velocidades son requeridas: la velocidad del viento a la altura del eje de turbina medida por los anemómetros y las tres velocidades en punta de las aspas denotadas respectivamente como $v_{hub}(t)$, $v_{w1}(t)$, $v_{w2}(t)$, $v_{w3}(t)$. Las velocidades en punta de las aspas son afectadas por la cizalladura del viento y la sombra de la torre. Por otro lado, la velocidad del viento a la altura de la torre solo se ve afectada por los primeros dos componentes de la Ec. (3.1).

En términos de velocidad de viento media, se obtiene una secuencia de viento que varía lentamente al procesar un conjunto de datos de viento medidos con un filtro pasa bajas. La parte estocástica del modelo eólico está modelada por filtros Kalman.

La componente debido al efecto de cizalladura del viento viene dada por:

$$v_{ws,i}(t) = \frac{2v_m(t)}{3R^2} \left(\frac{R^3\alpha}{3H}\chi + \frac{R^4}{4}\alpha\frac{\alpha-1}{2H^2}\chi^2 \right) + \frac{2v_m(t)}{3R^2} \left(\frac{R^5}{5}\frac{(\alpha^2-\alpha)(\alpha-2)}{6H^2} \right) \quad (3.2)$$

donde $\chi = \cos(\theta_{r*}(t))$, y θ_{r*} es la posición angular de las tres aspas de la turbina, $\theta_{r1}(t) = \theta_r(t)$, $\theta_{r2}(t) = \theta_r(t) + \frac{2\pi}{3}$, y $\theta_{r3}(t) = \theta_r(t) + \frac{4\pi}{3}$. α y H son parámetros aerodinámicos.

La componente del viento debido a la sombra de la torre viene dada por:

$$v_{ts,i}(t) = \frac{m\bar{\theta}_{r,i}(t)}{3r^2} (\psi + v) \quad (3.3)$$

con:

$$\begin{aligned}
\psi &= 2a^2 \frac{R^2 - r_0}{(R^2 + r_0) \sin(\bar{\theta}_{r,i}(t))^2 + k^2} \\
v &= 2a^2 k^2 \frac{(r_0^2 - R^2) (r_0^2 \sin(\bar{\theta}_{r,i}(t))^2 + k^2)}{R^2 \sin(\bar{\theta}_{r,i}(t))^2 + k^2} \\
m &= 1 + \frac{\alpha (\alpha - 1) r_0^2}{8H^2} \\
\bar{\theta}_{r,i}(t) &= \theta_r(t) + \frac{(i-1)2\pi}{3} - \text{floor} \left(\frac{\theta_r(t) + \frac{(i-1)2\pi}{3}}{2\pi} \right) 2\pi
\end{aligned}$$

y donde R es la longitud de las aspas, r_0 es el radio de la base que soporta a las aspas y k es un parámetro aerodinámico [70].

3.4. Modelo aerodinámico de la turbina

El modelo aerodinámico de la turbina representa el par aerodinámico que se genera en el rotor debido al giro de las 3 aspas provocado por la incidencia del viento. El par aerodinámico viene dado por:

$$\tau_r = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{6} \pi \rho R^3 v_{\omega,i}^2(t) C_p(\lambda, \beta_i) \quad (3.4)$$

donde ρ es la densidad del aire, R es el radio de la turbina, $v_{\omega}(t)$ es la velocidad del viento y $C_p(\lambda, \beta)$ es el coeficiente de potencia. Este es una función de la relación de velocidades en punta del aspa λ (TSR, por sus siglas en inglés) y, de la posición angular del aspa β (denominado ángulo de *pitch* o ángulo de paso).

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,5 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\theta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} \quad (3.5)$$

con

$$\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\theta^3 + 1} \right) \quad (3.6)$$

El TSR es la razón entre la velocidad lineal $v_L(t)$ en la punta del aspa y la velocidad del viento $v_{\omega}(t)$ y viene dada por:

$$\lambda = \frac{v_L(t)}{v_{\omega}(t)} \quad (3.7)$$

La velocidad lineal en la punta del aspa es descrita por:

$$v_L(t) = R\omega_r(t) \quad (3.8)$$

donde R es el radio del rotor, es decir, la longitud del aspa y $\omega_r(t)$ es la velocidad angular de la turbina.

La posición del aspa β es el ángulo entre la cuerda del aspa y el plano del rotor de la turbina. Típicamente el ángulo del aspa tiene valores entre 0° y 90° .

Es importante mencionar que la Ec. (3.4) incluye las contribuciones individuales de cada una de las tres aspas de la turbina. Para ello se asume que la aportación de cada aspa al par aerodinámico es idéntica. Así también se asume que control del ángulo de pitch es idéntico para cada una de las tres aspas.

La función principal de la turbina en un WECS es la de transformar la potencia suministrada por el viento en potencia mecánica.

La potencia capturada del viento viene dada por:

$$P_c(t) = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 v_w^3(t) C_p(\lambda, \beta) \quad (3.9)$$

Sin embargo, sólo parte de potencia disponible del viento puede ser capturada y posteriormente transformada en energía mecánica por la turbina. Según [71] existe un máximo teórico para el coeficiente de potencia, el cual viene expresado de la siguiente forma:

$$C_{p_m\acute{a}x}(\lambda_{opt}, 0) = 59.3\% \quad (3.10)$$

donde $C_{p_m\acute{a}x}$ es el coeficiente máximo de potencia. Este coeficiente representa el máximo porcentaje de la potencia del viento que puede ser capturada por la turbina. Mientras λ_{opt} es el valor óptimo de la relación de velocidades en punta del aspa que corresponde a un valor constante. El porcentaje máximo de la potencia capturada del viento se consigue cuando la relación de velocidades en punta del aspa se selecciona en un valor óptimo y el ángulo *pitch* se establece en 0.

Por lo tanto, la velocidad de la turbina debe mantenerse en su valor máximo para capturar la potencia máxima del viento. Sin embargo, se sugiere que para optimizar la captura de

energía es necesario variar la velocidad de la turbina para poder mantener el C_p en su máximo valor. En la Figura 3.3 se puede observar el comportamiento típico del coeficiente de potencia C_p , contra la relación de velocidades en punta del aspa λ para distintos valores del ángulo de *pitch*.

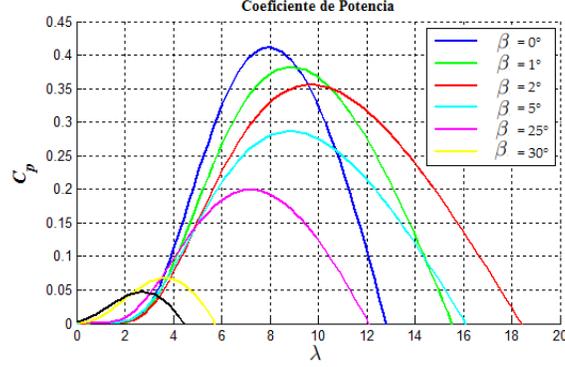


Figura 3.3: Curvas de C_p contra λ para distintos ángulos de *pitch*.

3.5. Modelo del sistema de *pitch*

El sistema de *pitch* consiste en tres actuadores de *pitch* idénticos, cada uno con un controlador interno (ver Figura 3.4).

El actuador de *pitch* modifica la aerodinámica de la turbina por medio del ajusta del ángulo de inclinación de las aspas de la turbina. El sistema de *pitch* hidráulico se modela como una función de transferencia en lazo cerrado entre la medida del ángulo de *pitch* β_i y su valor de referencia $\beta_{r,i}$.

$$\frac{\beta_i(s)}{\beta_{r,i}(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.11)$$

con $i = 1, 2, 3$

donde:

ω_n : es la frecuencia natural del modelo del actuador de *pitch* [$\frac{rad}{s}$].

ζ : es la razón de amortiguamiento del modelo del actuador de *pitch* [.]

La función de transferencia se asocia con el control del ángulo de *pitch* para cada aspa de la turbina ($i = 1, 2, 3$) y los parámetros son idénticos cuando no existe falla. Para el caso libre de falla, el parámetro $\zeta = 0,6$ y $\omega_n = 11,11 \text{ rad/s}$. Cuando una falla se presenta, estos parámetros sufren cambios.

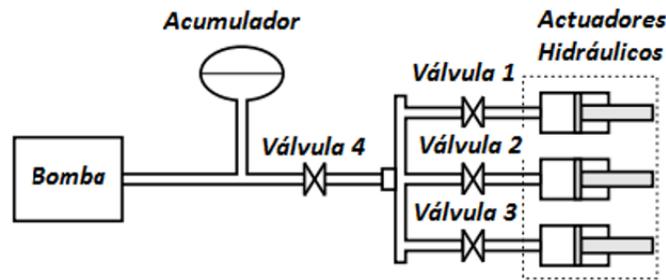


Figura 3.4: Componentes del sistema de *pitch*.

3.6. Modelo del sistema de transmisión

El tren de transmisión se modela como un sistema de dos masas flexibles. El propósito del sistema de transmisión es transferir el par del rotor al generador. Incluye una caja de cambios para aumentar la velocidad de rotación del eje de baja velocidad (lado de la turbina) al eje de alta velocidad (lado del generador) [10].

El modelo de dos masas flexibles se puede representar mediante el diagrama de la Figura 3.5:

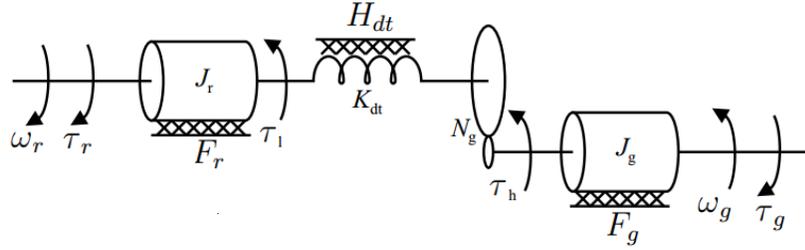


Figura 3.5: Componentes del tren de transmisión.

La dinámica del eje de baja velocidad viene dada por:

$$J_r \dot{\omega}_r(t) = \tau_r(t) - \tau_l(t) - F_r \omega_r(t), \quad (3.12)$$

donde:

F_r es el coeficiente de fricción del eje de baja velocidad.

J_r es el momento de inercia del eje de baja velocidad.

$\tau_r(t)$ es el par del rotor de la turbina (también denominado par aerodinámico).

$\tau_l(t)$ es el par en el eje de baja velocidad.

$\omega_r(t)$ es la velocidad del rotor.

Por otro lado, la dinámica del eje de alta velocidad viene dada por:

$$J_g \dot{\omega}_g(t) = \tau_h(t) - \tau_g(t) - F_g \omega_g(t), \quad (3.13)$$

donde:

F_g es el coeficiente de fricción del eje de alta velocidad.

J_g es el momento de inercia del eje de alta velocidad.

$\tau_g(t)$ es el par del generador.

$\tau_h(t)$ es el par en el eje de alta velocidad.

$\omega_g(t)$ es la velocidad del generador.

A partir de la relación de transformación N_g , el par en el eje de baja y alta velocidad se relacionan por la siguiente expresión:

$$\tau_h(t) = \frac{\tau_l(t)}{N_g} \quad (3.14)$$

Para modelar el efecto de la torsión se utiliza un resorte torsional cuya dinámica viene dada por:

$$\tau_l(t) = \eta_{dt} K_{dt} \theta(t) + \eta_{dt} H_{dt} \dot{\theta}(t) \quad (3.15)$$

$$\theta(t) = \theta_r(t) - \frac{\theta_g(t)}{N_g}, \quad (3.16)$$

donde:

H_{dt} es el coeficiente de amortiguamiento de la torsión.

K_{dt} es la rigidez de la torsión.

θ es el ángulo de torsión.

η_{dt} es la eficiencia del sistema.

A partir de la combinación de las ecuaciones anteriores, la representación en el espacio de estado para el tren de transmisión viene dada por:

$$J_r \dot{\omega}_r(t) = \tau_r(t) - K_{dt} \theta(t) - (H_{dt} + F_r) \omega_r(t) + \frac{H_{dt}}{N_g} \omega_g(t) \quad (3.17)$$

$$J_g \dot{\omega}_g(t) = \frac{\eta_{dt} K_{dt}}{N_g} \theta(t) + \frac{\eta_{dt} H_{dt}}{N_g} \omega_r(t) - \left(\frac{\eta_{dt} H_{dt}}{N_g^2} + F_g \right) \omega_g(t) - \tau_g(t) \quad (3.18)$$

$$\dot{\theta}(t) = \omega_r(t) - \frac{1}{N_g} \omega_g(t) \quad (3.19)$$

3.7. Modelo del generador y convertidor

El sistema eléctrico en la turbina eólica y los controladores del sistema eléctrico son mucho más rápidos que el rango de frecuencia utilizado en el modelo de referencia. En un modelo a nivel de sistemas la dinámica del generador y del convertidor se puede modelar mediante una función de transferencia de primer orden.

$$\frac{\tau_g(s)}{\tau_{g,r}(s)} = \frac{\gamma}{s + \gamma} \quad (3.20)$$

donde γ es el parámetro del modelo del generador y convertidor.

La potencia producida por el generador viene dada por:

$$P_g(t) = \eta_g \omega_g(t) \tau_g(t) \quad (3.21)$$

donde η_g es la eficiencia del generador.

3.8. Control por regiones de operación del modelo *benchmark*

El WECS opera en dos regiones de funcionamiento determinadas por el rango de velocidades del perfil de viento que aparece en la Figura 3.6. En región I, el rango de velocidades de viento va desde 3 m/s (el valor mínimo para iniciar la operación del sistema) hasta los 12.3 m/s (valor nominal). La región II, cubre el rango de velocidades que va de 12.3 m/s hasta los 25 m/s . Fuera de estas dos regiones es necesario interrumpir la operación del sistema por razones de seguridad.

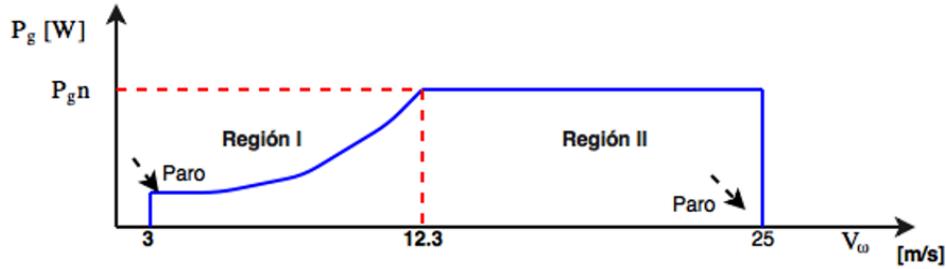


Figura 3.6: Curva de operación de un WECS.

La estrategia y los objetivos de control son diferentes en cada región de la curva mostrada en la Figura 3.6. Se puede observar que con velocidades de viento entre 3 y 12.3 m/s la turbina es controlada para lograr una producción de potencia óptima (modo de control 1) que permita capturar tanta potencia como sea posible del viento. Por otro lado, para velocidades por encima de la velocidad nominal, la turbina opera en su valor de referencia de potencia P_r (modo de control 2) y el objetivo del control es mantener este valor constante evitando sobrecargas estructurales en el sistema. Para lograrlo, se regula la potencia capturada por la turbina y la velocidad de rotación del generador.

Debido a que los objetivos de control en el WECS en cada región de operación son distintos, el problema de control se puede plantear como un problema de control dual.

En la región I, donde el rango de velocidades está por debajo de la velocidad nominal, el sistema de control intenta seguir un valor óptimo de la relación de velocidades en punta del aspa λ_{opt} , tal que, se pueda conseguir el máximo coeficiente de potencia y de esta manera capturar la mayor cantidad de energía posible del viento, la cual será transformada en potencia mecánica. Por lo que el problema de control en la región I es un problema de seguimiento. El control debe enviar la referencia adecuada de par al generador para controlar la velocidad de rotación de la turbina y de esta manera lograr el seguimiento del valor óptimo de la velocidad del rotor de la turbina.

El valor óptimo se alcanza con la configuración del ángulo de referencia de *pitch* a cero

$(\beta_r(t) = 0)$ y la referencia de par del convertidor $\tau_{g,r}$ como:

$$\tau_{g,r}(t) = K_{opt} \left(\frac{\omega_g(t)}{N_g} \right)^2 \quad (3.22)$$

donde

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \rho A R^3 \frac{C_{p_máx}}{\lambda_{opt}^3}$$

con ρ como la densidad del aire, A es el área de barrido de las palas de la turbina y $C_{p_máx}$ es el máximo valor del coeficiente de potencia.

En la región II, donde las velocidades del viento son mayores a la velocidad nominal, el control debe manipular el par del generador y el ángulo de pitch, a fin de reducir la captura de energía del viento y de esta manera mantener la potencia eléctrica generada constante. Todo esto, mientras la velocidad del generador se controla a su valor nominal.

Por lo tanto, el objetivo de control en la región II, se alcanza al regular la velocidad del generador y el par del generador. Para el control de la velocidad del generador a su valor nominal, se utiliza el esquema de control mostrado en la Figura 3.7, con un control proporcional integral.

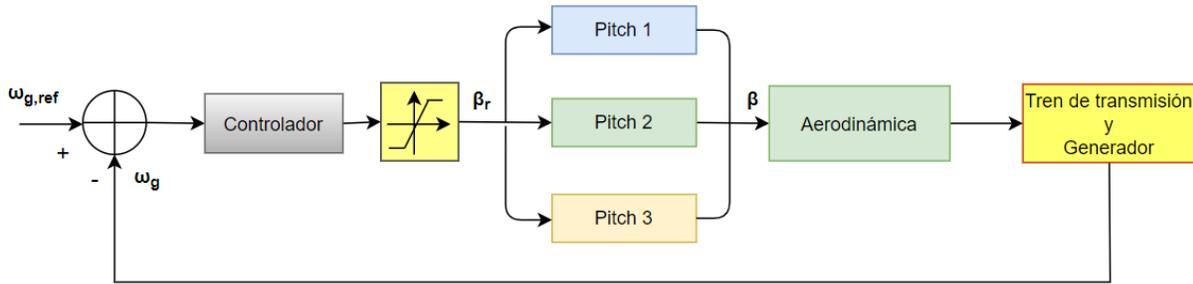


Figura 3.7: Esquema de control de la velocidad del generador.

En cuanto al control de par, éste consiste en una regulación a un valor óptimo dado por:

$$\tau_{g,r}(t) = \frac{P_r(t)}{\gamma \omega_g(t)} \quad (3.23)$$

donde γ es el parámetro del modelo del generador y convertidor.

Lo que se busca es que el par del generador siga este valor óptimo y de forma indirecta regular la potencia generada a un valor de referencia.

Se pueden emplear múltiples enfoques en el diseño de los controladores para tratar el problema de control dual en el WECS. Por lo tanto, un controlador puede diseñarse para una región por debajo de la velocidad del viento nominal y otro puede diseñarse para una región por encima de la velocidad del viento nominal.

La velocidad nominal del viento puede servir como criterio para el cambio. Un controlador diseñado para la región por encima de la velocidad nominal del viento se activa cuando la velocidad del viento excede la velocidad nominal y el otro controlador diseñado para la región por debajo de la velocidad nominal del viento se activa cuando la velocidad del viento desciende por debajo de la velocidad nominal del viento.

En la literatura se han propuesto criterios de conmutación de controladores de WECS más prácticos [70]. En este enfoque la conmutación se basa tanto en la potencia generada como en la velocidad del generador en lugar de la velocidad nominal del viento como se describe a continuación:

El controlador para la región por encima de la velocidad nominal se activa si:

$$P_g(t) \geq P_r(t) \quad \vee \quad \omega_g(t) \geq \omega_{gn} \quad (3.24)$$

donde ω_{gn} es la velocidad nominal del generador.

El controlador para la región por debajo de la velocidad nominal se activa si:

$$\omega_g(t) < \omega_{gn} - \Delta\omega \quad (3.25)$$

donde $\Delta\omega$ es una pequeña compensación sustraída de la velocidad nominal del generador para introducir algo de histéresis en el esquema de conmutación, evitando así que los modos de control estén conmutando todo el tiempo.

3.9. Simulación del modelo *benchmark*

El modelo representado en las ecuaciones (3.1), (3.4), (3.11) y (3.17 - 3.20) se simuló considerando un tiempo de muestreo de 0.01 s y un tiempo de simulación de 4400 segundos. Los parámetros de los diversos subsistemas del WECS se presentan en las Tablas 3.1, 3.2, 3.3, (3.4) y (3.5).

El perfil de viento utilizado para mover las palas de la turbina se puede ver en la Figura 3.8 a). A partir de la dinámica observada en el perfil del viento, se puede notar que la mitad del tiempo el sistema deberá operar en la región I y la otra mitad en la región II.

En la Figura 3.8 b), se muestra la potencia generada por el WECS. Se puede notar que la potencia generada es proporcional a la velocidad del generador mostrada en la Figura 3.8 c). Mientras la velocidad del generador se mantenga en su valor nominal de 165 rad/s, la potencia eléctrica generada se mantiene en 4.8 MW.

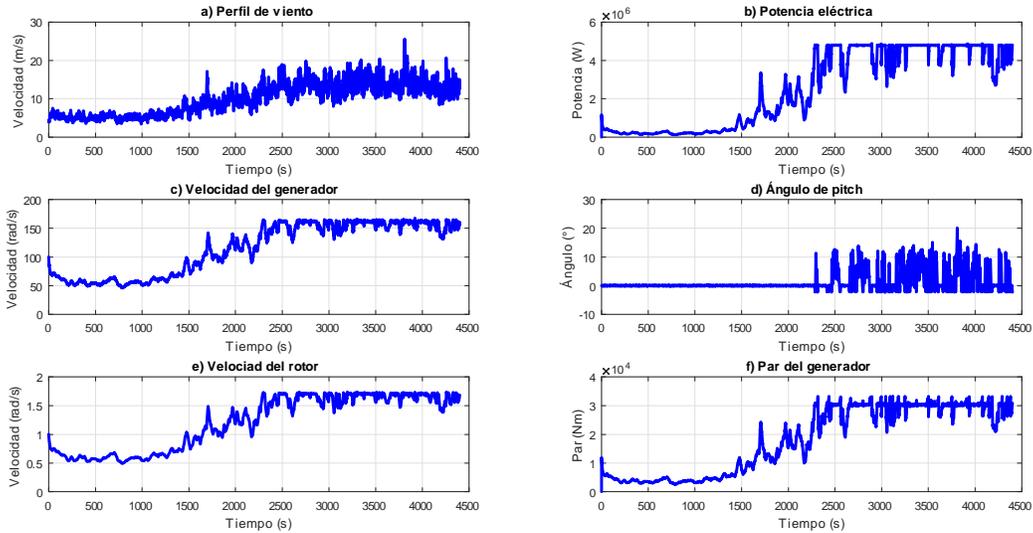


Figura 3.8: Dinámica del sistema de conversión de energía eólica.

Tabla 3.1: Parámetros del modelo del viento.

α	H	r_0
0.1	81 m	1.5 m

Tabla 3.2: Parámetros del modelo de la turbina y el sistema de *pitch*.

R	ρ	ζ	ω_n
57.5 m	1.225 $\frac{Kg}{m^3}$	0.6	11.11 $\frac{rad}{s}$

Tabla 3.3: Parámetros del modelo del tren de transmisión.

H_{dt}	F_r	F_g	N_g
775.49 $\frac{Nms}{rad}$	7.11 $\frac{Nms}{rad}$	45.6 $\frac{Nms}{rad}$	95
K_{dt}	η_{dt}	J_r	J_g
$2.7 \cdot 10^9 \frac{Nm}{rad}$	0.97	$55 \cdot 10^6 Kg \cdot m^2$	$390 Kg \cdot m^2$

Tabla 3.4: Parámetros del modelo del convertidor y generador.

γ	η_g
50 $\frac{rad}{s}$	0.98

Tabla 3.5: Parámetros del controlador.

K_{opt}	K_i	K_p
1.2172 $\frac{Nms}{rad}$	1.1	5
ω_{gn}	Δ_ω	P_r
162 rad/s	15 rad/s	4.8 MW

3.10. Conclusiones parciales

En este capítulo se presentó una descripción detallada de los elementos que integran a un sistema de conversión de energía eólica. Se presentó un modelo *benchmark* de turbina eólica tripala de velocidad variable con capacidad de 4.8 MW. El cual integra la dinámica del viento, la aerodinámica de la turbina, la dinámica del tren de transmisión y la dinámica acoplada del generador y convertidor.

También se presentó el diseño de una estrategia de control por regiones operación para regular la potencia eléctrica en el sistema de conversión de energía eólica. La estrategia de control se compone de un control para el sistema de *pitch* y un control de par del generador. De acuerdo con los resultados obtenidos en simulación, se puede identificar que en la región I (la cual corresponde a velocidades de viento menores a la velocidad nominal) el objetivo del control del sistema de *pitch* es la optimización de la captura de energía a partir de las palas de la turbina. Esto se consigue al establecer la referencia del ángulo de *pitch* en 0° . Por otro lado, para velocidades de viento mayores a la velocidad nominal, el objetivo del control es mantener la potencia eléctrica constante al realizar un seguimiento de un valor óptimo de par del generador.

Capítulo 4

Detección y aislamiento de fallas en sensores

4.1. Introducción

Los esquemas de detección y diagnóstico de fallas se utilizan para proporcionar información de las fallas presentes en un sistema. La información proporcionada suele especificar el tipo, magnitud, localización y tiempo de ocurrencia de las fallas. Generalmente la información se utiliza en sistemas de monitoreo o bien forma parte de la arquitectura de los denominados sistemas de control tolerante a fallas [72].

Actualmente se dispone de una gran variedad de métodos para realizar detección, aislamiento y diagnóstico de fallas. Generalmente los métodos se pueden agrupar en dos categorías: Métodos basados en datos y métodos basados en modelo.

Los métodos basados en datos se caracterizan por no requerir de un modelado matemático del sistema en estudio. Sólo necesitan datos de las entradas y salidas del sistema, así como un ligero conocimiento de su funcionamiento. En esta categoría se incluyen enfoques estadísticos, enfoques basados en redes neuronales y lógica difusa, análisis frecuencial y más recientemente los métodos denominados de aprendizaje profundo. Dentro de las técnicas de aprendizaje profundo en los últimos años la máquina de vectores de soporte (SVM, por sus siglas en inglés) ha recibido gran atención por parte la comunidad científica. En diversas apli-

caciones la SVM ha mostrado tener mejor desempeño que sus contrapartes, las máquinas de aprendizaje tradicional, como, por ejemplo, las redes neuronales [73]. Dadas las ventajas presentadas y la relativa simplicidad del algoritmo para adaptarse a diversas aplicaciones; en esta investigación se aplica el algoritmo de la SVM para resolver el problema de la detección de fallas en un WECS.

Por otro lado, a diferencia del enfoque basado en datos, los métodos basados en modelo sí requieren de un modelo matemático preciso para analizar la condición del sistema. El modelo se construye a partir del conocimiento de las leyes físicas que gobiernan el sistema. La información relativa a las fallas en el sistema se obtiene a partir del análisis de las entradas, las salidas y el modelo matemático del sistema. De la variedad de métodos dentro de esta categoría, se emplea el método basado en observadores de estado.

Debido a que el éxito de cualquier esquema de detección basado en modelo depende en gran medida de la precisión del modelo utilizado. En el presente trabajo se utiliza un tipo de observador con capacidad para manejar incertidumbre de modelado y perturbaciones externas que afectan el sistema.

4.2. Fallas en sistemas de conversión de energía eólica

Un sistema de conversión de energía eólica (WECS, por sus siglas en inglés) se construye a partir de la interconexión de múltiples subsistemas. Debido a la cantidad de componentes que lo integran y al entorno al que están expuestos, la aparición de fallas es un fenómeno muy común. Dependiendo del tipo y el componente afectado las fallas pueden ocasionar desde una simple degradación en la operación hasta incluso la destrucción del sistema completo.

4.2.1. Panorama general de las fallas

Las fallas en un WECS se pueden clasificar según su ubicación en fallas en actuadores, fallas en sensores y fallas en componentes. Estos tres tipos de fallas se describen a continuación.

Fallas en actuadores

Los actuadores son cruciales para el funcionamiento de un WECS, ya que influyen directamente en el proceso de conversión de la energía realizada por las turbinas eólicas. Las fallas en actuadores del WECS se pueden presentar en el sistema de *pitch*, el sistema de orientación y el convertidor de potencia. En esta tesis, solo se consideran fallas de los actuadores del sistema de *pitch*.

Las causas de una falla en el actuador del sistema de *pitch* se pueden clasificar en dos categorías: (1) causas internas debidas a los componentes del sistema, (2) causas externas debidas a factores ambientales. Generalmente, una falla en el actuador de *pitch* provoca un cambio en la dinámica del actuador.

Entre los factores externos que pueden provocar una falla en el actuador de *pitch* están: la suciedad y el hielo. Los cuales al acumularse en las aspas de la turbina pueden ocasionar una desviación en la señal de activación del ángulo de *pitch* de la turbina.

Si bien las fallas en el actuador de *pitch* se deben principalmente a los factores antes mencionados, el desequilibrio del rotor y la asimetría de las palas de la turbina causados por una fabricación defectuosa pueden afectar considerablemente el desempeño del actuador de *pitch* [74].

En cuanto a las causas de falla internas, estas se deben principalmente al sistema hidráulico o el motor eléctrico encargado del movimiento de las palas de la turbina. De hecho, el sistema hidráulico de la turbina registra un alto índice de incidencia de fallas. De acuerdo con un estudio de un parque eólico sueco, desde el año 2000 al 2020, el 13.3% de las fallas en WECS fueron ocasionadas por el sistema hidráulico. Las fallas en el sistema hidráulico se pueden originar a partir de una caída de presión o al contenido de aire en el aceite. La caída de presión generalmente es consecuencia de una bomba bloqueada o una fuga en una manguera. El contenido de aire en el aceite es inevitable ya que siempre habrá algo de aire en el aceite hidráulico. Tanto la caída de presión como la contaminación del aceite con aire cambiarán la dinámica del sistema del *pitch*.

Fallas en sensores

El WECS está dotado de una serie de sensores encargados de monitorear variables y proporcionar la realimentación necesaria al sistema de control.

Las variables medidas son: el ángulo de inclinación de las palas, la velocidad de rotación

de las palas, la velocidad del viento, la velocidad del generador, el par del generador, etc. Las fallas en sensores originan una degradación en el desempeño del sistema, ya que estos sensores proporcionan las señales de retroalimentación en el circuito de control del WECS. Las fallas en sensores pueden ser ocasionadas por factores eléctricos o mecánicos. Los desperfectos mecánicos o eléctricos también pueden provocar fallas en los sensores. Algunas mediciones en el WECS se obtienen con *encoders*. Los *encoders* pueden fallar debido a factores eléctricos o mecánicos. Un *encoder* defectuoso dará lugar a errores de factor de ganancia o valores de medición fijos (sin cambios).

Las condiciones climáticas también provocan fallas en los sensores, sobre todo algunos sensores montados en la superficie de la turbina. Los rayos del sol, el granizo, la formación de hielo, la suciedad, etc. pueden provocar fallas en los sensores. Por ejemplo, la aparición de una falla en un sensor de velocidad del rotor puede deberse a que los *encoders* lean más marcas en la parte giratoria, lo que puede suceder debido a la suciedad acumulada en la parte giratoria. Por otro lado, algunos sensores son sensibles a parámetros ambientales como la temperatura y la humedad. Los cambios de estos parámetros pueden resultar en compensaciones en la salida de los sensores.

Fallas en componentes

Las fallas de los componentes generalmente se encuentran en el sistema de transmisión de la turbina. La mayoría de las fallas de componentes en el sistema de transmisión son de tipo mecánicas. Estas fallas se originan en la caja de engranajes, el eje y el cojinete. En general, las fallas en el sistema de transmisión requieren mucho tiempo y un alto costo de mantenimiento. Las fallas del tren de impulsión ocurren con bastante frecuencia, es por ello que se han propuesto muchos métodos de diagnóstico y técnicas de monitoreo de condición para reducir el impacto de estas fallas. El principal desafío es detectar y aislar las fallas que están comenzando a desarrollarse antes de que ocasionen una avería en el sistema.

Las fallas de la caja de engranajes causadas por daños en los dientes del engranaje son comunes en el sistema de transmisión. El daño a los dientes puede deberse al desplazamiento y la excentricidad de las ruedas dentadas [75], [76]. Además, el desgaste dental siempre existe debido a la fuerte tensión en las ruedas dentadas. Las fallas de la caja de engranajes producen inevitablemente cambios en la relación de transmisión.

Es probable que los rodamientos del sistema de transmisión también sufran defectos.

La fatiga y el desgaste debido a cargas pesadas son inevitables. Por otra parte, picaduras y grietas inminentes también son causas de fallas. Estas fallas provocarán cambios en la dinámica del sistema del tren de transmisión.

El coeficiente de fricción en el tren de transmisión cambia lentamente con el tiempo y puede evolucionar durante meses o años. Este cambio también puede dar como resultado cambios en la dinámica del sistema del tren de transmisión.

4.2.2. Definición de fallas en el sistema

El modelo *benchmark* considerado como caso de estudio para el diseño de las estrategias de control tolerante a fallas, plantea 10 escenarios de falla distribuidos entre los diversos subsistemas que integran un WECS. Las fallas propuestas en sensores son del tipo valor fijo y factor de ganancia. Mientras las fallas de actuadores se presentan en el sistema de *pitch* y el convertidor, y se introducen mediante cambios en sus parámetros.

En este trabajo se abordaron 7 escenarios de falla distribuidos de la siguiente manera:

La falla 1 se presenta en el sensor 1 del sistema de *pitch* 1 y se modela con un valor fijo.

La falla 2 se presenta en el sensor 2 del sistema de *pitch* 2 y se modela con un factor de ganancia.

La falla 3 se presenta en el sensor 1 del sistema de *pitch* 3 y se modela con un valor fijo.

La falla 4 se presenta en el tren de transmisión en el sensor encargado de medir la velocidad del rotor y modela con un valor fijo.

La falla 5 se presenta en el tren de transmisión, en el sensor encargado de medir la velocidad del generador y se modela con un factor de ganancia.

La falla 6 se presenta en el sistema de *pitch* 3 y corresponde a una falla de actuador debido al aumento de contenido de aire en el aceite.

La falla 7 se presenta en el sistema de *pitch* 2 y corresponde a una falla de actuador provocada por una caída de presión.

A continuación, se especifican la magnitud de las fallas y el instante en el cual se presentan:

Falla 1. Valor fijo en $\beta_{1,m1}$ igual a 5° en un periodo de tiempo de 2000 s a 2100 s.

Falla 2. Ganancia en $\beta_{2,m2}$ igual a 1.2 en un periodo de tiempo de 2300 s a 2400 s.

Falla 3. Valor fijo en $\beta_{3,m1}$ igual a 10° en un periodo de tiempo de 2600 s a 2700 s.

Falla 4. Valor fijo en $\omega_{r,m1}$ igual a 1.4 rad/s en un periodo de tiempo de 1500 s a 1600 s.

Falla 5. Ganancia en $\omega_{g,m2}$ igual a 1.1 en un periodo de tiempo de 1000 s a 1100 s.

Falla 6. Cambio en la dinámica del sistema de *pitch 3* en el instante de tiempo 2900 s.

Falla 7. Cambio en la dinámica del sistema de *pitch 2* en el instante de tiempo 3470 s.

En la Figura 4.1 se presentan las señales con falla de los sensores del sistema de *pitch* y el sensor de velocidad del rotor. Las fallas consideradas en estos sensores corresponden a valores fijos y factores de ganancia.

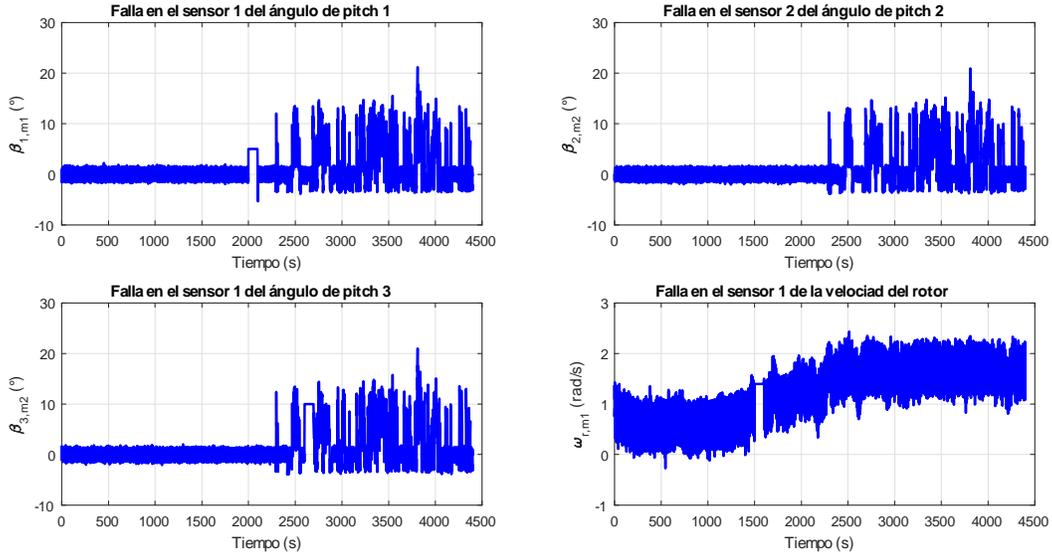


Figura 4.1: Simulación de fallas en sensores del sistema de *pitch* y de velocidad del rotor.

4.2.3. Propagación de fallas en el sistema

El método utilizado para realizar el análisis de fallas está basado en [77]. En la Figura se muestran las etapas de la metodología utilizada para realizar el análisis de propagación de fallas. Los objetivos de cada etapa del análisis se detallan a continuación:

Particionamiento de modelos: El modelo de la turbina eólica se divide en sub-modelos adecuados para el análisis y la identificación de las fallas en sensores y actuadores.

Análisis de propagación de fallas: En esta etapa se propaga la falla a través del sistema y se determina sus efectos finales a nivel del sistema.

Evaluación de fallas: En esta etapa se evalúan las fallas identificadas en el análisis de propagación de fallas, determinando su ocurrencia y su impacto en el desempeño del sistema de control de la turbina eólica. Así también se determinan los efectos finales que deben ser manejados o compensados.

Análisis estructural: Determina las relaciones de redundancia analítica en el sistema y se determinan las fallas detectables.

Especificación de fallas: En la especificación de fallas se describen las fallas identificadas en la evaluación de fallas.

Selección de acciones correctivas: En esta etapa se determinan las acciones a realizar para detener la propagación de las fallas sobre el WECS.

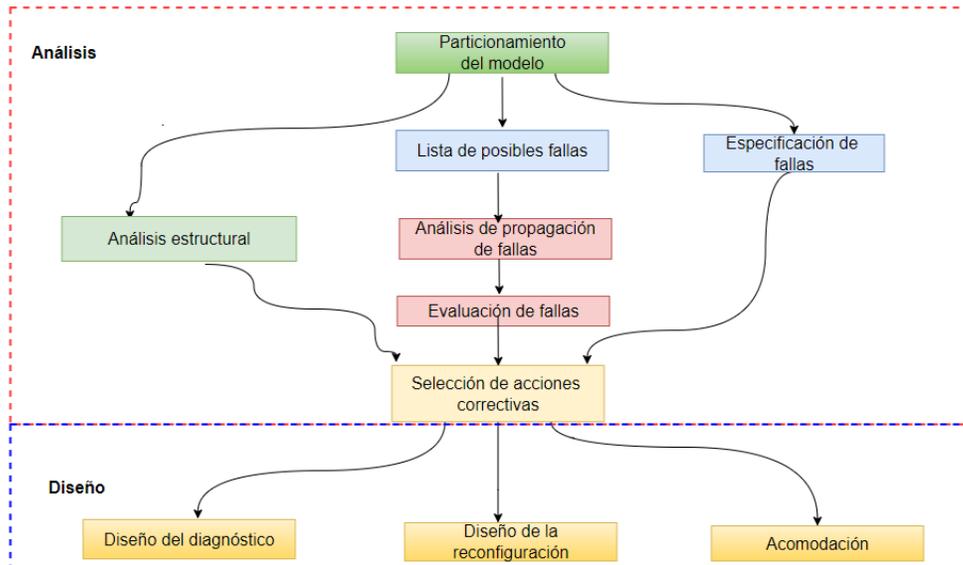


Figura 4.2: Análisis de propagación de fallas

A partir del análisis de propagación de fallas realizado sobre el WECS se determinó la severidad de cada una de las 7 fallas. Para las fallas en sensores del sistema de *pitch*, se encontró que estas fallas ocasionan una ligera degradación en la potencia eléctrica. Para corregir su efecto se propone reemplazar la señal del sensor con falla por la señal del sensor libre de falla. En la Figura 4.3 se presenta la dinámica de la potencia eléctrica en el intervalo donde se presentan las fallas en los sensores del sistema de *pitch*. Se puede notar que las fallas de tipo valor fijo en los sensores de *pitch* ocasionan una degradación en la potencia eléctrica, mientras la falla de tipo factor de ganancia no tiene un efecto aparente sobre la dinámica de la potencia eléctrica.

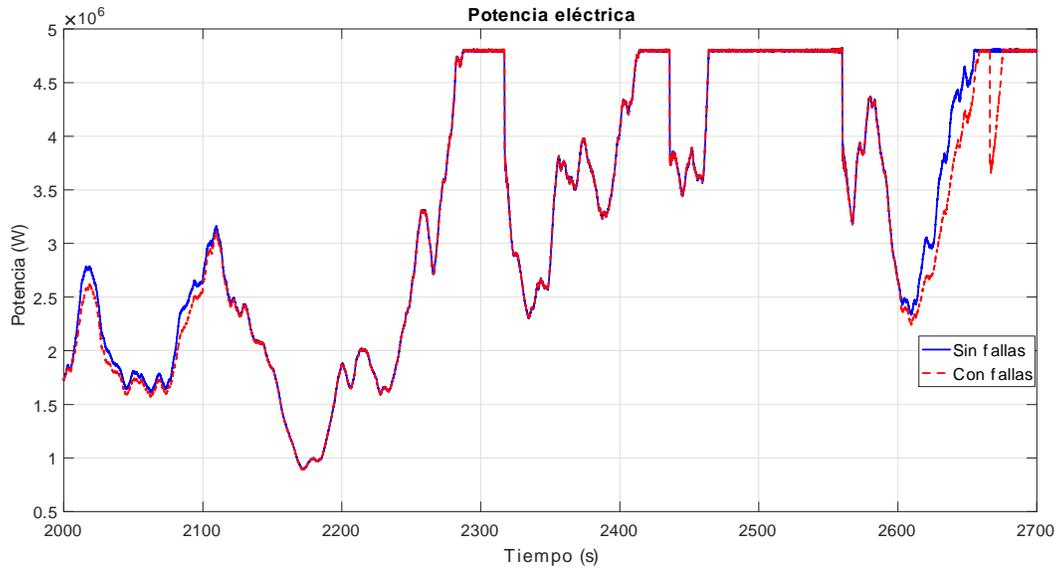


Figura 4.3: Dinámica de la potencia eléctrica sujeta a fallas en sensores de *pitch*.

Las fallas en sensores del tren de transmisión tienen un impacto directo sobre la dinámica de la potencia eléctrica. Para corregir el efecto de las fallas en sensores se propone reemplazar la señal del sensor con falla por la señal del sensor libre de falla.

Por otro lado, las fallas en actuadores tienen un mayor impacto en la dinámica del *pitch* y provoca una degradación significativa en la producción de potencia eléctrica. Para compensar su efecto se propone un control robusto que pueda manejar el cambio en la dinámica del *pitch*. Un resumen de la severidad y las acciones correctivas pertinentes para las 7 fallas consideradas se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Resumen de fallas.

Falla	Localización	Nomenclatura	Severidad	Acción correctiva
1	Sensor	FSFP1	Baja	Reconfiguración
2	Sensor	FSGP2	Baja	Reconfiguración
3	Sensor	FSFP3	Baja	Reconfiguración
4	Sensor	FSFT	Baja	Reconfiguración
5	Sensor	FSGT	Baja	Reconfiguración
6	Actuador	FAP3	Baja	Acomodación
7	Actuador	FAP2	Media	Acomodación

4.3. Detección de fallas basado en la máquina de vectores de soporte

La detección de fallas por medio de la máquina de vectores de soporte (SVM, por sus siglas en inglés) se desarrolla en dos partes. En primer lugar, se usa un conjunto de datos de medición con y sin falla para realizar el aprendizaje de los modelos para la detección de cada falla. Los modelos obtenidos se validan en un nuevo escenario de falla.

El paso clave para aprender un nuevo modelo para detección de fallas mediante SVM, es la definición del vector x que se utilizará para la clasificación. Este vector debe contener la información más pertinente sobre el comportamiento del sistema. No debe limitarse a la salida de medición. Puede incluir las entradas, los puntos de ajuste, la combinación de estos o la variación de las salidas con el tiempo. Para construir un vector útil, uno debe observar cuidadosamente las salidas del proceso para cada falla y proponer una combinación que asegure un impacto suficientemente alto de la falla considerada. El uso de algunos análisis estadísticos, como el análisis de componentes principales o el cuadrado mínimo parcial, puede ser útil para el pretratamiento.

Se propusieron diferentes vectores para los diferentes tipos de fallas, pero el núcleo (la función *kernel*) utilizado para aprender todas las fallas es *gaussiano* (con diferentes valores de varianza). La mayoría de los datos se filtran (los datos filtrados se notan con un sombrero, $\hat{\cdot}$) usando un filtro de primer orden con una constante de tiempo τ para reducir la sensibilidad a las perturbaciones del proceso o al ruido de medición.

Debido a que sistema de conversión de energía eólica cuenta con redundancia de hardware, esto se aprovecha para construir los vectores de datos de características utilizados en el algoritmo SVM. Los vectores de datos se construyen a partir de la diferencia de las señales obtenidos de los sensores en el instante actual y un instante posterior.

Para la falla FSFP1 el vector de datos propuesto para realizar la detección en el *pitch* 1, viene dado por:

$$x = \begin{vmatrix} \hat{\beta}_{1,m1}(t_j) - \hat{\beta}_{1,m2}(t_j) \\ \hat{\beta}_{1,m1}(t_j) - \hat{\beta}_{1,m1}(t_{j-1}) \\ \hat{\beta}_{1,m2}(t_j) - \hat{\beta}_{1,m2}(t_{j-1}) \end{vmatrix} \quad (4.1)$$

donde t_j y t_j son los instantes de tiempo j y $j - 1$ respectivamente y $\hat{\beta}$ denota que las señales utilizadas han sido filtradas con un filtro pasa bajas de primer orden con constante $\tau = 0.07$ s.

El vector de datos propuesto para realizar la detección de la falla FSGP2 en el *pitch* 2, viene dado por:

$$x = \begin{vmatrix} \hat{\beta}_{2,m1}(t_j) - \hat{\beta}_{2,m2}(t_j) \\ \hat{\beta}_{2,m1}(t_j) - \hat{\beta}_{2,m1}(t_{j-1}) \\ \hat{\beta}_{2,m2}(t_j) - \hat{\beta}_{2,m2}(t_{j-1}) \\ \hat{\beta}_{r,2}(t_j) - \hat{\beta}_{2,m2}(t_j) \\ \hat{\beta}_{r,2}(t_j) - \hat{\beta}_{2,m1}(t_j) \end{vmatrix} \quad (4.2)$$

donde t_j y t_j son los instantes de tiempo j y $j - 1$ respectivamente, $\beta_{r,2}$ es la señal de referencia del ángulo de *pitch* 2 y $\hat{\beta}$ denota que las señales utilizadas han sido filtradas con un filtro pasa bajas de primer orden con constante $\tau = 0.06$ s.

Por otro lado, para la falla FSFP3 el vector de datos propuesto toma la forma:

$$x = \begin{vmatrix} \hat{\beta}_{3,m1}(t_j) - \hat{\beta}_{3,m2}(t_j) \\ \hat{\beta}_{3,m1}(t_j) - \hat{\beta}_{3,m1}(t_{j-1}) \\ \hat{\beta}_{3,m2}(t_j) - \hat{\beta}_{3,m2}(t_{j-1}) \end{vmatrix} \quad (4.3)$$

Para la falla FSTF en el sensor de la velocidad del rotor, se propone el siguiente vector

de datos:

$$x = \begin{pmatrix} \hat{\omega}_{r,m1}(t_j) - \hat{\omega}_{r,m2}(t_j) \\ \hat{\omega}_{r,m1}(t_j) - \hat{\omega}_{r,m1}(t_{j-1}) \\ \hat{\omega}_{r,m2}(t_j) - \hat{\omega}_{r,m2}(t_{j-1}) \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

donde $\hat{\omega}_{r,mi}$ denota que las señales utilizadas han sido filtradas mediante un filtro pasa bajas de primer orden con constante $\tau = 0.01$ s.

4.4. Detección y aislamiento de fallas basado en observadores

El éxito de cualquier esquema de detección de fallas basado en observadores depende en gran medida de la precisión del modelo utilizado. Por lo cual, en el presente trabajo se utiliza un tipo de observador con capacidad para manejar incertidumbre de modelado y perturbaciones externas que pudieran afectar el sistema.

Para lograr la detección y aislamiento de fallas en el enfoque basado en modelo utilizando observadores, algunos autores han propuesto configuraciones particulares de bancos de observadores. En este trabajo el esquema propuesto está basado en la configuración presentada en [78], y se muestra en la Figura 4.4.

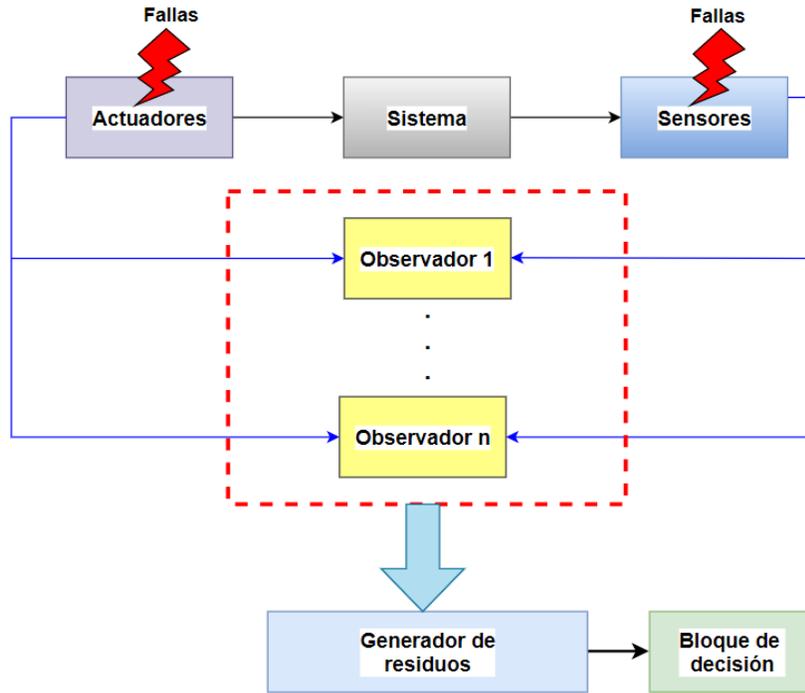


Figura 4.4: Arquitectura general de la detección de fallas basado en observadores.

El esquema propuesto consiste de un conjunto de observadores dedicados a aislar p fallas de sensores, la configuración propuesta permite que el observador p utilice todas las entradas y sólo la salida p del sistema. De esta manera se logra que el observador p , sea sensible sólo a las fallas del sensor p . El bloque generador de residuos genera un conjunto de residuos estructurados a partir de la diferencia de las variables medidas y las estimadas por el banco de observadores. En el bloque de decisión, se toma la decisión de la presencia de una falla si el residuo sobrepasa un umbral preestablecido.

En el diseño del esquema de detección y aislamiento de fallas utilizado en este trabajo, se asume que solo una falla puede presentarse a la vez. El esquema considera dos tipos particulares de fallas en sensores. Fallas de valor fijo y fallas de valor escalado. El comportamiento de una falla de valor fijo caracteriza la situación donde el sensor presenta un atascamiento en sus mediciones, enviando un valor constante de la señal medida. Por otra parte las fallas de valor escalado resultan de multiplicar la señal del sensor por una ganancia. Ambos tipos

de fallas se presentan en el sistema de *pitch* y el tren de transmisión.

4.4.1. Detección y aislamiento de fallas en sensores del sistema de *pitch*

En general, para realizar la detección de fallas en el sistema de *pitch*, se aprovecha la redundancia de *hardware* del propio sistema, ya que se dispone de dos sensores para realizar la misma medición del ángulo de posición de las aspas. En los sensores de *pitch* se pueden presentar las siguientes clases de fallas: FSFP1, FSGP2 y FSFP3 (ver la Tabla 4.1). Las fallas FSFP1 y FSFP3 son a fallas en sensores de tipo valor fijo en el sistema de *pitch* 1 y 3, respectivamente. Las fallas se pueden presentar en cualquiera de los dos sensores utilizados para medir ángulo del *pitch*. Con base en esta suposición las mediciones de ángulo *pitch* para el caso libre de fallas deberían ser: $\beta_{i,m1} = \beta_i + \sigma$ y $\beta_{i,m2} = \beta_1 + \sigma$ donde σ representa el ruido asociado a la medición. Cuando se presenta alguna de estas fallas en el sensor 1 del *pitch* 1 o 3, la medición del sensor 1 se puede caracterizar como: $\beta_{i,m1} = \beta_i + \sigma + f$ donde f representa la falla. Mientras la medición 2 permanece en estado normal. Si la falla se presenta en el sensor 2, entonces la medición del sensor 1 permanece en condiciones normales y la medición del sensor 2 se puede caracterizar como: $\beta_{i,m2} = \beta_i + \sigma + f$.

Por otro lado, la falla FSGP2 es una falla en sensores del tipo factor de ganancia, la cual tiene la característica de afectar la medición proporcionada por el sensor a través de un factor multiplicativo, el cual puede amplificar o atenuar la señal del sensor. Una vez se presenta esta falla en el sistema de *pitch* 2, la salida de los sensores se puede caracterizar de la siguiente manera: Si la falla se presenta en el sensor 1, esta se puede caracterizar como: $\beta_{2,m1} = \chi\beta_2 + \sigma$, donde χ es un factor de ganancia. Mientras la medición 2 permanece en estado normal. Ahora bien, si la falla se presenta en el sensor 2, entonces la medición del sensor 1 permanece en condiciones normales y la medición del sensor 2 se puede caracterizar como: $\beta_{2,m2} = \chi\beta_2 + \sigma$.

Para realizar la detección y aislamiento de fallas en el sistema de *pitch* se propone la arquitectura mostrada en la Figura 4.5 . En la figura se puede apreciar la configuración particular del banco de observadores mediante el cual se pretende estimar las mediciones del ángulo del *pitch*, el cual se mide con dos sensores por razones de redundancia de *hardware*.

Debido a que el sistema de *pitch* se integra por tres subsistemas idénticos se tienen un total de seis sensores. La configuración del banco de observadores permite que el observador encargado de estimar la salida 1 del *pitch* i , es decir el observador $i,1$, solo utilice la medición del sensor 1 del *pitch* i . De esta manera se logra que el observador, sea sensible solo a fallas en ese sensor. El bloque generador de residuos genera un conjunto de residuos estructurados a partir de la diferencia de las variables medidas y las estimadas por los observadores. En el bloque de decisión genera una alarma si alguno de los residuos sobrepasa un umbral preestablecido, el cual se establece a partir del comportamiento de los residuos antes y después de la falla.

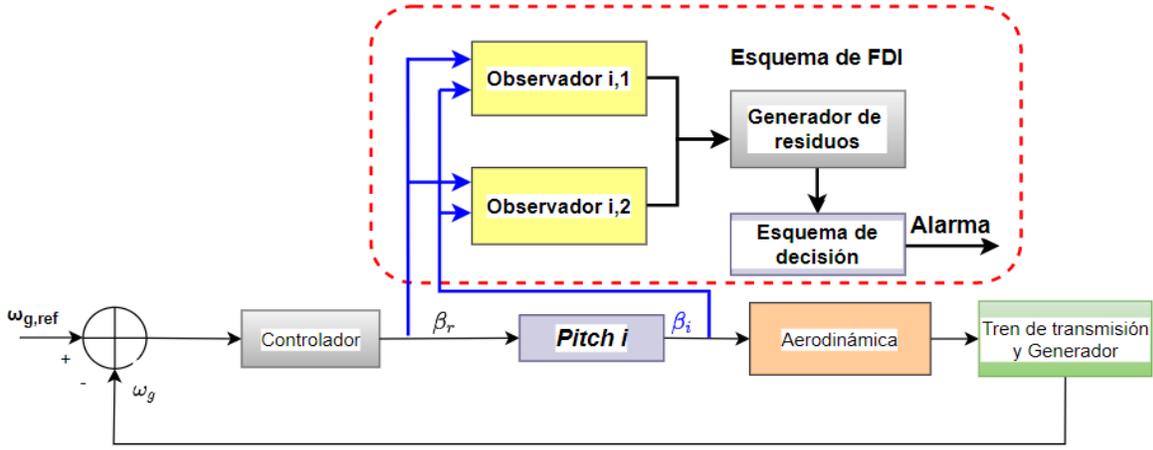


Figura 4.5: Arquitectura del esquema FDI para el sistema de *pitch*.

Para realizar el diseño del banco de observadores. El modelo en lazo cerrado del sistema de *pitch* se lleva a una representación en el espacio de estado dada por:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{pb}^i(t) &= A_{pb}^i x_{pb}^i(t) + B_{pb}^i \beta_r^i(t) + M \xi_{pb}^i(t, x, u) \\ y_{pb}^i(t) &= C_{pb}^i x_{pb}^i(t) \end{aligned} \quad (4.5)$$

donde: $x_{pb}^i(t) = \begin{bmatrix} \beta_i(t) \\ \dot{\beta}_i(t) \end{bmatrix}$ es el vector de estados, $A_{pb}^i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix}$, $B_{pb}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \end{bmatrix}$, $C_{pb}^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$ con β_i ($i = 1, 2, 3$). $y_{pb}^i \in \mathbb{R}$ es la medición del ángulo del *pitch* i , $\beta_r^i \in \mathbb{R}$ es la señal de referencia de posición de *pitch* i proporcionada por el controlador, $\xi_{pb}^i \in \mathbb{R}^q$ es una perturbación utilizada para introducir el error causado por la falla en el sensor de *pitch*

i y $M \in \mathbb{R}^{n \times q}$ es la matriz de distribución de la perturbación. Debido a que el sistema de *pitch* está compuesto de 3 subsistemas idénticos, el super-índice i hace referencia al sistema de *pitch* 1, 2 y 3.

Para el modelo del sistema de *pitch* se propone un observador por modos deslizantes de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{pb}^i(t) &= A_{pb}^i \hat{x}_{pb}^i(t) + B_{pb}^i \beta_r^i(t) - G_l^i e_y^i(t) + G_{nl}^i v^i \\ \hat{y}_{pb}^i(t) &= \hat{\beta}_i(t),\end{aligned}\tag{4.6}$$

donde la dinámica del error de estimación de la salida viene dada por $e_y^i(t) = \hat{\beta}_i(t) - \beta_i(t)$. Mientras el error de estimación del estado $\hat{\beta}_i$ viene dado por $e_1^i(t) = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_i(t) & \dot{\beta}_i(t) \end{bmatrix}$ y v^i es el término de inyección del error definido a partir de la Ec. (2.51).

Para probar la convergencia del observador en modos deslizantes se seleccionaron las ganancias lineal y no lineal como $G_l^i = [0.04 \ -1]^T$ y $G_{nl}^i = [0.0081 \ 0]^T$, respectivamente. Las condiciones iniciales del sistema y del observador son: $x_{pb} = [1 \ -1]^T$ y $\hat{x}_{pb} = [0.5 \ 0.4]^T$, respectivamente.

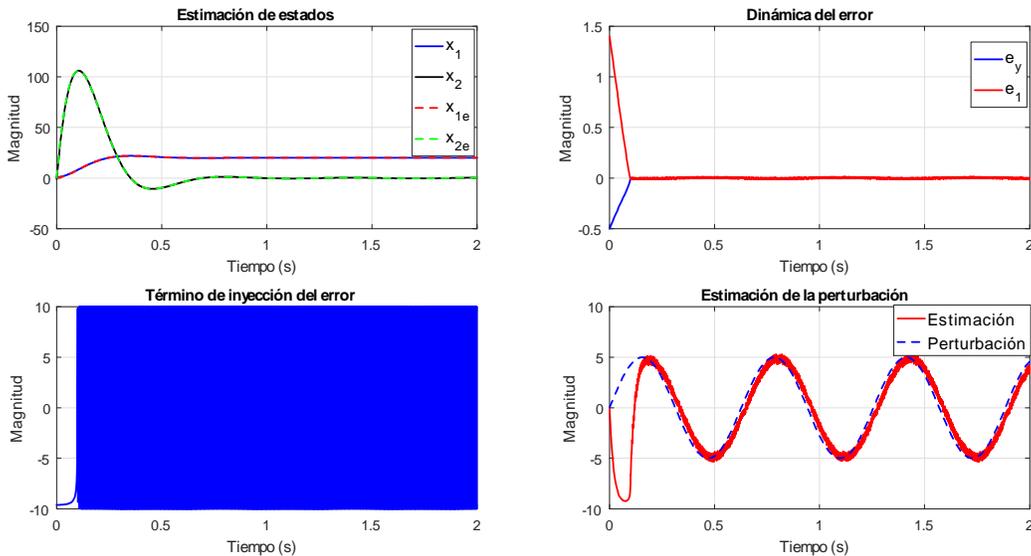


Figura 4.6: Convergencia del observador del sistema de *pitch*.

En la Figura 4.6 se puede observar que el observador realiza un adecuado seguimiento de la dinámica de los estados. A partir de la dinámica del error se puede notar que una vez se alcanza la condición de modo deslizante, el término de inyección del error comienza a realizar una conmutación a alta frecuencia entre -10 y 10. Al filtrar esta señal a través de un filtro pasa bajas representado en la Ec. (2.38) y con constante igual a $\tau = 0.02$ se puede reconstruir la perturbación agregada al sistema. La perturbación considerada se definió como: $\xi_{pb}^i(t) = 5 \sin(10t)$ y la matriz $M = [0 \ 1]^T$. Los resultados obtenidos demuestran que el observador resultó ser robusto a la perturbación agregada al sistema. Cabe señalar que para alcanzar esta condición, no se requirió un conocimiento a priori de la perturbación.

Es importante mencionar que la reconstrucción de la perturbación es posible, siempre que se trate de una perturbación acotada y se presente a través del canal de entrada del sistema. Si estas condiciones se cumplen, la reconstrucción de la señal se obtiene a partir del concepto de control equivalente. Además, la reconstrucción de la perturbación se realiza una vez que comienza la dinámica en modos deslizante.

Una vez demostrada la convergencia del observador en modos deslizantes, en la siguiente sección se utiliza el observador propuesto para realizar la tarea de detección y aislamiento de fallas en cada uno de los tres subsistemas de *pitch*.

Detección y aislamiento de fallas en el sistema de *pitch* 1

Para realizar la detección y aislamiento de fallas en el sistema de *pitch* 1 se utiliza un banco de observadores (en modos deslizantes), donde cada observador se encarga de estimar las salidas de los dos sensores del *pitch* 1. La diferencia entre la salida estimada por el observador y la medida por el sensor se utiliza para generar un conjunto estructurado de residuos. El residuo se espera presente desviaciones significativas respecto de cero cuando se presente una falla en el sensor y, por otro lado, permanezca muy cercano a cero cuando el sensor se encuentre libre de fallas.

En el sistema de *pitch* 1 se presenta la falla 1 tipo FSFP1. Esta falla se puede presentar en la medición del sensor 1 ($\beta_{1,m1}$), o en la del sensor 2 ($\beta_{1,m2}$). Para discernir si la falla se presenta en el sensor 1 o en el sensor 2 se diseñaron dos estimadores de estado, que permiten reconstruir la señal medida por los sensores. Para el diseño se consideran dos casos:

Caso 1. La falla se presenta en el sensor 1.

En este caso la salida de interés es $y_{pb1}^1(t) = \beta_{1,m1}$, por lo que, a partir de la Ec.(2.48), el observador por modos deslizantes, para el sistema de *pitch* 1, toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{pb1}^1(t) &= A_{pb1}^1 \hat{x}_{pb1}^1(t) + B_{pb1}^1 \beta_r^1(t) - G_{l1}^1 e_{y1}^1(t) + G_{nl1}^1 v_1^1 \\ \hat{y}_{pb1}^1(t) &= \hat{\beta}_{1,m1}(t)\end{aligned}\quad (4.7)$$

Caso 2. La falla se presenta en el sensor 2.

En este caso la salida de interés es $y_{pb2}^1(t) = \beta_{1,m2}$ y por lo tanto, partir de la Ec.(2.48) el observador por modos deslizantes para el sistema de *pitch* 1, toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{pb2}^1(t) &= A_{pb2}^1 \hat{x}_{pb2}^1(t) + B_{pb2}^1 \beta_r^1(t) - G_{l2}^1 e_{y2}^1(t) + G_{nl2}^1 v_2^1 \\ \hat{y}_{pb2}^1(t) &= \hat{\beta}_{1,m2}(t),\end{aligned}\quad (4.8)$$

donde \hat{x}_{pb}^1 y \hat{y}_{pb}^1 son las estimaciones del estado y la salida, respectivamente. G_l^1 y G_{nl}^1 son elegidas para asegurar la estabilidad y convergencia en tiempo finito de la dinámica del error.

La dinámica del error viene dada por: $e_{y1}^1(t) = \hat{\beta}_{1,m1}(t) - \beta_{1,m1}(t)$ y $e_{y2}^1(t) = \hat{\beta}_{1,m2}(t) - \beta_{1,m2}(t)$, para el observador (4.7) y (4.8), respectivamente. El término v responsable de inducir el modo deslizante es la inyección del error y viene dado por:

$$v = \left\{ \begin{array}{ll} -\rho \|M_2\| \frac{P_2 C e}{\|P_2 C e\|} & \text{si } e_y \neq 0 \\ 0 & \text{si } e_y = 0 \end{array} \right\} \quad (4.9)$$

A partir de las estimaciones realizadas por los observadores se definen dos señales residuales para el sistema de *pitch* 1 como: $r_{1,1}^{pb} = |\hat{y}_{pb1}^1(t) - \beta_{1,m1}(t)|$ y $r_{1,2}^{pb} = |\hat{y}_{pb2}^1(t) - \beta_{1,m2}(t)|$. El análisis de las señales residuales y su interpretación permite obtener los síntomas o firmas de falla que se muestran en la Tabla 4.2. Se asume que el 1 indica que una falla ha sido detectada en el sistema de *pitch* 1, y de forma específica se puede determinar en qué sensor se presentó. El 0 indica el caso contrario, es decir, que el sistema *pitch* 1 se encuentra libre de fallas.

Tabla 4.2: Firmas de falla en el *pitch* 1.

Falla 1 (FSFP1)	$r_{1,1}^{pb}$	$r_{1,2}^{pb}$
Sensor 1	1	0
Sensor 2	0	1

Detección y aislamiento de fallas en el sistema de *pitch* 2

En el sistema de *pitch* 2 se presenta la falla 2 (FSGP2). Para realizar la detección y aislamiento de esta falla, se asumen dos casos:

Caso 1. La falla se presenta en el sensor 1.

En este caso la salida de interés es $y_{pb1}^2(t) = \beta_{2,m1}$ y por lo tanto, a partir de la Ec.(2.48) el observador por modos deslizantes para el sistema de *pitch* 2 toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{pb1}^2 &= A_{pb1}^2 \hat{x}_{pb1}^2(t) + B_{pb1}^2 \beta_r^2(t) - G_{l1}^2 e_{y1}^2(t) + G_{nl1}^2 v_1^2 \\ \hat{y}_{pb1}^2 &= \hat{\beta}_{2,m1}(t)\end{aligned}\quad (4.10)$$

Caso 2. La falla se presenta en el sensor 2.

En este caso la salida de interés es $y_{pb2}^2(t) = \beta_{2,m2}$ y por lo tanto, a partir de la Ec.(2.48) el observador por modos deslizantes para el sistema de *pitch* 2 toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{pb2}^2 &= A_{pb2}^2 \hat{x}_{pb2}^2(t) + B_{pb2}^2 \beta_r^2(t) - G_{l2}^2 e_{y2}^2(t) + G_{nl2}^2 v_2^2 \\ \hat{y}_{pb2}^2 &= \hat{\beta}_{2,m2}(t),\end{aligned}\quad (4.11)$$

donde \hat{x}_{pb}^2 y \hat{y}_{pb}^2 son las estimaciones del estado y la salida del *pitch* 2, respectivamente. G_l^2 y G_{nl}^2 son elegidas para asegurar la estabilidad y convergencia en tiempo finito de la dinámica del error. La dinámica del error se define como: $e_{y1}^2(t) = \hat{\beta}_{2,m1}(t) - \beta_{2,m1}(t)$ y $e_{y2}^2(t) = \hat{\beta}_{2,m2}(t) - \beta_{2,m2}(t)$. A partir de las estimaciones realizadas por los observadores se definen dos señales residuales para el sistema de *pitch* 2 como: $r_{2,1}^{pb} = |\hat{y}_{pb1}^2(t) - \beta_{2,m1}(t)|$ y $r_{2,2}^{pb} = |\hat{y}_{pb2}^2(t) - \beta_{2,m2}(t)|$. Para lograr el aislamiento de esta falla se utiliza la Tabla 4.3, que contiene las firmas de falla del sistema en el sistema de *pitch* 2.

Tabla 4.3: Firmas de falla en el *pitch* 2.

Falla 2 (FSGP2)	$r_{2,1}^{pb}$	$r_{2,2}^{pb}$
Sensor 1	1	0
Sensor 2	0	1

Deteccción y aislamiento de fallas en el sistema de *pitch* 3

Par terminar con el diseño del esquema de FDI se considera la falla 3 (FSFP3), la cual es una falla de valor fijo en el *pitch* 3. De manera similar a los dos sistemas previamente analizados. Se diseñan dos observadores por modos deslizantes considerando dos casos:

Caso 1. La falla se presenta en el sensor 1.

En este caso la salida de interés es $y_{pb1}^3(t) = \beta_{3,m1}$ y el diseño del observador por modos deslizantes toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{pb1}^3(t) &= A_{pb1}^3 \hat{x}_{pb1}^3(t) + B_{pb1}^3 \beta_r^3(t) - G_{l1}^3 e_{y1}^3(t) + G_{nl1}^3 v_1^3 \\ \hat{y}_{pb1}^3(t) &= \hat{\beta}_{3,m1}(t)\end{aligned}\quad (4.12)$$

Caso 2. La falla se presenta en el sensor 2.

En este caso la salida de interés es $y_{pb2}^3(t) = \beta_{3,m2}$ y el diseño del observador por modos deslizantes toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{pb2}^3(t) &= A_{pb2}^3 \hat{x}_{pb2}^3(t) + B_{pb2}^3 \beta_r^3(t) - G_{l2}^3 e_{y2}^3(t) + G_{nl2}^3 v_2^3 \\ \hat{y}_{pb2}^3(t) &= \hat{\beta}_{3,m2}(t)\end{aligned}\quad (4.13)$$

En este caso la dinámica del error se define como: $e_{y1}^3(t) = \hat{\beta}_{3,m1}(t) - \beta_{3,m1}(t)$ y $e_{y2}^3(t) = \hat{\beta}_{3,m2}(t) - \beta_{3,m2}(t)$. A partir de las estimaciones realizadas por los observadores se definen dos señales residuales para el sistema de *pitch* 3 como: $r_{3,1}^{pb} = |\hat{y}_{pb1}^3(t) - \beta_{3,m1}(t)|$ y $r_{3,2}^{pb} = |\hat{y}_{pb2}^3(t) - \beta_{3,m2}(t)|$. Para alcanzar el aislamiento de esta falla se utiliza la Tabla 4.4, que contiene las firmas de falla del sistema en el sistema de *pitch* 3.

Tabla 4.4: Firmas de falla en el *pitch* 3.

Falla 3 (FSFP3)	$r_{3,1}^{pb}$	$r_{3,2}^{pb}$
Sensor 1	1	0
Sensor 2	0	1

4.4.2. Detección y aislamiento de fallas en sensores del tren de transmisión

Para lograr la detección y aislamiento de fallas en el tren de transmisión, se propone la arquitectura mostrada en la Figura 4.7. Donde cada observador tiene todas las entradas del tren de transmisión, es decir, el par del rotor y el par del generador y sólo la medición del sensor correspondiente. El tren de transmisión cuenta con redundancia de hardware de manera que la medición de la velocidad del rotor y generador se realiza con dos sensores respectivamente. Por lo tanto, se requiere un banco de cuatro observadores, a fin de que cada uno de ellos sea sensible solo a fallas presentes en el sensor que alimenta la señal de salida correspondiente al observador.

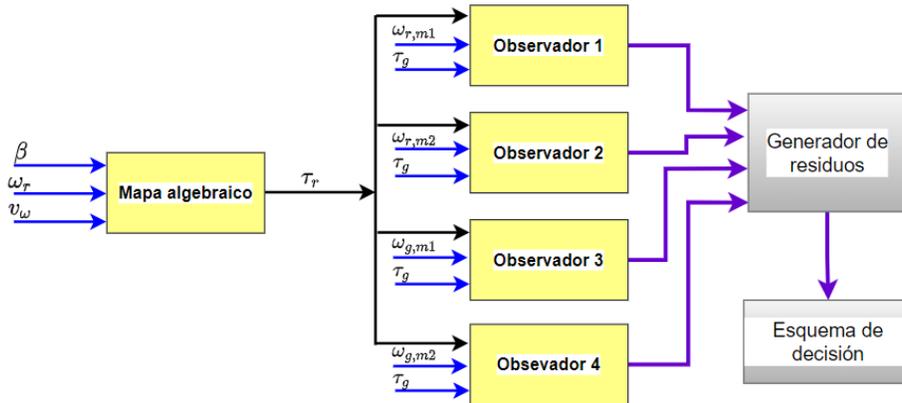


Figura 4.7: Esquema FDI para el tren de transmisión.

Debido a que el par de rotor no se puede medir, en este esquema se utiliza un estimador basado en un mapa algebraico que depende la medición de la velocidad del viento, el ángulo de

pitch y la velocidad del rotor. En el bloque generador de residuos, los errores de estimación de cada una de las salidas se utilizan como residuos. Después en el bloque de toma de decisiones, se genera una alarma si alguno de los residuos sobrepasa un umbral preestablecido.

Para diseñar el banco de observadores se lleva el modelo del sistema de transmisión a una representación matricial dada por:

$$\begin{aligned}\dot{x}_{dt}(t) &= A_{dt}x_{dt}(t) + B_{dt}u_{dt}(t) + M\xi_{dt}(t, x, u) \\ y_{dt}(t) &= C_{dt}x_{dt}(t)\end{aligned}\quad (4.14)$$

donde $x_{dt}(t) = \begin{bmatrix} \omega_r(t) & \omega_g(t) & \theta(t) \end{bmatrix}^T$, $u_{dt}(t) = \begin{bmatrix} \tau_r(t) & \tau_g(t) \end{bmatrix}^T$ y las matrices del sistema, entrada y salida vienen dadas respectivamente por:

$$A_{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{H_{dt}-F_r}{J_r} & \frac{H_{dt}}{N_g J_r} & -\frac{K_{dt}}{J_r} \\ \frac{\eta_{dt} H_{dt}}{N_g J_g} & -\frac{\eta_{dt} H_{dt} - F_g}{N_g^2 J_g} & \frac{\eta_{dt} K_{dt}}{N_g J_g} \\ 1 & \frac{-1}{N_g} & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{dt} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_g} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad C_{dt} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

El término $\xi_{dt}(t, x, u)$ representa la incertidumbre asociada al sistema y $M \in \mathbb{R}^{n \times q}$ es la matriz de distribución de la perturbación. Mientras que el par del generador se obtiene a partir de la Ec. (3.20).

Para el modelo representado en la Ec. (4.14) se propone un observador en modos deslizantes con la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{dt}(t) &= A_{dt}\hat{x}_{dt}(t) + B_{dt}u_{dt}(t) - G_l e_y(t) + G_{nl} v \\ \hat{y}_{dt}(t) &= C_{dt}\hat{x}_{dt}(t),\end{aligned}\quad (4.16)$$

donde la dinámica del error de estimación de la salida viene dada por:

$$e_y(t) = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_r(t) - \omega_r(t) \\ \hat{\omega}_g(t) - \omega_g(t) \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

La ganancia lineal viene dada por:

$$G_l = \begin{bmatrix} 9.9999 & -0.0034 \\ 0.020 & 19.88 \\ 1 & -0.0094 \end{bmatrix},$$

mientras la ganancia no lineal es:

$$G_{nl} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Las condiciones iniciales del sistema y del observador son: $x_{pb} = [1 \ -1 \ 1]^T$ y $\hat{x}_{pb} = [0.5 \ 0.4 \ 0.2]^T$, respectivamente. Para las entradas se emplearon señales de tipo escalón. El par de rotor se estableció en 10 Nm mientras el par del generador se estableció en 100 Nm .

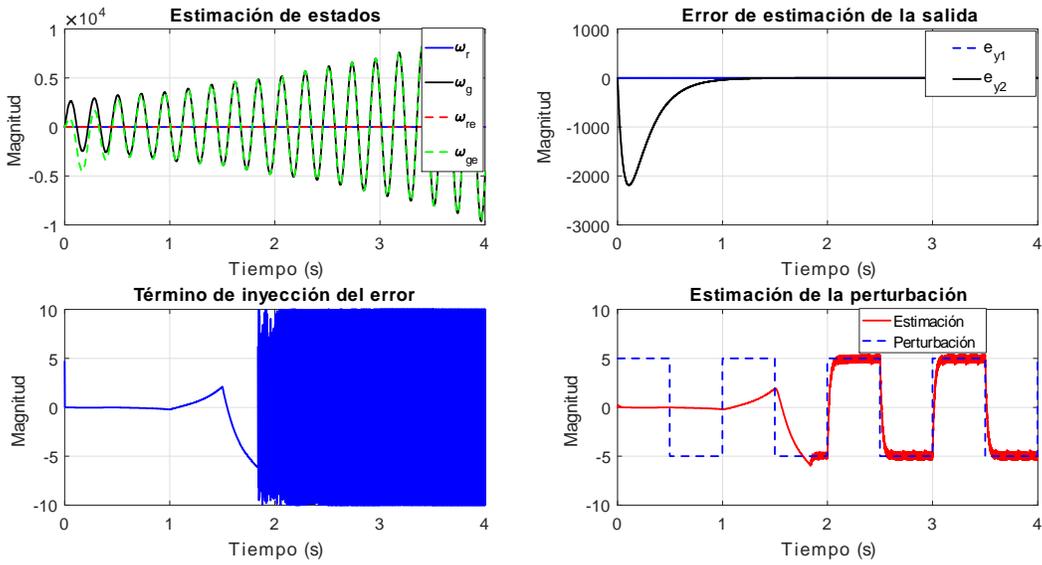


Figura 4.8: Convergencia del observador del tren de transmisión

En la Figura 4.8 se puede observar que el observador realiza un adecuado seguimiento de la dinámica de los estados del tren de transmisión. La perturbación considerada es una señal cuadrada de magnitud 5 y la matriz $M = [1 \ 0 \ 0]^T$, con lo cual la perturbación actúa en el canal de la entrada correspondiente al par del rotor. Los resultados obtenidos demuestran que el observador resultó ser robusto a la perturbación y, además, se logra una reconstrucción completa de la perturbación una vez se alcanza la condición de movimiento en modo deslizante.

En el tren de transmisión se pueden presentar la falla 4 (denotada por FSFT) y la falla 5 (denotada como FSGT). La falla denotada por FSGT es una falla en el sensor de velocidad del rotor que se puede presentar el cualquier de los dos sensores utilizados para medir esta variable. Por lo tanto, para realizar la detección de esta falla se utiliza un conjunto de dos observadores con los cuales se estima la variable medida por cada sensor de forma independiente.

A partir del modelo del sistema dado por la Ec. (4.14) se proponen dos observadores por modos deslizantes para estimar la velocidad del rotor de la forma:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{dt}^1(t) &= A_{dt}\hat{x}_{dt}^1(t) + B_{dt}^1u_{dt}(t) - G_l^1e_y^1(t) + G_{nl}^1v^1 \\ \hat{y}_{dt}^1(t) &= \hat{\omega}_{r,m1}(t),\end{aligned}\tag{4.18}$$

y

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{dt}^2(t) &= A_{dt}\hat{x}_{dt}^2(t) + B_{dt}^2u_{dt}(t) - G_l^2e_y^2(t) + G_{nl}^2v^2 \\ \hat{y}_{dt}^2(t) &= \hat{\omega}_{r,m2}(t)\end{aligned}\tag{4.19}$$

donde \hat{x}_{dt} y \hat{y}_{dt} son las estimaciones correspondientes a los estados y las salidas del sistema, respectivamente. La ganancias lineal G_l y no lineal G_{nl} son elegidas para asegurar la estabilidad y convergencia en tiempo finito de la dinámica del error. La dinámica del error de cada observador viene dada por: $e_y^1(t) = \hat{\omega}_{r,m1}(t) - \omega_{r,m1}(t)$ y $e_y^2(t) = \hat{\omega}_{r,m2}(t) - \omega_{r,m2}(t)$. Dos señales residuales se obtienen como: $\mathbf{r}_{4,1}^{dt} = |\hat{y}_{dt}^1(t) - \omega_{r,m1}(t)|$ y $\mathbf{r}_{4,2}^{dt} = |\hat{y}_{dt}^2(t) - \omega_{r,m2}(t)|$. Estas señales permiten detectar y aislar la falla 4.

Por otro lado, debido a que la falla 5 es del tipo factor de ganancia en alguno de los sensores que mide la velocidad del generador, se requieren dos señales residuales para lograr la detección y el aislamiento de esta falla. Estas señales residuales se construyen a partir de las estimaciones de la velocidad del generador, realizadas de forma independiente por los siguientes observadores en modos deslizantes:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{dt}^3(t) &= A_{dt}\hat{x}_{dt}^3(t) + B_{dt}^3u_{dt}^3(t) - G_l^3e_y^3(t) + G_{nl}^3v^3 \\ \hat{y}_{dt}^3(t) &= \hat{\omega}_{g,m1}(t),\end{aligned}\tag{4.20}$$

Tabla 4.5: Firmas de falla en el tren de transmisión.

Tren de transmisión	$\mathbf{r}_{4,1}^{dt}$	$\mathbf{r}_{4,2}^{dt}$	$\mathbf{r}_{5,1}^{dt}$	$\mathbf{r}_{5,2}^{dt}$
Falla 4 en sensor 1	1	0	0	0
Falla 4 en sensor 2	0	1	0	0
Falla 5 en sensor 1	0	0	1	0
Falla 5 en sensor 2	0	0	0	1

y

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{dt}^4(t) &= A_{dt}\hat{x}_{dt}^4(t) + B_{dt}^4u_{dt}^4(t) - G_l^4e_y^4(t) + G_{nl}^4v^4 \\ \hat{y}_{dt}^4(t) &= \hat{\omega}_{g,m2}(t)\end{aligned}\quad (4.21)$$

La dinámica del error de estimación de la salida para el observador (4.20) y (4.21) viene dada respectivamente como: $e_y^3(t) = \hat{\omega}_{g,m1}(t) - \omega_{g,m1}(t)$ y $e_y^4(t) = \hat{\omega}_{g,m2}(t) - \omega_{g,m2}(t)$. A partir de las estimaciones realizadas por los dos observadores. Se definen dos señales residuales para detectar la falla 5 en alguno de los dos sensores de velocidad del generador, como: $\mathbf{r}_{5,1}^{dt} = |\hat{y}_{dt}^3(t) - \omega_{g,m1}(t)|$ y $\mathbf{r}_{5,2}^{dt} = |\hat{y}_{dt}^4(t) - \omega_{g,m2}(t)|$.

En resumen, a partir del esquema de FDI se obtiene la matriz de firmas de falla que se muestra en la Tabla (4.4.2). En esta matriz se considera que sólo una falla está presente a la vez. La simbología utilizada se entiende de la siguiente manera. El 1 indica que el residuo es sensible a una falla y por otro lado, el 0 indica que el residuo es completamente insensible a ésta.

4.5. Resultados de la detección y aislamiento de fallas

4.5.1. Esquema basado en la máquina de vectores de soporte

Para la implementación del algoritmo SVM se utilizó el *toolbox* de matlab. El entrenamiento de del algoritmo se realizó utilizando datos con y sin falla de los sensores del sistema de *pitch* y velocidad del rotor. Las fallas se introducen en ambas regiones de operación de la curva de potencia y todas variables utilizadas para construir los vectores de

datos son filtradas. El tiempo de muestreo utilizado fue 0.01 s y el tiempo de simulación de 4500 s.

Para presentar los resultados de la detección de fallas, se utiliza el concepto de índices de falla, los cuales se activan mientras el algoritmo identifique que los datos de las mediciones realizadas por los sensores pertenecen a la clase etiquetada con falla.

Para validar el diseño del esquema de detección de fallas basado en el algoritmo de la máquina de vectores de soporte, se consideraron dos escenarios de prueba cada uno con 4 fallas en sensores en diferentes intervalos de tiempo. Para el primer escenario la configuración de las fallas es la siguiente:

1. Falla 1 (FSFP1), $\beta_{1,m1} = 4^\circ$ (valor fijo, atascado) que ocurre entre 100 s y 200 s.
2. Falla 2 (FSGP2), $\beta_{2,m2} = 1.8\beta_2$ (factor de ganancia) que ocurre entre 2500 s y 2600 s.
3. Falla 3 (FSFP3), $\beta_{3,m1} = 12^\circ$ (valor fijo, atascado) que ocurre entre 900 s y 1000 s.
4. Falla 4 (FSFT), $\omega_{r,m1} = 1.2 \text{ rad/s}$ (valor fijo) que ocurre entre 1200 s y 1300 s.

En la Figura 4.9 se muestran los resultados obtenidos. El comportamiento de los índices de falla muestra que la detección de las fallas se realiza de forma correcta y además que no se presentan falsas alarmas durante el intervalo de tiempo en que la falla no esta activa.

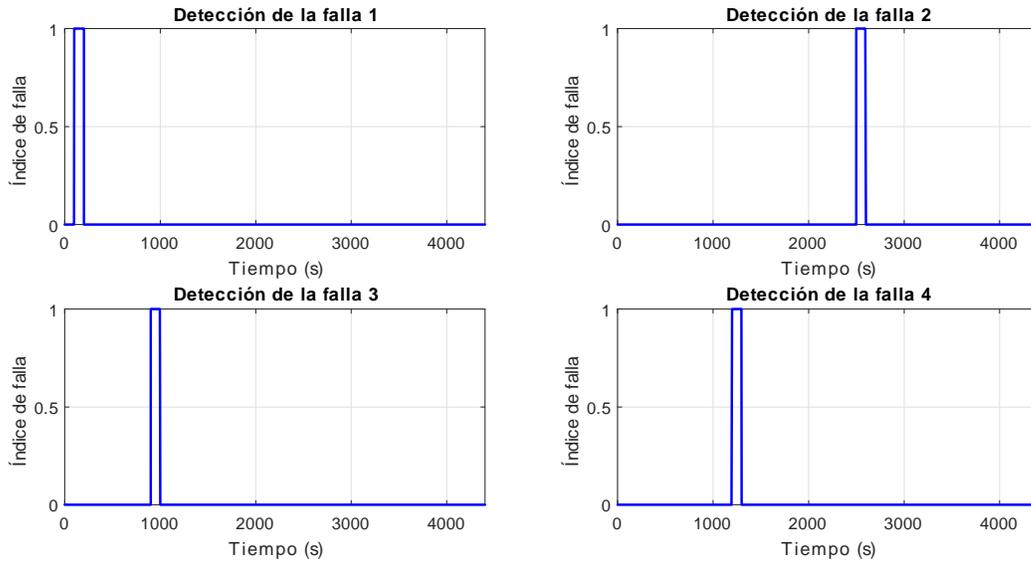


Figura 4.9: Detección de fallas con SVM escenario 1.

Para el segundo escenario, la definición de las fallas fue la siguiente:

1. Falla 1 (FSFP1), $\beta_{1,m1} = 3^\circ$ (valor fijo, atascado) que ocurre entre 250 s y 350 s.
2. Falla 2 (FSGP2), $\beta_{2,m2} = 3\beta_2$ (factor de ganancia) que ocurre entre 3200 s y 3300 s.
3. Falla 3 (FSFP3), $\beta_{3,m1} = 15^\circ$ (valor fijo, atascado) que ocurre entre 1000 s y 1100 s.
4. Falla 4 (FSFT), $\omega_{r,m1} = 1.5 \text{ rad/s}$ (valor fijo) que ocurre entre 800 s y 900 s.

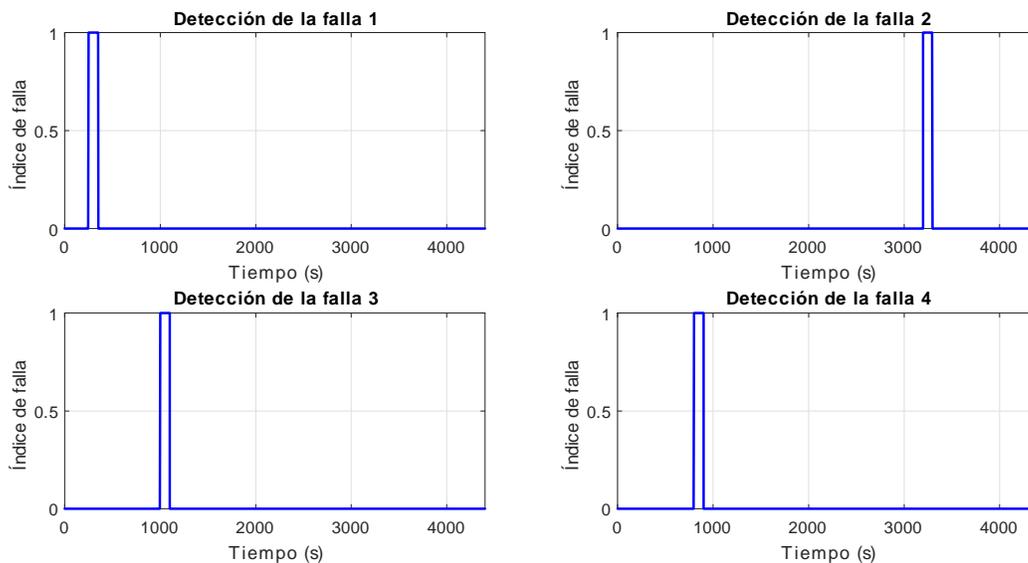


Figura 4.10: Detección de fallas con SVM escenario 2.

En la Figura 4.10 se muestran los resultados obtenidos. Se puede observar la detección de las 4 fallas consideradas en el escenario 2. Los resultados obtenidos demuestran la efectividad de la SVM aplicada a problemas de detección de fallas. Es importante mencionar que el éxito en la clasificación de los datos depende en gran medida de la magnitud de las fallas consideradas. Debido a los niveles de ruido presentes en el sistema, si la magnitud de la falla es pequeña, los efectos de la falla sobre el sistema no son notorios. Esto provoca que el esquema de detección de fallas envíe falsas alarmas o se presente una falta de detectabilidad de las fallas.

4.5.2. Esquema basado en observadores

Sistema de *pitch*

El esquema propuesto para realizar la detección y aislamiento de fallas en el sistema *pitch*, se evaluó bajo el siguiente escenario de fallas en sensores:

Falla 1. Valor fijo en $\beta_{1,m1}$ igual a 5° en un periodo de tiempo de 2000 s a 2100 s.

Falla 2. Ganancia en $\beta_{2,m2}$ igual a 1.2 en un periodo de tiempo de 2300 s a 2400 s.

Falla 3. Valor fijo en $\beta_{3,m1}$ igual a 10° en un periodo de tiempo de 2600 s a 2700 s.

Los resultados del esquema FDI para el sistema de *pitch* 1 cuando se presenta la falla 1 se muestran en la Figura 4.11. La falla 1 se presenta en el sensor 1 del *pitch* 1 en el intervalo de tiempo de 2000 s a 2100 s. Como se puede observar en la figura, el comportamiento de los residuos permite identificar la presencia de la falla 1. Se puede observar que el residuo $r_{1,1}^{pb}$ presenta un notable cambio abrupto durante intervalo de tiempo de incidencia de la falla 1, mientras el residuo $r_{1,2}^{pb}$ permanece muy cercano a cero. Por lo tanto, se puede concluir que se ha presentado una falla en el sistema de *pitch* 1 específicamente en el sensor 1. Idealmente se esperarí que los residuos permanezcan en cero mientras no se presente falla en los sensores, sin embargo, debido a la presencia de ruido en los sensores los residuos presentan pequeñas desviaciones alrededor de cero, incluso cuando no se ha presentado la falla.

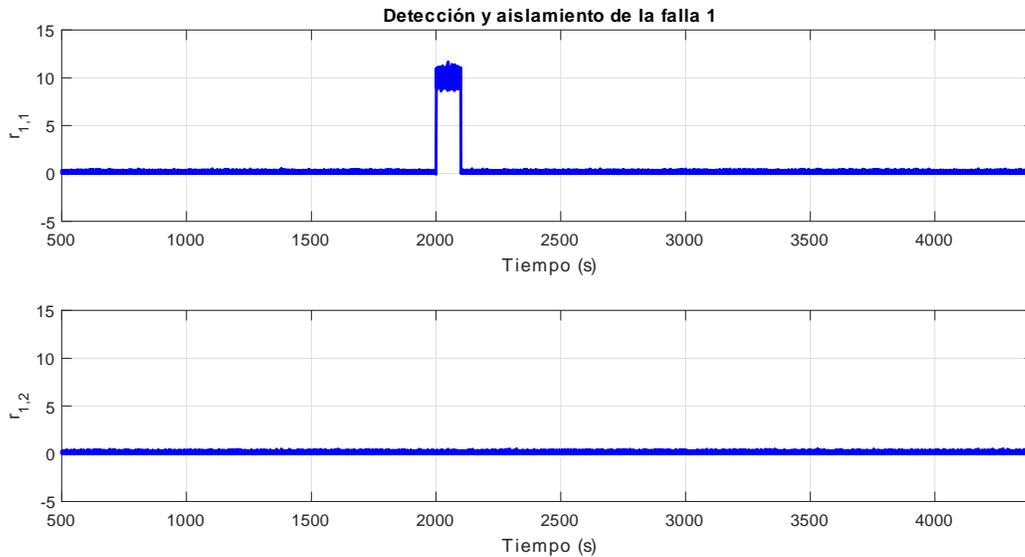


Figura 4.11: Señales residuales en el sistema de *pitch* 1.

En el sistema de *pitch* 2 se considera una falla de escalamiento durante intervalo de tiempo

de 2300 s a 2400 s, actuando en el sensor 2. La Figura 4.12 muestra el comportamiento de los residuos generados a partir del banco de observadores en modos deslizantes. En la figura se puede notar que el residuo $r_{2,2}^{pb}$ presenta un comportamiento errático en el intervalo de incidencia de la falla, mientras el residuo $r_{2,1}^{pb}$ no presenta ningún comportamiento atípico y se mantiene en un valor cercano a cero. Por lo tanto, a partir de la firma de fallas 1 de ambos residuos, se puede concluir que se ha presentado un falla en el sensor 2 del *pitch* 2. Es importante notar que la magnitud del cambio del residuo sensible a la falla 2 es mucho menor respecto al comportamiento del residuo sensible a la falla 1. Esto se debe a que una falla de error de escalamiento no tiene un efecto tan notorio sobre la señal del sensor como sí lo tiene una falla de valor de fijo.

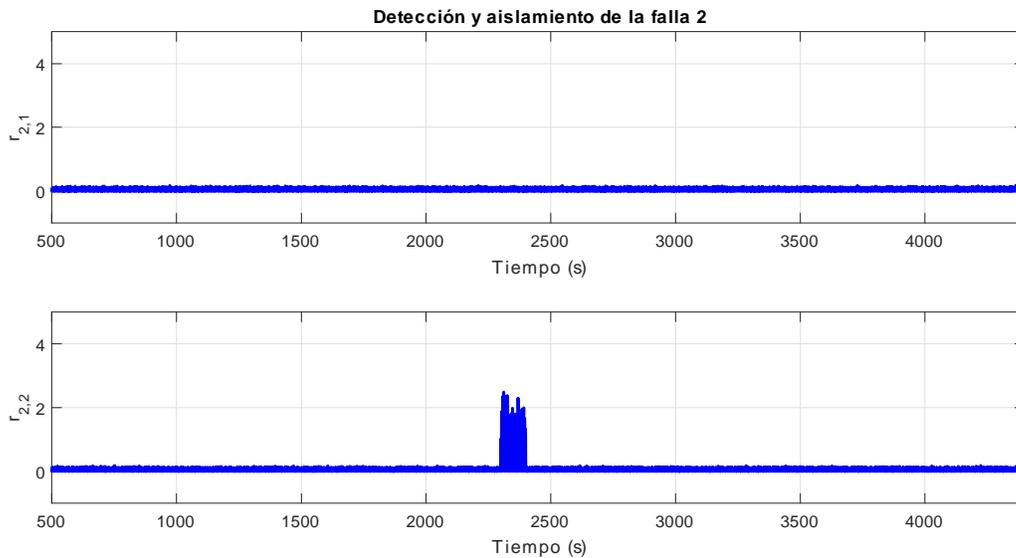


Figura 4.12: Señales residuales en el sistema de *pitch* 2.

Para el sistema de *pitch* 3 la falla se presenta en el sensor 1. Se trata de una falla de valor fijo actuando en el intervalo de tiempo de 2600 s a 2700 s. Los resultados del esquema de detección fallas en el sistema de *pitch* 3 se presentan en la Figura 4.13. Se puede observar que la falla 3 se puede detectar por medio del residuo $r_{3,1}^{pb}$ que presenta una desviación significativa en el intervalo de tiempo de la falla. Mientras el residuo $r_{3,2}^{pb}$ no presenta cambios

significativos, se mantiene muy cercano a cero. A partir del comportamiento de los residuos, se puede observar que estos han mostrado ser sensibles a la presencia de fallas, con lo cual se resuelve el problema de la detección de fallas en el sistema de *pitch* 3. Así también, dado que cada uno de los residuos presentados mostró ser sensible solo a una falla, el aislamiento de fallas se alcanza con ayuda de la tabla de firmas de falla.

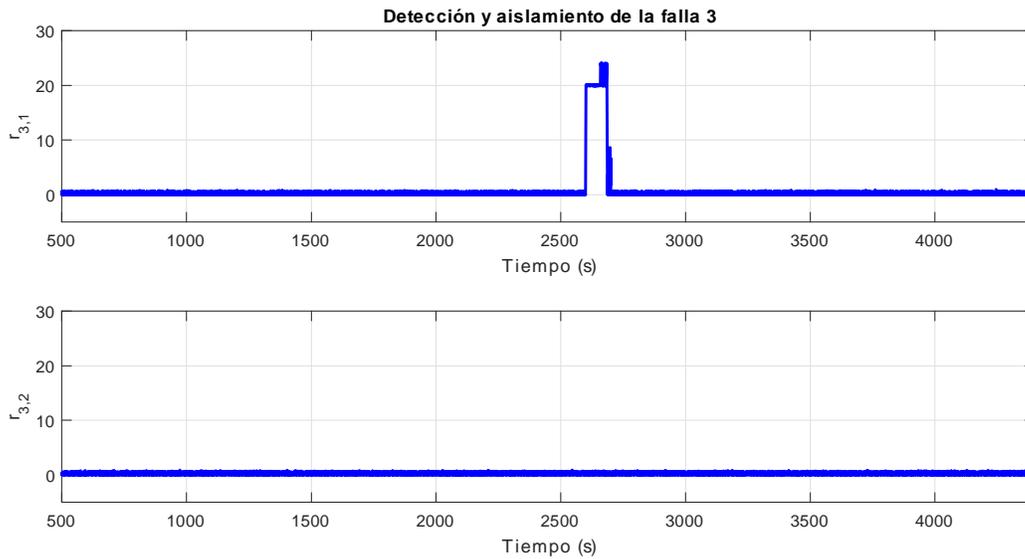


Figura 4.13: Señales residuales en el sistema de *pitch* 3.

Tren de transmisión

El esquema propuesto para realizar la detección y aislamiento de fallas en el sistema en el tren de transmisión, se evaluó bajo el siguiente escenario de fallas en sensores:

Falla 4. Valor fijo en $\omega_{r,m1}$ igual a 1.4 rad/s en un periodo de tiempo de 1500 s a 1600 s .

Falla 5. Ganancia en $\omega_{g,m2}$ igual a 1.1 en un periodo de tiempo de 1000 s a 1100 s .

En la Figura 4.14 se presentan el comportamiento de los residuos diseñados para ser sensibles a la falla 4. La falla 4 corresponde a un error de escalamiento en la señal de sensor

1 responsable de medir la velocidad del rotor. Debido a que el sensor 2 se encuentra libre de falla, se puede observar que el residuo $r_{4,2}^{dt}$ permanece prácticamente invariante durante todo el intervalo de simulación. Mientras el residuo $r_{4,1}^{dt}$ muestra un comportamiento atípico durante el intervalo de 1500 s a 1600 s. La magnitud de la desviación observada en el residuo en intervalo mencionado es lo suficientemente alta para inferir la presencia de una falla en el sensor.

Por último, el comportamiento de los residuos sensibles a la falla 5 se muestra en la Figura 4.15. La falla 5 es un valor fijo en el sensor 2 responsable de medir la velocidad del generador, durante el intervalo de tiempo de 1000 s a 1100 s. Es importante hacer notar que, desde el punto de vista de la dinámica de la falla, en una falla de valor fijo se puede observar una desviación más significativa del residuo, esto en comparación con el caso de una falla de tipo error de escalamiento. Esto se hace evidente en la magnitud de la desviación del residuo $r_{5,2}^{dt}$. A partir de la cual se puede concluir que se ha presentado una falla en el sensor 2 responsable de medir la velocidad del generador. Mientras el comportamiento del residuo $r_{5,1}^{dt}$ confirma que el sensor 1 se encuentra libre de falla.

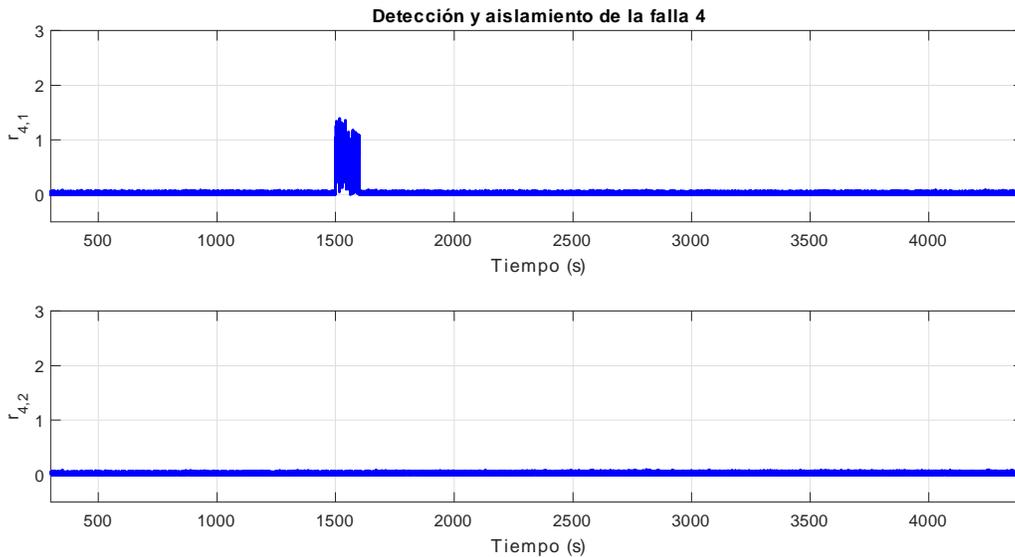


Figura 4.14: Señales residuales para la falla en sensores de velocidad del rotor.

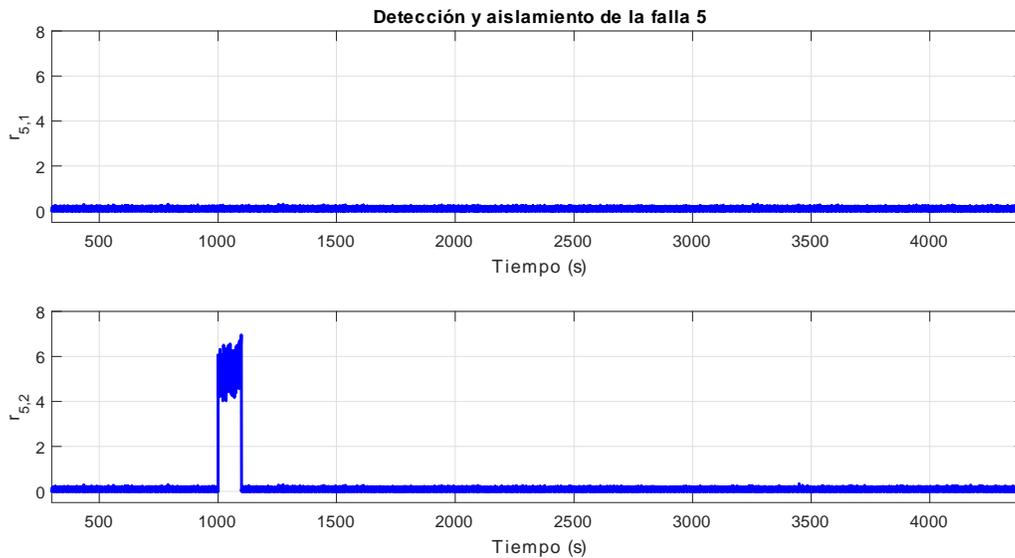


Figura 4.15: Señales residuales para la falla en sensores de velocidad del generador.

4.6. Conclusiones parciales

En este capítulo, se propuso un esquema de detección y aislamiento de fallas en sensores basado en el algoritmo de la máquina de vectores de soporte. A partir de los resultados obtenidos en simulación se mostró la efectividad del esquema para realizar la detección de fallas de tipo valor fijo y factor de ganancia en sensores del sistema de *pitch*, así como fallas de tipo valor fijo en sensores de velocidad del rotor.

Por otro lado, se presentaron dos esquemas de detección y aislamiento de fallas basado en observadores por modos deslizantes. El primero de ellos diseñado para la detección y aislamiento de fallas en el sistema de *pitch*. El principal reto fue realizar el diseño del esquema sobre el sistema en lazo cerrado, donde la dinámica de la fallas se propaga a través del lazo de control. El segundo esquema se diseñó para detectar y aislar fallas en sensores del tren de transmisión. En este esquema, el problema fue realizar la detección a pesar de la incertidumbre asociada al par del rotor.

Capítulo 5

Control tolerante a fallas en sensores y actuadores

En este capítulo se presentan dos soluciones al problema de la tolerancia a fallas en WECS. Las soluciones presentadas abordan el problema desde dos enfoques diferentes. Por un lado, se presenta una solución desde el enfoque conocido como control tolerante a fallas pasivo. Mientras que la segunda solución lo aborda desde el enfoque denominado control tolerante a fallas activo. Además, se presenta una perspectiva general de los enfoques utilizados para diseñar sistemas de control tolerante a fallas, la metodología de diseño utilizada para cada esquema y los resultados obtenidos.

5.1. Introducción

En los últimos años el diseño de sistemas de control tolerantes a fallas ha generado gran interés tanto en la comunidad científica como en la industria debido a la creciente demanda de sistemas seguros, confiables y eficientes.

Actualmente uno de los sistemas donde se tiene especial interés por implementar esquemas de FTC, son los sistemas de conversión de energía eólica. Debido a su localización y naturaleza compleja, un mantenimiento no planeado genera pérdidas económicas importantes por el tiempo que el sistema permanece fuera de operación. La cantidad de elementos que

integran un WECS y el entorno al que están expuestos, ocasiona que estos sistemas sean muy susceptibles a fallas. Si las fallas no se detectan a tiempo provocan degradación y daños en los componentes e incluso pueden provocar la destrucción del sistema. Esta situación limita la competitividad de los WECS frente a otras formas de generación de energía alternativas.

5.2. Elementos de un sistema tolerante a fallas

La característica distintiva de un sistema de control tolerante a fallas es que permite seguir operando un sistema de forma aceptable incluso después de la aparición de una falla. Por lo tanto, la tolerancia a fallas puede entenderse como la capacidad de un sistema de control para mantener los objetivos de control a pesar de la aparición de una falla, admitiéndose una cierta degradación de sus prestaciones .

El diseño de un sistema de control tolerante a fallas se puede realizar desde dos enfoques: pasivo y activo [79]. En el enfoque pasivo se explota la propiedad de los sistemas con realimentación para hacer frente a perturbaciones, incertidumbres de modelado e incluso cierto tipo de fallas en el sistema. Por lo que, el control tolerante a fallas pasivo implica el diseño robusto del sistema de control realimentado para hacerlo inmune a determinadas fallas. Sin embargo, la teoría de control robusto muestra que sólo existen controladores robustos para una clase reducida de cambios en la dinámica del sistema provocados por las fallas. Además, un controlador robusto funciona de forma subóptima para la planta nominal puesto que sus parámetros se han obtenido mediante un compromiso entre prestaciones y robustez para toda la familia de plantas consideradas, incluyendo las posibles fallas. En la Figura 5.1 se muestra la arquitectura del enfoque de control tolerante a fallas pasivo.

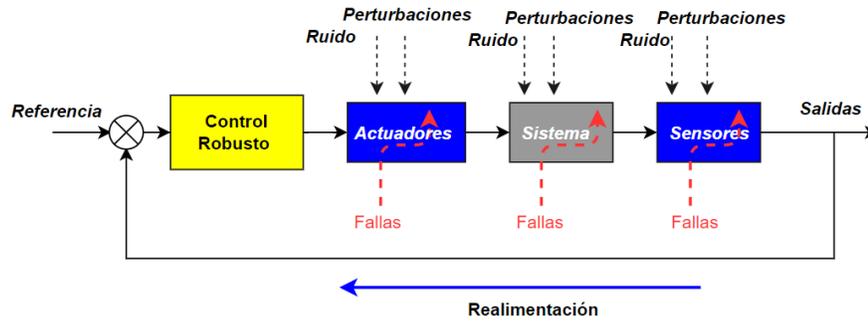


Figura 5.1: Arquitectura del control tolerante a fallas pasivo.

Por otro lado, el control tolerante a fallas activo conlleva el diagnóstico en línea de la falla, es decir, determinar el componente que presenta falla, el tipo de falla, su magnitud y el instante de aparición. Esta información se utiliza para activar un mecanismo de acomodación de fallas, para realizar una reconfiguración del controlador o incluso dependiendo de la gravedad de falla la desconexión del sistema.

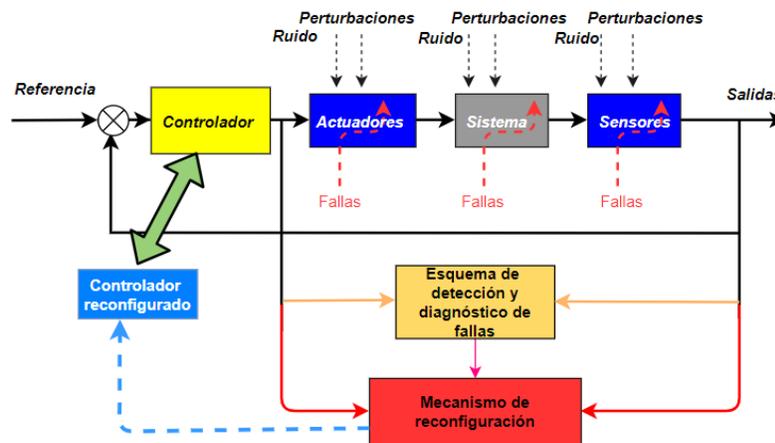


Figura 5.2: Arquitectura del control tolerante a fallas activo.

La arquitectura de un sistema tolerante a fallas activo se presenta en la Figura 5.2. El

esquema de diagnóstico de fallas junto con el mecanismo de reconfiguración son los elementos principales de la arquitectura presentada. La función de cada elemento se describe a continuación:

- Diagnóstico de fallas: Su función principal es obtener información de las fallas en el sistema.
- Mecanismo de reconfiguración: Su función es compensar el efecto de las fallas presentes en el sistema por medio del rediseño del controlador. En general, se pueden distinguir dos métodos para realizar el rediseño del controlador; la acomodación de la falla y la reconfiguración.

Acomodación de la falla.

En este método se diseña una ley de control que permita al sistema o proceso alcanzar los objetivos de control aun en la presencia de fallas. Para lograrlo, los parámetros del controlador se adaptan en función de las propiedades dinámicas del sistema con falla. Las entradas y las salidas del sistema utilizadas en el lazo de control no se modifican [80]. El esquema de control tolerante a fallas con el método de acomodación de fallas se muestra en la Figura 5.3.

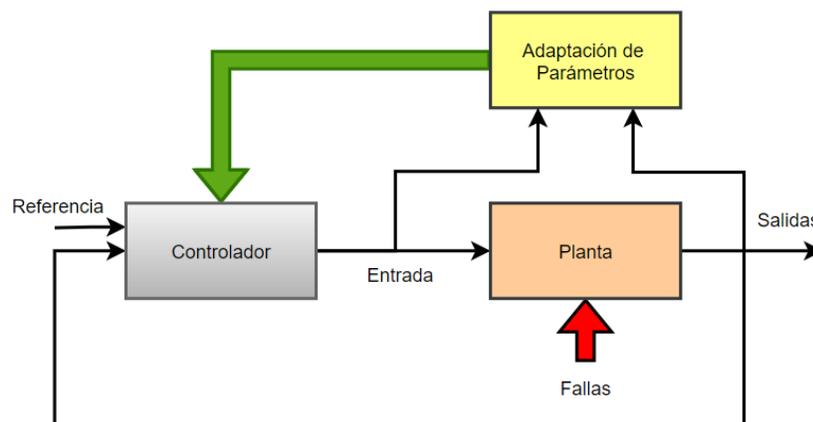


Figura 5.3: Control tolerante a fallas por adaptación de parámetros.

Un forma simple y efectiva de diseñar un controlador con acomodación de fallas, consiste en el diseño de controladores fuera de línea para cada tipo particular de falla. Aunque este es un método simple y muy utilizado en aplicaciones reales. Presenta el inconveniente de tener que considerar todas las posibles fallas antes de que el sistema entre en funcionamiento, además de que todos los controladores deben cargarse en un *software* de control.

Reconfiguración.

Cuando la acomodación de la fallas no es posible, se necesita reconfigurar el lazo de control por completo, esto implica la formulación en línea de un controlador alimentado con señales alternas a aquellas que contienen la falla o su efecto [81]. En la Figura 5.4 se muestra un esquema general de reconfiguración empleado para tolerar fallas que ocasionan serios cambios estructurales en la dinámica del sistema. Algunas de estas fallas se describen a continuación:

- **Falla en sensores.** Las fallas en sensores que resultan en la ruptura del lazo entre el sistema y el controlador ocasionan una falta de observabilidad en el sistema. En esta circunstancia es necesario reemplazar la señal del sensor con falla por la señal proveniente de un sensor redundante o bien un algoritmo de estimación.
- **Fallas en actuador.** Estas fallas derivan en una pérdida de controlabilidad del sistema, por lo que, es necesario reemplazar los actuadores defectuosos por actuadores en buen estado.
- **Fallas en el sistema.** Cuando la magnitud de los cambios en la dinámica de un sistema ocasionados por una falla no pueden ser compensados por ningún controlador, es necesario utilizar una reconfiguración del controlador.

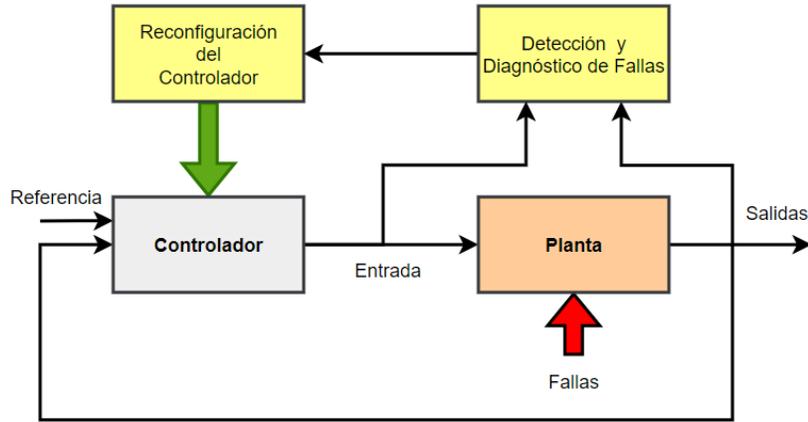


Figura 5.4: Control tolerante a fallas por reconfiguración del controlador.

5.3. Control por modos deslizantes

En el presente trabajo doctoral se ha optado por las estrategias de control por modos deslizantes (SMC, por sus siglas en inglés) debido a sus propiedades de robustez. De hecho, la característica más atractiva de un SMC es su capacidad de rechazo a las llamadas incertidumbres emparejadas y variaciones de parámetros durante el movimiento denominado en modo deslizante. La dinámica en modo deslizante se presenta cuando las trayectorias del sistema son forzadas a alcanzar y permanecer sobre una superficie deslizante (hiperplano) diseñada para conseguir la estabilidad del sistema. Bajo la acción de un SMC una vez que el modo deslizante se ha alcanzado, la dinámica del sistema se vuelve invariante a las incertidumbres emparejadas. De esta manera, el SMC garantiza robustez frente a dinámicas no modeladas, incertidumbres y perturbaciones externas [82]. Para evidenciar esta propiedad, se considera un sistema lineal invariante en el tiempo con m entradas representado en el espacio de estado como:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad (5.1)$$

donde $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ con $1 \leq m \leq n$. Se puede asumir sin pérdida de generalidad

que la matriz de distribución de entradas B es de rango completo. El primer paso en el diseño del control por modos deslizantes es el diseño de la función de conmutación $\sigma : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$, definida como:

$$\sigma(t) = Sx(t), \quad (5.2)$$

donde $S \in \mathbb{R}^{m \times n}$ es una matriz de rango completo y el hiperplano \mathcal{F} viene dado por: $\mathcal{F} = \{x \in \mathbb{R}^n : Sx(t) = 0\}$.

Se puede notar que la función de conmutación $\sigma(t)$ es una combinación lineal de los estados del sistema. Además de la Ec. (5.2) se deduce que el movimiento deslizante está asociado con el espacio nulo de la matriz S . Es importante hacer notar que el número de filas de la matriz S corresponde al número de columnas de la matriz de distribución de entrada B y, en consecuencia la matriz SB es cuadrada.

La idea central del control por modos deslizantes, es formular una ley de control la cual tome valores en función de una regla predefinida denominada función de conmutación, representada por $\sigma(t)$. La definición de la función de conmutación $\sigma(t)$ y la formulación de la ley de control discontinuo $u(t)$ se realiza de manera que se pueda conseguir un movimiento deslizante sobre el hiperplano \mathcal{F} .

Supongamos que existe un tiempo t_r tal que los estados del sistema descansan sobre la superficie \mathcal{F} , y por lo tanto se presenta un movimiento en modo deslizante. Esto se expresa matemáticamente como $Sx(t) = 0$ y $\dot{\sigma}(t) = S\dot{x}(t) = 0, \forall t \geq t_r$. Por lo que apartir de Ec. (5.1), la última condición se puede escribir como:

$$\dot{\sigma}(t) = S\dot{x}(t) = SAx(t) + SBu(t) = 0, \forall t \geq t_r \quad (5.3)$$

La ley de control que permite satisfacer la condición expresada en la Ec. (5.3), se conoce como control equivalente u_{eq} y, viene dado por:

$$u_{eq}(t) = -(SB)^{-1}SAx(t) \quad (5.4)$$

El control equivalente es la acción de control requerida para mantener la dinámica de los estados sobre la superficie de conmutación.

Al sustituir la expresión del control equivalente en la Ec. (5.1), resulta:

$$\dot{x}(t) = (I_n - B(SB)^{-1}S) Ax(t) = P_s Ax(t), \quad \forall t > t_r, \quad (5.5)$$

donde P_s es un operador de proyección definido como:

$$P_s \triangleq (I_n - B(SB)^{-1}S) \quad (5.6)$$

El operador satisface las siguiente propiedades:

$$SP_s = 0 \quad \wedge \quad P_s B = 0 \quad (5.7)$$

Puede notarse en la Ec. (5.5), que el movimiento deslizante es un movimiento libre, independiente de la acción de control que depende de la elección de la superficie deslizante.

Una de las ventajas más importante, que hace especialmente atractivas a las técnicas de control por modos deslizantes es su capacidad para rechazar perturbaciones. Para observar mejor esta propiedad, se considera el sistema lineal invariante en el tiempo sujeto a incertidumbre cuya representación en el espacio de estados viene dada por:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + D\xi(t, x), \quad (5.8)$$

donde la matriz $D \in \mathbb{R}^{n \times l}$ y el término $\xi : \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^l$ representa una no linealidad o incertidumbre acotada sobre el sistema.

Cualquier incertidumbre que cumple la condición de actuar sobre el canal de entrada del sistema se denomina incertidumbre aparejada. Al seguir la idea general del control equivalente, la ley de control equivalente que permite lograr un movimiento en modo deslizante en el sistema dado por la Ec. (5.8), viene dada por:

$$u_{eq}(t) = -(SB)^{-1}(SAx(t) + SD\xi(t, x)) \quad (5.9)$$

Es importante notar que la ley de control equivalente dada en la Ec. (5.9) resulta depender del término ξ , una señal exógena desconocida. Por lo tanto, el control equivalente no puede ser una ley de control práctica. De hecho, el control equivalente debe entenderse como una

herramienta para analizar el movimiento obtenido al restringir la dinámica de los estados sobre la superficie de deslizamiento.

Para demostrar la propiedad de insensibilidad a perturbaciones se sustituye la expresión del control equivalente en la Ec (5.9), lo que resulta en:

$$\dot{x}(t) = P_s Ax(t) + P_s D\xi(x, t), \quad (5.10)$$

donde P_s es el operador de proyección definido en la Ec.(5.6). Si el rango de la matriz D está contenido en el rango de la matriz B , es decir, si $R(D) \subset R(B)$, entonces existe una matriz de operaciones elementales por columnas $M \in \mathbb{R}^{m \times l}$ tal que $D = BM$. A partir de la condición expresada en la Ec. (5.7), se tiene:

$$P_s D = P_s (BM) = (P_s B)M = 0 \quad (5.11)$$

Por lo tanto, la dinámica en lazo cerrado dada por la Ec. (5.10) se reduce a:

$$\dot{x}(t) = P_s Ax(t), \quad (5.12)$$

con lo cual se ha demostrado que la dinámica del sistema en lazo cerrado resulta ser independiente de la incertidumbre.

5.4. Control tolerante a fallas pasivo en actuadores del sistema de *pitch*

En esta sección se presenta el diseño de un esquema de control tolerante a fallas pasivo (PFTC, sus siglas en inglés) basado en un controlador por modos deslizantes. Las fallas consideradas corresponden a fallas de actuador del sistema de *pitch*. El objetivo de la estrategia propuesta es mejorar la estabilidad y disminuir la degradación en la producción de potencia. El diseño de la estrategia de control se realiza sobre el modelo benchmark del WECS.

Es importante hacer notar que en la operación de un WECS se identifican cuatro regiones de funcionamiento determinadas por la velocidad del viento. Sin embargo, sólo en

dos de las regiones es posible controlar con seguridad el WECS. Para velocidades de viento inferiores a 3 m/s los costos de funcionamiento son mayores a los ingresos por la energía eléctrica producida, por lo que este valor es el mínimo requerido para que el sistema entre en operación. Por otro parte, cuando la velocidad del viento supera los 23 m/s, es peligroso mantener la operación del WECS, por lo que, esta se interrumpe para protegerlo contra daños estructurales en sus componentes debido a las fuertes ráfagas de viento.

Lo anterior nos deja solo dos regiones para operar el WECS de forma eficiente y segura. Por lo que, la estrategia de control del WECS solo está activa en las regiones I y II (ver Figura 3.6). La región I se denomina zona de optimización de potencia o carga parcial. El objetivo del controlador en esta región es obtener el valor óptimo de la velocidad del rotor utilizando el par como entrada de control. La región II es una zona de producción de energía constante o de carga completa. Donde el principal objetivo de control es la regulación de potencia eléctrica a un valor de referencia constante de 4,8 MW. Esto se logra al mantener la velocidad del rotor constante, utilizando el control del ángulo de *pitch* de las palas de turbina.

El diseño del esquema de control tolerante a fallas pasivo consiste básicamente en el diseño de un controlador robusto basado en las técnicas de control por modos deslizantes. Las cuales han demostrado ser muy eficientes en cuanto al manejo de perturbaciones, incertidumbre e incluso fallas.

Las fallas consideradas en diseño del PFTC corresponden a fallas en el actuador de *pitch*. El objetivo del sistema es abordar los escenarios de fallas de manera eficiente mientras se mantienen los objetivos de control de generación de energía óptima de 4.8 MW.

Las fallas en el actuador de *pitch* se deben a caídas de presión o al alto contenido de aire en el aceite. Estas fallas se han incorporado en el modelo *benchmark* como cambios en los parámetros del modelo de *pitch*. La falla debido a la caída de presión hidráulica se considera en el actuador de *pitch* 2. Mientras que la falla ocasionada por el alto contenido de aire en el aceite se considera en el actuador de *pitch* 3.

La falla del actuador de *pitch* debido a una fuga hidráulica (la cual deriva en una caída de presión) es una falla irreversible. Cuando esta falla está presente en este sistema, debe de tratarse lo antes posible. Si la fuga hidráulica es muy rápida, el procedimiento recomendado es desconectar el WECS de la red eléctrica, ya que, si la falla no se trata a tiempo, la pala

Tabla 5.1: Parámetros para modelar fallas en el actuador de *pitch*.

Falla	Factor de amortiguamiento	Frecuencia natural
Aire en el aceite	$\zeta = 0.45$	$\omega_n = 1.73 \frac{rad}{s}$
Caída de presión	$\zeta = 0.9$	$\omega_n = 3.42 \frac{rad}{s}$

defectuosa de la turbina se atascaría en una posición no deseada, lo cual ocasionaría que el sistema quede expuesto a tensiones del viento y altas vibraciones. En este trabajo de investigación se considera una caída de presión hidráulica del 50%. En comparación con la falla de caída de presión hidráulica, el alto valor de aire en el aceite es una falla reversible, lo cual significa que esta falla puede no requerir ninguna reparación y desaparece. El porcentaje de incidencia de estas fallas debido a fuga hidráulica y al contenido de aire en el aceite es del 7% y 15%, respectivamente.

Para observar el efecto de las fallas ocasionada por la caída de presión y la filtración de aire en el aceite, el modelo del actuador de *pitch* presentado en la Ec. (3.11) se simuló considerando los parámetros presentados en la Tabla 5.1.

En la Figura 5.5 se presenta la dinámica de las fallas en el actuador de *pitch*. Se observa que la caída de presión ocasiona que la dinámica del *pitch* sea muy lenta. Mientras la filtración de aire en el aceite presente ocasiona sobrepaso del 20% en la respuesta del *pitch*.

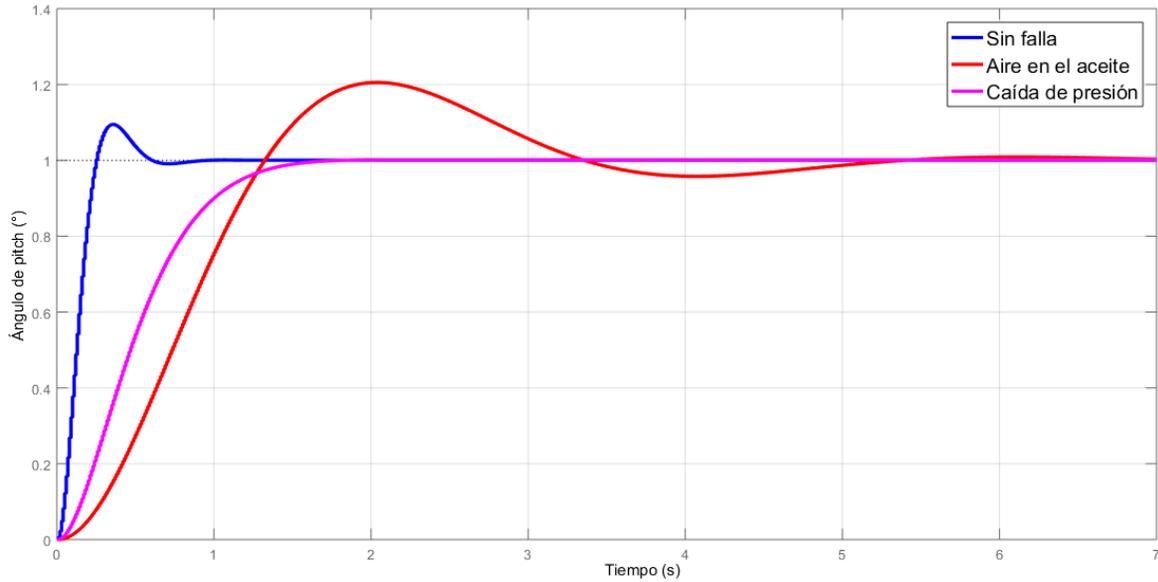


Figura 5.5: Dinámica del sistema de *pitch* con falla en actuador.

Control por modos deslizantes.

Para el diseño del PFTC se propone un control por modos deslizantes. Es importante recalcar que el control está diseñado para operar en la región II de la curva de potencia del sistema. El esquema propuesto solo se enfoca en el control del sistema de *pitch*, por lo que, para el control de par se utiliza la estrategia descrita en la sección 3.8.

El primer paso en el diseño del control viene dado por la función de conmutación, la cual se define como:

$$\sigma(t) = Sx(t), \quad (5.13)$$

donde S es una matriz de rango completo. A partir de la función de conmutación se define el hiperplano dado por:

$$\mathcal{F} = \{x \in \mathbb{R}^n : \sigma(t) = 0\} \quad (5.14)$$

Para lograr el comportamiento en modo deslizante es necesario cumplir la condición de alcanzabilidad dada por $\sigma\dot{\sigma}$, para lo cual se propone la ley de control por modos deslizante como:

$$u(t) = -(SB)^{-1} [SAx(t) + v], \quad (5.15)$$

donde $v = \rho \operatorname{sgn}(\sigma)$ y se asume que SB es no singular. La ley de control de la Ec. (5.15) se compone de una parte lineal $u_l = -(SB)^{-1}SAx(t)$ la cual corresponde al control equivalente y una parte no lineal $u_{nl} = -(SB)^{-1}\rho \operatorname{sgn}(\sigma)$ cuya función es mantener la dinámica en modo deslizante.

Para verificar que la ley de control propuesta satisface la condición de alcanzabilidad, basta con probar $\sigma\dot{\sigma} < 0$. Para lo cual se realiza la sustitución de la Ec. (5.15) en la expresión:

$$\sigma\dot{\sigma} = \sigma (SAx(t) + SBu(t)), \quad (5.16)$$

de donde se verifica que:

$$\sigma\dot{\sigma} = \rho |\sigma| \quad (5.17)$$

y por lo tanto la dinámica en modo deslizante tiene lugar.

En la Figura 5.6 se puede observar una comparación del control por modos deslizantes (SMC) y el control nominal. Se puede notar que existe una ligera diferencia en el valor de la potencia eléctrica en la región de la curva de potencia donde la velocidad del viento es superior al valor nominal (ver Figura 3.6)

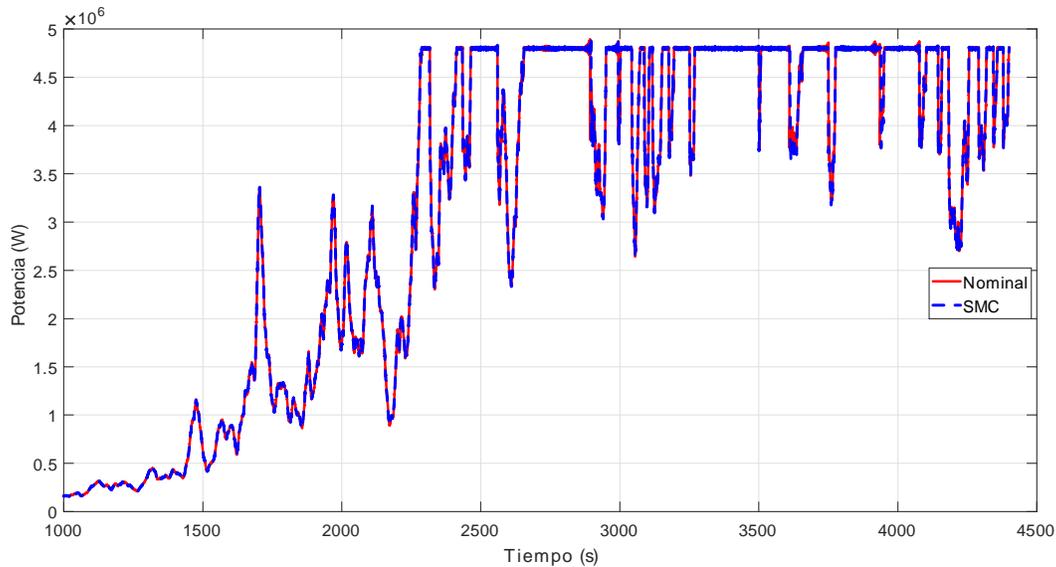


Figura 5.6: Comparación entre el control por modos deslizantes y el control nominal.

El control tolerante a fallas pasivo se evalúa ante dos escenarios de falla en actuadores del sistema de *pitch*:

Escenario 1. La Falla 6 emula la filtración de aire en el aceite en el actuador de *pitch 3* en el instante 2900 segundos.

Escenario 2. La falla 7 emula una falla ocasionada por una caída de presión en el actuador de *pitch 2* en el instante 3470 segundos.

En la Figura 5.7 se muestra el comportamiento de la potencia eléctrica una vez se presenta la falla 6. Es importante recalcar que la falla debido a la filtración de aire en el aceite no es una falla grave. De hecho, se puede observar que no se presentan diferencias significativas en la dinámica de la potencia eléctrica entre el esquema de control con tolerancia a fallas y el esquema sin tolerancia a fallas.

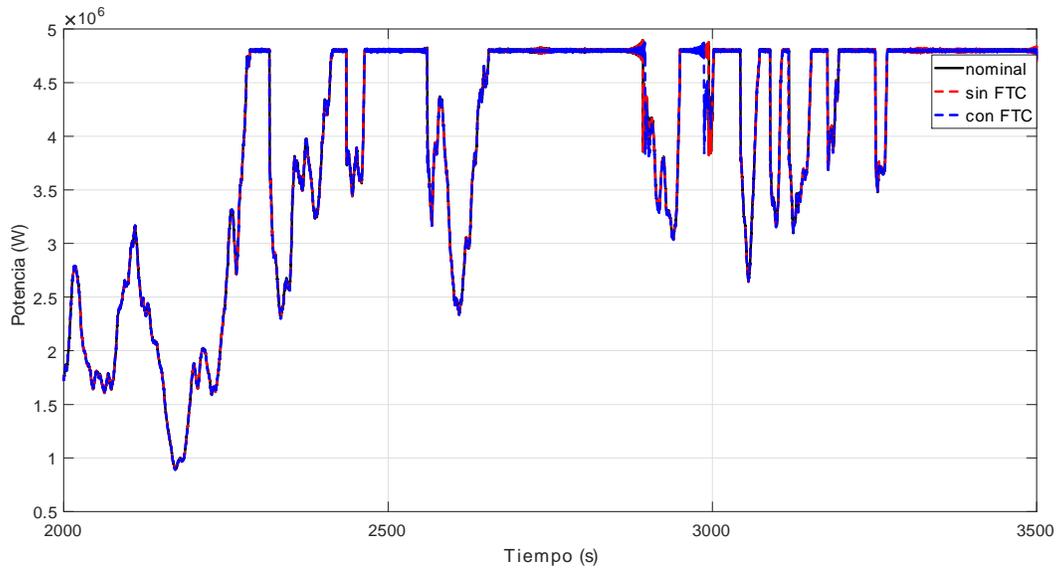


Figura 5.7: Control tolerante a fallas con la falla 6 en el actuador de *pitch*.

Por otro lado, para la falla 7, provocada por un bomba bloqueada o una manguera con fuga. En la Figura 5.8 se puede observar que el control convencional no puede mantener la potencia eléctrica constante. Mientras que con el esquema de control tolerante a fallas pasivo, se logra mantener la potencia eléctrica prácticamente invariante ante el cambio en la dinámica del *pitch 2* debida a la falla 7

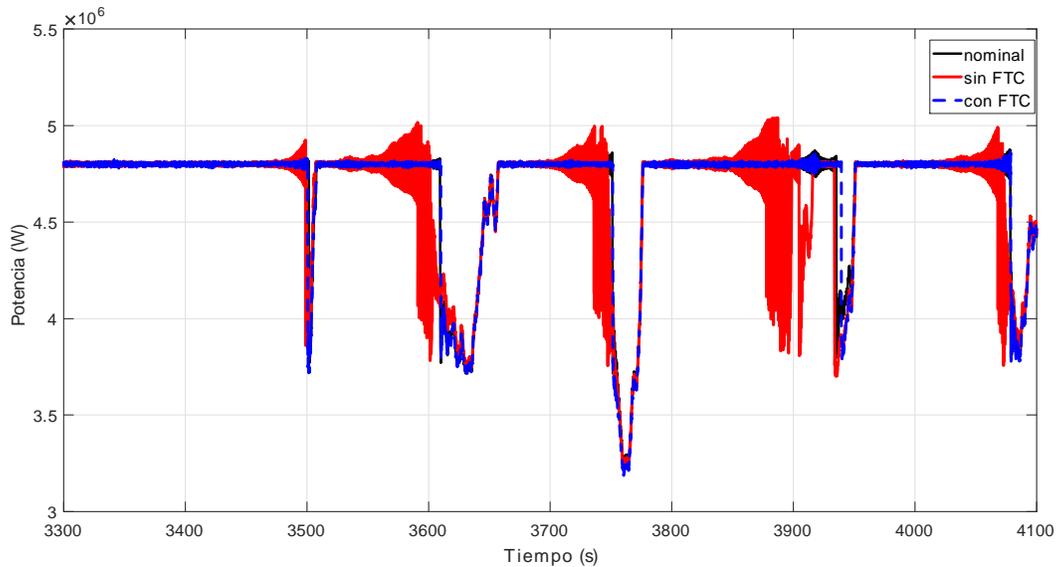


Figura 5.8: Control tolerante a fallas con la falla 7 en el actuador de *pitch*.

5.5. Control tolerante a fallas activo en sensores del sistema de *pitch* y tren de transmisión

La arquitectura propuesta para el diseño del sistema de control tolerante a fallas activo se basa en la reconfiguración del controlador. Para ello, se utiliza la información del sistema de detección y aislamiento de fallas diseñado en el capítulo anterior.

Debido a que el sistema tiene redundancia de *hardware*, la mejor solución es reemplazar las señales de los sensores con falla, por las señales de los sensores libres de falla. Para que la estrategia tenga éxito, es crucial que el sistema detecte y aisle correctamente las fallas. A partir de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se puede concluir que el esquema de FDI basado en observadores por modos deslizantes permitió la detección y aislamiento de las 5 fallas en sensores sin ninguna restricción en la magnitud de la falla o el instante de aparición. Por tal motivo, en este diseño se utiliza el esquema de FDI basado en observadores.

Para verificar la efectividad del esquema de control tolerante a fallas activo propuesto, se definió el siguiente escenario con 5 fallas en sensores definidas de la siguiente manera:

1. Falla 1. Valor fijo en $\beta_{1,m1}$ igual a 5° a partir del instante 2000 s.
2. Falla 2. Ganancia en $\beta_{2,m2}$ igual a 1.2 a partir del instante 2300 s.
3. Falla 3. Valor fijo en $\beta_{3,m1}$ igual a 10° a partir del instante 2600 s.
4. Falla 4. Valor fijo en $\omega_{r,m1}$ igual a 1.4 rad/s a partir del instante 1500 s.
5. Falla 5. Ganancia en $\omega_{g,m2}$ igual a 1.1 rad/s a partir del instante 1000 s.

Los resultados del control tolerante a fallas activo se evalúan a partir de la observación de la dinámica de la potencia eléctrica generada por el WECS y la velocidad del generador. En la Figura 5.9 se presenta el resultado del control tolerante a fallas activo para la falla 1 en el sistema de *pitch* 1. Se puede observar que si la falla no es compensada se tiene una degradación en la potencia eléctrica. La degradación se presenta en la región de I de la curva de potencia (ver Figura 3.6). Mientras en la región II el efecto de la falla prácticamente es imperceptible. Esta misma dinámica se puede ver en la velocidad del generador.

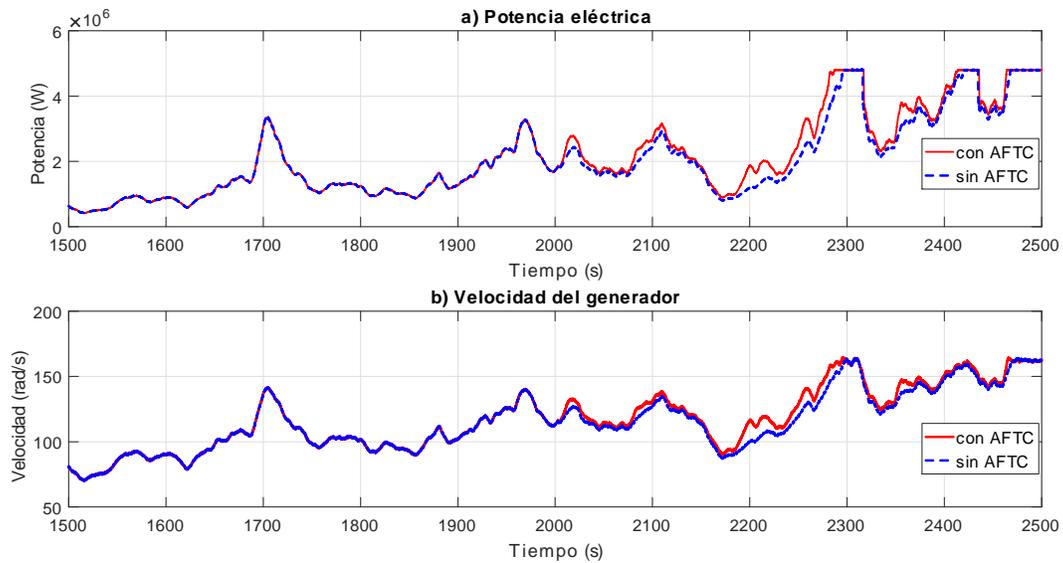


Figura 5.9: Respuesta del FTC ante la falla 1.

La respuesta del control tolerante a fallas ante la incidencia de la falla 2, se muestra en la Figura 5.10. La dinámica de la potencia eléctrica y de la velocidad del generador no presenta cambios significativos en el esquema con tolerancia en comparación con el esquema sin tolerancia a fallas. Esto se debe a dos circunstancias, por un lado, a la región de la curva de potencia donde se presenta la falla y, por otro, a que la falla es del tipo factor de ganancia y su magnitud no tiene un efecto significativo en la potencia eléctrica generada.

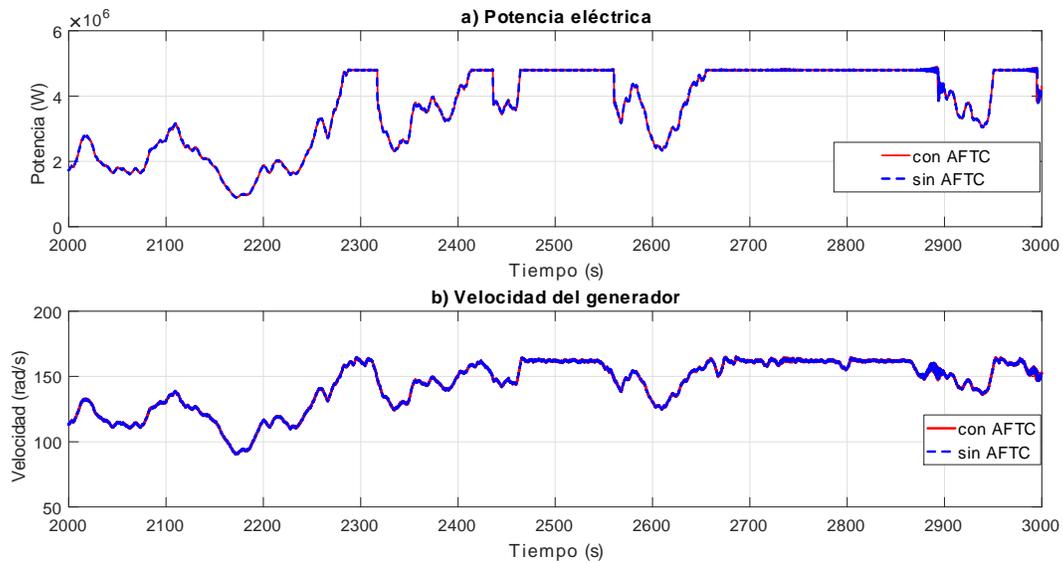


Figura 5.10: Respuesta del FTC ante la falla 2.

La respuesta del sistema con tolerancia a la falla 3 se presenta en la Figura 5.11. En el instante que se presenta la falla, se puede notar una disminución en la cantidad de potencia eléctrica generada. Es importante resaltar el hecho que la disminución es evidente sólo en la región de la curva donde la potencia eléctrica se encuentra por debajo de su valor nominal. Esto se puede reafirmar al observar la dinámica de la velocidad del generador. Por lo tanto, se puede concluir que este tipo particular de falla tiene un impacto significativo en la región de la curva de potencia donde la velocidad del viento es menor a la nominal. En esta situación el objetivo del control es lograr la optimización en la captura de la energía del viento, lo cual se consigue al establecer el ángulo de *pitch* en 0° . Debido a esto, una falla del tipo valor fijo tiene un efecto más significativo en la región I de la curva de potencia.

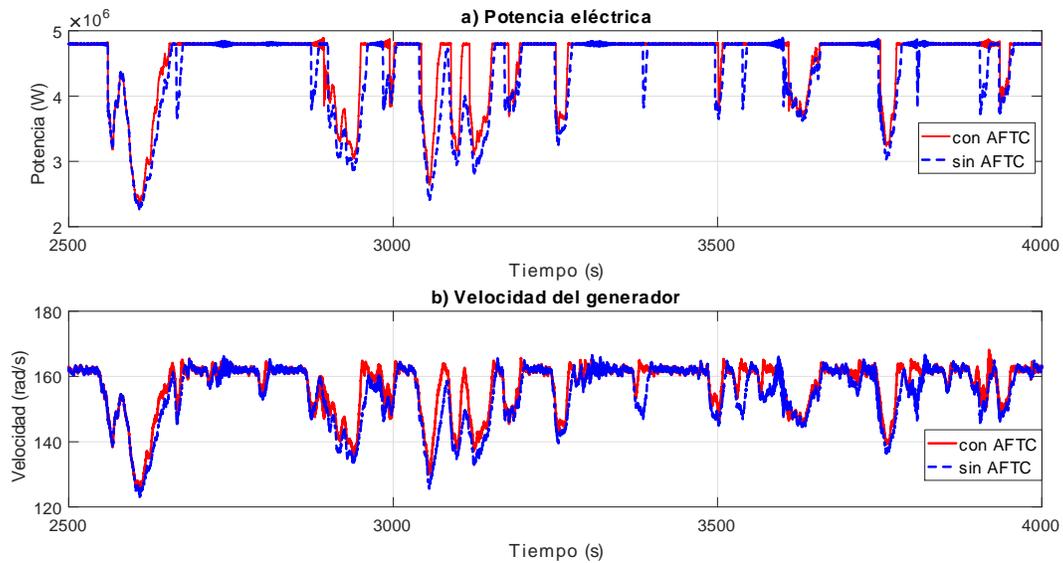


Figura 5.11: Respuesta del FTC ante la falla 3.

Para la falla 4, los resultados del control tolerante a fallas se muestran en la Figura 5.12. Se observa que la falla tiene un impacto significativo en la potencia eléctrica. Se observa que la falla ocasiona que la velocidad del generador cruce por cero y tome valores negativos.

Por otro lado, los resultados del control tolerante a fallas ante la falla 5 se presentan en la Figura 5.13. Se puede notar que no se percibe degradación en la curva de potencia eléctrica del WECS. Esto es resultado del tipo de falla presentada en el sensor. En particular, para fallas de tipo factor de ganancia en sensores de la velocidad del generador, siempre que el factor de ganancia sea mayor a la unidad, el esquema de control puede compensar el incremento en la medición de la velocidad del generador, mediante el control del ángulo de *pitch* y de esta manera mantener la potencia eléctrica constante.

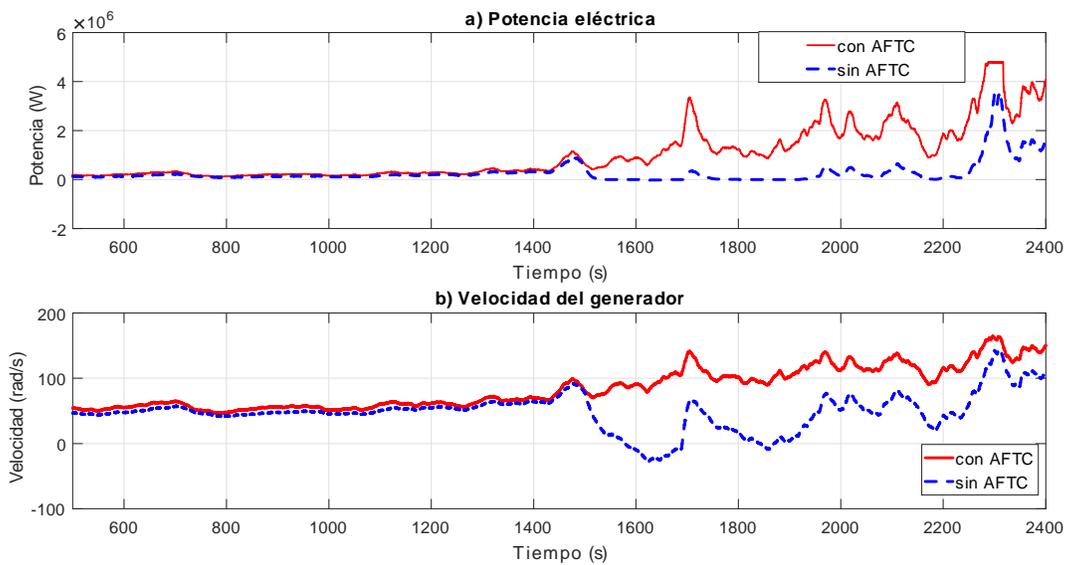


Figura 5.12: Respuesta del FTC ante la falla 4.

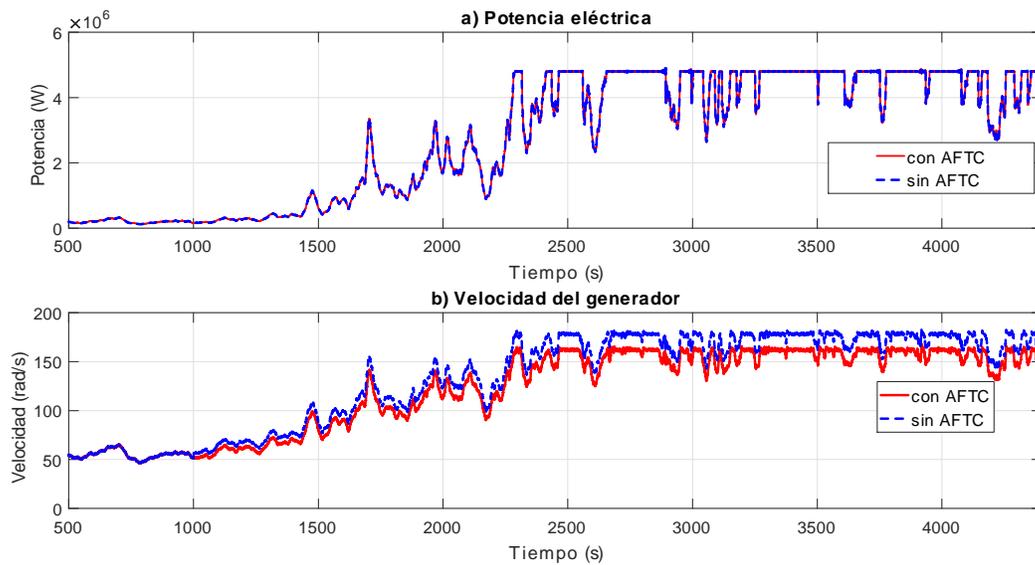


Figura 5.13: Respuesta del FTC ante la falla 5.

5.6. Conclusiones parciales

En este capítulo, se presentaron dos soluciones al problema de la tolerancia a fallas en un WECS. Por un lado, se presentó el diseño de un esquema de control tolerante a fallas pasivo, a partir del diseño de un control robusto basado en técnicas de control por modos deslizantes. El esquema fue diseñado para trabajar sobre la región II de la curva de la potencia del WECS. Los resultados obtenidos muestran la capacidad del esquema para mantener la operación del sistema sin degradación ante fallas de actuadores de *pitch* ocasionadas por filtraciones de aire en el aceite y fugas en mangueras.

Por otro lado, para resolver el problema de la tolerancia a fallas en sensores, se propuso un esquema de control tolerante a fallas activo. Debido a que el sistema cuenta con redundancia de *hardware* en sensores. El esquema propuesto utiliza el principio de la reconfiguración del controlador, que consiste en reemplazar las señal del sensor con falla por la señal del sensor libre de falla. Para realizar la detección y el aislamiento de fallas se utilizó el esquema basado en observadores diseñado en el capítulo anterior. El esquema se evaluó ante 5 escenarios de fallas en sensores. Los resultados obtenidos en simulación mostraron la efectividad del esquema propuesto.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Conclusiones generales

En este trabajo de tesis se diseñaron dos esquemas de control tolerante a fallas para un sistema de conversión de energía eólica. Así como dos sistemas de detección y aislamiento de fallas. Las fallas consideradas son fallas en sensores del sistema de *pitch* y tren de transmisión, así como fallas en el actuador de *pitch*. Las fallas en sensores se modelaron por medio de valores fijos y factores de ganancia. Mientras que las fallas de actuadores del sistema *pitch* se modelaron mediante cambios de parámetros en el sistema.

Para resolver el problema de la detección de fallas en sensores se propusieron dos esquemas de detección y aislamiento; uno basado en datos y otro basado en modelo. Para el diseño del esquema de detección de fallas basado en datos se utilizó el algoritmo de la máquina de vectores de soporte. El algoritmo se entrenó con datos con y sin falla y, la detección de fallas se abordó como un problema de clasificación. Los resultados obtenidos mostraron la efectividad del método para detectar fallas en sensores del sistema de *pitch* y sensores del tren de transmisión. Es importante hacer notar que el método presenta dificultades para la detección de fallas de tipo factor de ganancia en sensores del tren de transmisión, por lo que este tipo de fallas no se lograron detectar con este método.

Por otro lado, para el esquema de detección de fallas basado en modelo se utilizó el método basados en observadores. Debido a las características de robustez y su capacidad

de rechazo de perturbaciones, se utilizaron las técnicas en modos deslizantes para el diseño de los observadores. Para realizar la detección de fallas se utilizó el concepto de residuo. La generación de residuos se logró mediante una configuración particular en banco de observadores, donde cada observador se diseñó para ser sensible solo a un tipo de falla. Los resultados obtenidos mostraron la efectividad del esquema propuesto para detectar y aislar 5 escenarios de falla considerados.

El problema del control tolerante a fallas se abordó desde dos enfoques. En el primer enfoque denominado pasivo, se diseñó una estrategia de control por modos deslizantes. El controlador propuesto resultó ser robusto a fallas en el actuador de *pitch*. Las fallas en el actuador de *pitch* mostraron tener una influencia directa en la producción de potencia eléctrica. La estrategia de control propuesta mostró tener la capacidad de mantener la producción de potencia constante a pesar de la incidencia de la falla en el sistema de *pitch*. La falla se introdujo en el sistema mediante un cambio en los parámetros del actuador de *pitch*.

Por otra parte, el segundo enfoque conocido como enfoque activo utiliza la información del sistema de detección y aislamiento de fallas. Una vez se ha detectado y aislado la falla en alguno de los sensores, las señales del sensor con falla son reemplazadas por las del sensor libre de falla. Una vez realizada la reconfiguración del sistema de control, la dinámica del sistema se encuentra libre de la propagación de la falla. Los resultados obtenidos muestran la efectividad del esquema propuesto. Si bien las fallas consideradas no son graves y, sólo provocan una degradación en la potencia eléctrica generada, su acción prolongada provoca daños en algunos componentes (principalmente de la turbina), por lo que es necesario programar acciones de mantenimiento correctivo para corregirlas.

6.2. Trabajos futuros

Para complementar el trabajo, los resultados obtenidos se pueden extender considerando los siguientes trabajos:

- La detección y diagnóstico de fallas en sensores de la velocidad del generador.
- El control tolerante a fallas activo para fallas en actuadores.

- El análisis de robustez de los sistemas de detección de fallas.
- La detección simultánea de fallas en sensores.
- La detección simultánea de fallas en actuadores.

Bibliografía

- [1] Lins, C. (2016). Renewables 2016 Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for 21st Century.
- [2] Boukhezzar, B., & Siguerdidjane, H. (2010). Comparison between linear and nonlinear control strategies for variable speed wind turbines. *Control Engineering Practice*, 18(12), 1357-1368.
- [3] Simani, S., & Castaldi, P. (2013). Data-driven and adaptive control applications to a wind turbine benchmark model. *Control Engineering Practice*, 21(12), 1678-1693.
- [4] Lio, W. H., Rossiter, J. A., & Jones, B. L. (2014, July). A review on applications of model predictive control to wind turbines. In *2014 Ukacc international conference on control (control)* (pp. 673-678). IEEE.
- [5] Radaideh, A., Bodoor, M. M., & Al-Quraan, A. (2021). Active and Reactive Power Control for Wind Turbines Based DFIG Using LQR Controller with Optimal Gain-Scheduling. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2021.
- [6] Farh, H. M., & Eltamaly, A. M. (2013). Fuzzy logic control of wind energy conversion system. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(2), 023125.
- [7] Yilmaz, A. S., & Özer, Z. (2009). Pitch angle control in wind turbines above the rated wind speed by multi-layer perceptron and radial basis function neural networks. *Expert Systems with Applications*, 36(6), 9767-9775.
- [8] Barambones, O. (2012). Sliding mode control strategy for wind turbine power maximization. *Energies*, 5(7), 2310-2330.

- [9] Wang, J. R., & Peng, P. P. (2015). Passivity-based control for doubly-fed induction generator with variable speed and constant frequency in wind power system: Junrui Wang & Piaopiao Peng. In *Electric, Electronic and Control Engineering* (pp. 285-290). CRC Press.
- [10] Wu, B., Lang, Y., Zargari, N. & Kouro, S. (2011). *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. John Wiley & Sons, Inc.
- [11] Liu, X. & Kong, X. (2014). Nonlinear Model Predictive Control for DFIG-Based Wind Power Generation. *IEEE Transactions*, 11, pp. 1046 1055.
- [12] Beltrán, B., Benbouzid, M. & Ahmed-Ali, T. (2012). Second-Order Sliding Mode Control of a Doubly Fed Induction Generator Driven Wind Turbine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27, pp. 261 26.
- [13] Beltrán, B., Benbouzid, M.; Amiratb, Y. & Yaoc, G. (2014). Second-order sliding mode control for DFIG-based wind turbines fault ride-through capability enhancement. *ISA Transactions*, 53, pp. 827 833.
- [14] Abad, G., Lopez, J., Rodriguez, M., Marroyo, L., & Iwanski, G. (2011). *Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation* (Vol. 85). John Wiley & Sons.
- [15] Luna, A., Lima, F., Rodríguez, P. & Watanabe, E.H. (2009). Comparison of power control strategies for DFIG wind turbines. En: *Industrial Electronics, 34th Annual Conference of IEEE*, pp. 2131-2136.
- [16] Chen, W., Blaabjerg, F., Nan Z., C., Min & Dehong, X. (2014). Comparison of control strategies for Doubly fed induction generator under recurring grid faults. En: *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 398-404.
- [17] Vachtsevanos, G. J., & Vachtsevanos, G. J. (2006). *Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems* (Vol. 456). Hoboken: Wiley.
- [18] Ningsu, L., Vidal, Y., & Acho, L. (2014). *Wind Turbine Control and Monitoring*. Springer.
- [19] García, F.P., Tobías, A.M., Pinar, J.M. & Papaelias, M. (2012). Condition Monitoring of Wind Turbines: Techniques and Methods, *Renewable Energy*, vol. 46, pp. 169-178.

- [20] Márquez, F. P. G., Tobias, A. M., Pérez, J. M. P., & Papaelias, M. (2012). Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods. *Renewable energy*, 46, 169-178.
- [21] Qiao, W., & Lu, D. (2015). A survey on wind turbine condition monitoring and fault diagnosis—Part I: Components and subsystems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(10), 6536-6545.
- [22] Johnson, K. E. & P. A. Fleming (2011). Development, implementation, and testing of fault detection strategies on the National Wind Technology Center’s controls advanced research turbines. *Mechatronics* 21, 728–736.
- [23] Gu, H., Liu, W. Y., Gao, Q. W., & Zhang, Y. (2021). A review on wind turbines gearbox fault diagnosis methods. *Journal of Vibroengineering*, 23(1), 26-43.
- [24] Liu, W. Y., Tang, B. P., Han, J. G., Lu, X. N., Hu, N. N., & He, Z. Z. (2015). The structure healthy condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 466-472.
- [25] Jin, X., Cheng, F., Peng, Y., Qiao, W., & Qu, L. (2016, October). A comparative study on Vibration-and current-based approaches for drivetrain gearbox fault diagnosis. In 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (pp. 1-8). IEEE.
- [26] Hameed, Z., Y. S. Yong, Y. M. Cho, S. H. Ahn, and C. K. Song (2009). Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 13, 1–39.
- [27] Gao, Q., Wu, X., Guo, J., Zhou, H., & Ruan, W. (2021). Machine-Learning-Based Intelligent Mechanical Fault Detection and Diagnosis of Wind Turbines. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021.
- [28] Yahyaoui, Z., Hajji, M., Mansouri, M., Harkat, M. F., Kouadri, A., Nounou, H., & Nounou, M. (2020). Efficient fault detection and diagnosis of wind energy converter systems. In 2020 17th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD) (pp. 213-218). IEEE.
- [29] Farsoni, S., Simani, S., & Castaldi, P. (2021). Fuzzy and Neural Network Approaches to Wind Turbine Fault Diagnosis. *Applied Sciences*, 11(11), 5035.

- [30] Wu, D., Liu, W., Song, J., & Shen, Y. (2016). Fault estimation and fault-tolerant control of wind turbines using the SDW-LSI algorithm. *IEEE Access*, 4, 7223-7231.
- [31] Yu, W., Huang, S., & Xiao, W. (2018). Fault diagnosis based on an approach combining a spectrogram and a convolutional neural network with application to a wind turbine system. *Energies*, 11(10), 2561.
- [32] Zhou, Q., Xiong, T., Wang, M., Xiang, C., & Xu, Q. (2017). Diagnosis and early warning of wind turbine faults based on cluster analysis theory and modified ANFIS. *Energies*, 10(7), 898.
- [33] Simani, S., & Castaldi, P. (2019). Intelligent fault diagnosis techniques applied to an offshore wind turbine system. *Applied Sciences*, 9(4), 783.
- [34] Simani, S., & Patton, R. J. (2008). Fault diagnosis of an industrial gas turbine prototype using a system identification approach. *Control Engineering Practice*, 16(7), 769-786.
- [35] Simani, S., & Farsoni, S. (2018). *Fault Diagnosis and Sustainable Control of Wind Turbines: Robust data-driven and model-based strategies*. Butterworth-Heinemann
- [36] Poschke, F., Georg, S. & Schulte H. (2014). Fault Reconstruction using a Takagi-Sugeno Sliding Mode Observer for the Wind Turbine Benchmark. In *UKACC International Conference on Control*, Lough- borough, UK, pp. 464-469.
- [37] Cho, S., Choi, M., Gao, Z., & Moan, T. (2021). Fault detection and diagnosis of a blade pitch system in a floating wind turbine based on Kalman filters and artificial neural networks. *Renewable Energy*, 169, 1–13.
- [38] Simani, S., Farsoni, S., & Castaldi, P. (2014). Residual generator fuzzy identification for wind farm fault diagnosis. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 4310-4315.
- [39] Kühne, P., Pöschke, F., & Schulte, H. (2018). Fault estimation and fault-tolerant control of the FAST NREL 5-MW reference wind turbine using a proportional multi-integral observer. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 32(4), 568-585.
- [40] Hwas, A., & Katebi, R. (2014, June). Nonlinear observer-based fault detection and isolation for wind turbines. In *22nd Mediterranean Conference on Control and Automation* (pp. 870-875). IEEE.

- [41] Hwas, A., & Katebi, R. (2012, September). Model-based fault detection and isolation for wind turbine. In Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control (pp. 876-881). IEEE.
- [42] Pao, L. & Johnson, K. (2011). Control of Wind Turbines: Approaches, Challenges and Recent Developments. *Automatica*, 43, pp. 440-460.
- [43] Blaabjerg, F., Liserre, M. & Ma, K. (2012). Power electronics converters for wind turbine systems, *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 48, no. 2, pp. 708-719.
- [44] Fekih, A., Mobayen, S., & Chen, C. C. (2021). Adaptive Robust Fault-Tolerant Control Design for Wind Turbines Subject to Pitch Actuator Faults. *Energies*, 14(6), 1791.
- [45] Cusidó, J., López, A., & Beretta, M. (2021). Fault-Tolerant Control of a Wind Turbine Generator Based on Fuzzy Logic and Using Ensemble Learning. *Energies*, 14(16), 5167.
- [46] Liu, Y., Frederik, J., Ferrari, R. M. G., Wu, P., Li, S., & Wingerden, J. (2021). Fault-tolerant individual pitch control of floating offshore wind turbines via subspace predictive repetitive control. *Wind Energy*, 24(9), 1045–1065.
- [47] Mazare, M., Taghizadeh, M., & Ghaf-Ghanbari, P. (2021). Fault tolerant control of wind turbines with simultaneous actuator and sensor faults using adaptive time delay control. *Renewable Energy*, 174, 86–101.
- [48] Badihi, H. & Zhang Y. (2015). Wind Turbine Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Torque Load Control against Actuator Faults. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 4, July 2015.
- [49] Feng, X. & Patton, R. F. (2013) A model-based predictive control for FTC for wind turbine wind speed sensor fault. Conference on Control and Fault-Tolerant Systems, October 9-11,2013. Nice, France.
- [50] Patton, R. and Shi, F. (2015). An active fault tolerant control approach to an offshore wind turbine model. *Renewable Energy an International Journal ELSEVIER*.
- [51] Simani, S., Farsoni, S., & Castaldi, P. (2013, October). Active fault tolerant control of wind turbines using identified nonlinear filters. In 2013 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol) (pp. 383-388). IEEE.

- [52] Simani, S., & Castaldi, P. (2012). Data-Drive Design of Fuzzy Logic Fault Tolerant Control for a Wind Turbine Benchmark. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(20), 108-113.
- [53] Simani, S., Farsoni, S., & Castaldi, P. (2014, July). Fault tolerant control of an offshore wind turbine model via identified fuzzy prototypes. In *2014 UKACC International Conference on Control (CONTROL)* (pp. 486-491). IEEE.
- [54] Kamal, E., Aitouche, A., & Abbes, D. (2014). Robust fuzzy scheduler fault tolerant control of wind energy systems subject to sensor and actuator faults. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 55, 402-419.
- [55] Habibi, H., Nohooji, H. R., & Howard, I. (2018). Adaptive PID control of wind turbines for power regulation with unknown control direction and actuator faults. *IEEE Access*, 6, 37464-37479.
- [56] Parker, M. A., Ng, C., & Ran, L. (2010). Fault-tolerant control for a modular generator-converter scheme for direct-drive wind turbines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 305-315.
- [57] Pourmohammad, S. and Fekih, A. (2011). "Fault-Tolerant Control of Wind Turbine Systems - A Review", *Proc. of the 2011. IEEE Green Technologies Conference (IEEE-Green)*.
- [58] Isermann, R. (2005). *Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer Science & Business Media.
- [59] Isermann, R. (2005). Model based fault-detection and diagnosis – status and applications, *Annual Reviews in Control*, vol. 29, no. 1, pp. 71-85.
- [60] Gertler, J. J. (2017). *Fault detection and diagnosis in engineering systems*. CRC press.
- [61] Isermann, R. & Ulieru M. (1993). Integrated fault detection and diagnosis, *IEEE Proceedings on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 1, pp.743 – 748, 17-20.
- [62] Vapnik, V. (1995). *The Nature of Statistical Learning Theory*, Springer, New York.
- [63] Ma, Y., & Guo, G. (2014). *Support vector machines applications (Vol. 649)*. New York, NY, USA: Springer.

- [64] Ogata, K. (2000). Modern control engineering. 2001. Prentice Hall, ISBN, 13, 978-0.
- [65] Edwards, C., Alwi, H., & Tan, C. P. (2010, October). Sliding mode methods for fault detection and fault tolerant control. In 2010 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol) (pp. 106-117). IEEE.
- [66] Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., & Levant, A. (2014). Sliding mode control and observation (Vol. 10). New York, NY: Springer New York.
- [67] Edwards, C., Spurgeon, S. K., & Patton, R. J. (2000). Sliding mode observers for fault detection and isolation. *Automatica*, 36(4), 541-553.
- [68] Ackermann, T. (2005). Wind Power in PowerSystems, John Wiley&Sons, England.
- [69] Odgaard, P. F., Stoustrup, J. and Kinnaert, M. (2013). Fault Tolerant Control of Wind Turbines: A Benchmark Model. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 4.
- [70] Odgaard, P. F. & Stoustrup, J. Fault tolerant control of wind turbines using unknown input observers. 8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, 2012. 313-318.
- [71] Manwell, J.; McGowan, J. y Rogers, A. (2009). Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. John Wiley & Sons, Inc.
- [72] Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., Staroswiecki, M., & Schröder, J. (2006). Diagnosis and fault-tolerant control (Vol. 2). Berlin: Springer.
- [73] Anzai, Y. (2012). Pattern recognition and machine learning. Elsevier.
- [74] Lu, B., Li, Y., Wu, X., & Yang, Z. (2009, June). A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis. In 2009 IEEE power electronics and machines in wind applications (pp. 1-7). IEEE.
- [75] Liu, X. and Kong, X. (2014). Nonlinear Model Predictive Control for DFIG-Based Wind Power Generation. *IEEE Transactions*, 11, pp. 1046 1055.
- [76] Sloth, C., Esbensen, T. & Stoustrup, J. Active and passive fault-tolerant LPV control of wind turbines. American Control Conference (ACC), 2010, 2010. IEEE, 4640-4646.

- [77] Izadi, R. Z. Fault-tolerant Supervisory Control - System Analysis and Logic Design. PhD thesis, Aalborg University Department of Control Engineering, 1999.
- [78] Chen, J., & Patton, R. J. (2012). Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems (Vol. 3). Springer Science & Business Media.
- [79] Patton, R. J. (1997). Fault-tolerant control: the 1997 situation. IFAC Proceedings Volumes, 30(18), 1029-1051.
- [80] Jiang, J. (2005). Fault-tolerant control systems-an introductory overview. Acta Automatica Sinica, 31(1), 161-174.
- [81] Noura, H., Theilliol, D., Ponsart, J. C., & Chamseddine, A. (2009). Fault-tolerant control systems: Design and practical applications. Springer Science & Business Media.
- [82] Edwards, C., & Spurgeon, S. (1998). Sliding mode control: theory and applications. Crc Press.

Parte I

Glosario

WECS	Sistema de conversión de energía eólica.
FTC	Control tolerante a fallas.
FDD	Detección y diagnóstico de fallas.
FDI	Detección y aislamiento de fallas.
LPV	Lineal de parámetros variables.
PCA	Análisis de componentes principales.
TSR	Relación de velocidades en punta del aspa.
AFTCS	Sistema de control tolerante a fallas activo.
PFTCS	Sistemas de control tolerante a fallas pasivo.
SVM	Máquina de vectores de soporte.
SMC	Control por modos deslizantes.
SMO	Observador por modos deslizantes.
VOC	Control por campo orientado.
MCS	Sistema de monitoreo de condiciones.
MPC	Modelo de control predictivo.