



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Diseño de un Esquema de Diagnóstico de Fallas en
una Turbina Eólica**

presentada por

Ing. Daniel Alberto Arámbula Jiménez

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

Director de tesis

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo

Codirector de tesis

Dr. Abraham Jashiel Pérez Estrada

Cuernavaca, Morelos, México. Marzo de 2020.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Cuernavaca, Mor.,
No. de Oficio:
Asunto:

4/marzo/2020

DIE/141/2020

Aceptación de documentos de tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Ing. Daniel Alberto Arámbula Jiménez**, con número de control **M18CE033** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"Diseño de un esquema de diagnóstico de fallas en una turbina eólica"** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTORADE TESIS

CODIRECTOR DE TESIS

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 9968714

Dr. Abraham Jashiel Pérez Estrada
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 11941955

REVISOR 1

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Doctor en Ingeniería electrónica
Cédula profesional 5505019

REVISOR 2

Dr. Guadalupe Madrigal Espinosa
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 11106824

C.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera- Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
Expediente

MPS/Irr.



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Cuernavaca, Morelos, 10/marzo/2020

OFICIO No. SAC/135/2020
Asunto: Autorización de impresión de tesis

DANIEL ALBERTO ARÁMBULA JIMÉNEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO 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 "*Diseño de un esquema de diagnóstico de fallas en una turbina eólica*", 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®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



SEP TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

C.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera. Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente.

CVGR/CHG

Dedicatoria

A mis padres

Dedico este trabajo con todo cariño y amor a mis padres, a quienes les debo todo en la vida. Por su apoyo incondicional en todo, este logro es para ustedes. Sin su ejemplo no hubiera llegado hasta aquí. ¡Los amo!

A mi novia

Es una bendición tenerte en mi vida, día con día tu eres mi motivación para alcanzar nuevas metas, tanto personales como profesionales. Sin duda tu apoyo, paciencia, amor y ánimo fue fundamental para alcanzar este logro. Te amo.

Agradecimientos

A mis padres, a quienes respeto y admiro, gracias por motivarme y apoyarme siempre.

A mi novia, por su amor incondicional, la motivación para seguir adelante y su compañía durante todo este proceso.

A mi asesora, la Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo, por toda la paciencia, la dedicación, los consejos y en general por orientarme durante todo el desarrollo de este trabajo de investigación.

A mi co-asesor, el Dr. Abraham Jashiel Pérez Estrada, por compartir su conocimiento, tiempo y esfuerzo para realizar este trabajo de tesis.

A mis revisores, el Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza y el Dr. Guadalupe Madrigal Espinosa, sus valiosos comentarios y observaciones ayudaron a enriquecer este trabajo.

A mis compañeros y amigos de generación, Felipe, Cesar, Héctor, Avelino, Oyuki y Alejandro, con quienes compartí aula, tareas, desvelos, les agradezco por todos los buenos y malos momentos. A mis demás compañeros del CENIDET: Moisés, Carlos, Daniel, Juan, Eusebio, Diana, Isaac, Erick, Jonathan, Henry y Citlaly, por haber hecho de este lugar una estancia agradable y confortable.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) y a mis profesores, por compartir sus experiencias y conocimientos. También a todo el personal que trabajar en el centro en especial a la Lic. Lorena por todo el apoyo brindado para la culminación de esta meta.

Finalmente, al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para la realización de este trabajo y culminar con mis estudios de maestría.

Resumen

El presente trabajo de investigación muestra la propuesta de un esquema de diagnóstico de fallas en sensores basado en modelo que es aplicado a la caja de transmisión de una turbina eólica. El modelo matemático de la caja de transmisión tiene una forma no lineal, en este trabajo es representado mediante el enfoque Takagi Sugeno (TS), el cual nos permite describir las propiedades no lineales del mismo, pero desde el enfoque de modelos lineales.

El diseño del esquema de diagnóstico de fallas propone un observador TS con generación de residuos basado en la minimización del efecto de las fallas en los estados estimados y la maximización del efecto de las fallas en los residuos. Para garantizar la estabilidad del observador se utilizó el método directo de Lyapunov, presentando las condiciones necesarias para la estabilidad del observador mediante desigualdades matriciales lineales (LMI). Se presenta un benchmark que describe el comportamiento de una turbina eólica genérica de tres hélices y de tipo horizontal con una potencia nominal de 4.8MW.

El esquema de diagnóstico de fallas en sensores se validó mediante cuatro escenarios de fallas, los cuales, los primeros dos presentan los tipos de fallas más recurrentes y los restantes se propusieron para probar la robustez del esquema de diagnóstico ante diferentes tipos de fallas.

Abstract

In this thesis a proposal for a model based fault diagnostic scheme in sensors is shown, it is applied to the transmission box of a wind turbine. The mathematical model of the transmission box is non linear, so in this work it is represented using the Takagi Sugeno (TS) approach, which allows to describe the system from a linear model approach.

The fault diagnosis design scheme proposes a TS observer with residual generation based on the minimization of the faults effect on the estimated states and the maximization of the faults effect on the residues. The Lyapunov direct method was used for ensuring observer stability, presenting the necessary conditions for the observer stability through linear matrix inequalities (LMI).

A benchmark is used to represent the behavior of a generic three helices, horizontal type wind turbine with a nominal power of 4.8MW.

The proposed fault diagnosis scheme was validated in four fault scenarios, in which the first two simulate the most common fault types and the remaining two were used to test the robustness of the diagnostic scheme in the face of different types of faults.

Índice general

Índice general	v
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	xi
Nomenclatura y acrónimos	xii
1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	5
1.3 Estudio del estado del arte	5
1.4 Alcances y limitaciones	6
1.4.1 Alcance	6
1.4.2 Limitaciones	7
1.5 Aportación	7
1.6 Hipótesis	7
2 Marco Teórico	8
2.1 Turbinas eólicas.	8
2.1.1 Clasificación de turbinas	8
2.1.2 Turbinas de eje vertical (VAWT)	9
2.1.3 Turbinas de eje horizontal (HAWT)	10
2.2 Sistemas Takagi Sugeno	12

2.2.1	Representación TS	13
2.2.2	Modelado de sistemas TS	14
2.3	Conceptos básicos de observadores	17
2.3.1	Observabilidad	18
2.4	Conceptos sobre fallas	18
2.5	Detección y diagnóstico de fallas	20
2.5.1	Diagnóstico de fallas basado en modelos	22
3	Caso de estudio	24
3.1	Benchmark de la turbina eólica	25
3.2	Modelo de las hélices y el sistema de pitch	26
3.3	Modelo de la caja de transmisión	28
3.4	Modelo del generador y convertidor	29
3.5	Controlador de la turbina eólica	29
3.6	Modelo no lineal de la caja de transmisión	32
3.7	Modelo Takagi Sugeno de la caja de transmisión	33
4	Diseño del esquema de diagnóstico	38
4.1	Diseño del observador	38
4.1.1	Estabilidad basada en Lyapunov	41
4.1.2	Generación de residuos	43
4.1.3	Evaluación de residuos	43
4.1.4	Decisión	45
4.1.5	Estimación de la falla	46
5	Pruebas y resultados de simulación	47
5.1	Escenario 1. Falla abrupta en sensores por factor de ganancia.	48
5.1.1	Simulación 1. Falla en el sensor de la velocidad angular del rotor, ω_r	48
5.1.2	Simulación 2. Falla en el sensor de la velocidad angular del rotor, ω_g	51
5.1.3	Simulación 3. Fallas múltiples en sensores ω_r y ω_g	55
5.1.4	Conclusión de Escenario 1	58
5.2	Escenario 2. Falla abrupta por sensores pasmado.	59

5.2.1	Simulación 4. Falla en el sensor de la velocidad angular del rotor, ω_r	59
5.2.2	Simulación 5. Falla en el sensor de la velocidad angular del generador, ω_g . . .	62
5.2.3	Conclusión de Escenario 2	65
5.3	Escenario 3. Falla incipiente	66
5.3.1	Simulación 6. Falla en el sensor de la velocidad angular del rotor, ω_r	66
5.3.2	Conclusión de Escenario 3	69
5.4	Escenario 4. Falla intermitente	70
5.4.1	Simulación 7. Falla en el sensor de la velocidad angular del generador, ω_g . . .	70
5.4.2	Conclusión de Escenario 4.	73
6	Conclusiones	74
	Bibliografía	76
	Anexos	79
A	Banco de observadores	80
A.1	Prueba del esquema de detección y localización de fallas	81
A.1.1	Escenarios de falla.	82
A.1.2	Firma de fallas	86
A.1.3	Conclusión	87
B	Simulación con perfil de viento ideal	88

Índice de figuras

1.1	Generación de energía en México.	2
1.2	Generación de energía eólica en México	2
2.1	HAWT y VAWT	9
2.2	Turbina de eje vertical, tipo Darrieus	9
2.3	Turbina de eje horizontal	10
2.4	Partes de una turbina eólica	11
2.5	Esquema de observador de estados	17
2.6	Tipos de fallas según su forma	19
2.7	Esquema general de diagnóstico de fallas	21
2.8	Esquema de redundancia física y redundancia analítica	22
3.1	Diagrama de la turbina eólica por sub-sistemas	25
3.2	Zonas de control	30
3.3	Velocidad del viento, $v_w(t)$	34
3.4	Torque del generador, $\tau_g(t)$	35
3.5	Potencia generada, $P_g(t)$	35
3.6	Funciones de pertenencia	36
3.7	Comparación del sistema no lineal y la representación TS para el primer estado. . .	36
3.8	Comparación del sistema no lineal y la representación TS para el segundo estado. .	37
4.1	Evolución de los dos residuos (r1 y r2) libre de fallas	44
4.2	Diagrama de flujo de la detección y localización de la falla	46
5.1	Diagrama a bloques del esquema de generación de residuos.	47
5.2	Falla abrupta para simulación 1.	48

5.3 Entradas para la simulación 1. 49

5.4 Comparación de mediciones reales y estados estimados para la simulación 1. 49

5.5 Evolución de los residuos (r1 y r2) para falla abrupta en ω_r 50

5.6 Comparación de la falla abrupta en ω_r y su estimación 51

5.7 Falla abrupta para simulación 1. 51

5.8 Entradas para la simulación 2. 52

5.9 Comparación de mediciones reales y estados estimados para la simulación 2. 52

5.10 Comparación del torque del generador libre de falla y con falla abrupta por factor
de ganancia en ω_g 53

5.11 Evolución de los residuos (r1 y r2) para falla abrupta en ω_r 53

5.12 Comparación de la falla abrupta en ω_g y su estimación 54

5.13 Falla abrupta en sensor de ω_r para simulación 3. 55

5.14 Falla abrupta en sensor de ω_g para simulación 3. 55

5.15 Entradas para la simulación 2. 56

5.16 Comparación de mediciones reales y estados estimados para la simulación 3. 56

5.17 Evolución de los residuos (r1 y r2) para falla abrupta en múltiples sensores. 57

5.18 Comparación de las fallas en ω_y y en ω_g contra sus estimaciones para simulación 3. 58

5.19 Falla abrupta para simulación 4 59

5.20 Entradas para la simulación 4 60

5.21 Comparación de mediciones reales y estados estimados para la simulación 4. 60

5.22 Evolución de los dos residuos (r1 y r2) para falla de valor fijo en ω_r 61

5.23 Comparación de la falla abrupta de valor fijo en ω_r y su estimación 62

5.24 Falla abrupta para simulación 5. 62

5.25 Entradas para la simulación 2. 63

5.26 Comparación de mediciones reales y estados estimados para la simulación 5. 63

5.27 Comparación del torque del generador libre de falla y para falla abrupta por sensor
pasmado. 64

5.28 Evolución de los residuos (r1 y r2) para falla abrupta en ω_r 64

5.29 Comparación de la falla abrupta de valor fijo en ω_g y su estimación 65

5.30 Falla incipiente para simulación 6. 66

5.31 Entradas para la simulación 6. 67

5.32 Comparación de mediciones reales y estados estimados para la simulación 6. 67

5.33 Evolución de los residuos (r1 y r2) para falla abrupta en ω_r 68

5.34 Comparación de la falla incipiente en ω_r t su estimación 69

5.35 Falla intermitente para simulación 7. 70

5.36 Entradas para la simulación 7. 70

5.37 Comparación de mediciones reales y estados estimados para la simulación 7. 71

5.38 Comparación del torque del generador en caso libre de falla y para falla intermitente
 en ω_g 71

5.39 Evolución de los residuos (r1 y r2) para falla abrupta en ω_r 72

5.40 Comparación de la falla intermitente en ω_g y su estimación 73

A.1 Esquema DOS 80

A.1 Falla abrupta en ω_r 82

A.2 Residuos, escenario de falla 1 ω_r 83

A.3 Falla abrupta en ω_g 83

A.4 Residuos, escenario de falla 1 ω_g 84

A.5 Falla abrupta en ω_r por falta de lectura. 84

A.6 Residuos, escenario de falla 2 ω_r por falta de lectura. 85

A.7 Falla abrupta en ω_g por falta de lectura. 85

A.8 Residuos, escenario de falla 2 ω_g 86

B.1 Velocidad del viento ideal 88

B.2 Potencia generada con viento ideal 89

B.3 Velocidad angula del rotor con viento ideal 89

B.4 Funciones de pertenencia con viento ideal 90

Índice de tablas

Tabla 2.1	Ventajas y desventajas VAWT	10
Tabla 2.2	Ventajas y desventajas HAWT	11
Tabla 3.1	Parámetros de la turbina eólica por sub-sistemas.	26
Tabla 3.2	Parámetros usados en el modelo de hélices y sistema de pitch.	27
Tabla 3.3	Parámetros usados en el modelo de la caja de transmisión.	28
Tabla 3.4	Parámetros usados en el modelo del generador y convertidor.	29
Tabla 3.5	Parámetros usados en el controlador.	32
Tabla 4.1	Matriz de firma de fallas.	45
Tabla 5.1	Síntomas de generados en simulación 1.	50
Tabla 5.2	Síntomas de generados en simulación 2.	54
Tabla 5.3	Síntomas de generados en simulación 3.	57
Tabla 5.4	Síntomas de generados en simulación 4.	61
Tabla 5.5	Síntomas de generados en simulación 5.	65
Tabla 5.6	Síntomas de generados en simulación 6.	68
Tabla 5.7	Síntomas de generados en simulación 7.	72
Tabla A.1.1	Firma de fallas	86

Nomenclatura y acrónimos

Conjuntos y Normas

\mathbb{R}	Conjunto de todos los números reales.
\mathbb{C}_+	Semiplano complejo abierto por la derecha
$\ a\ $	La norma Euclidiana de a .

Matrices y Vectores

$A > 0$	Matriz definida positiva.
$A < 0$	Matriz definida negativa.
I	Matriz identidad de dimensiones apropiadas.
0	Matriz con elementos cero de dimensiones apropiadas.
A^T	Traspuesta de una matriz A .
$A = A^T$	Matriz simétrica

Acrónimos

TS	Takagi Sugeno.
LMI	Desigualdad matricial lineal (<i>Linear Matrix Inequality</i>).
LTI	Lineal invariable en el tiempo (<i>Linear Time-Invariant</i>).
FDD	Sistema de detección y diagnóstico de fallas (<i>Fault Detection and Diagnosis</i>).
LPV	Lineal de parámetros variables (<i>Linear Parameter-Varying</i>).
IPC	Control individual de pitch (<i>Individual Pitch Controller</i>).
FTC	Control tolerante a fallas (<i>Fault Tolerant Control</i>).
HAWT	Turbina eólica de eje horizontal (<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>).
VAWT	Turbina eólica de eje vertical (<i>Vertical Axis Wind Turbine</i>).
DOS	Esquema de observadores dedicado (<i>Dedicated Observer Scheme</i>).
MIMO	Múltiples entradas y múltiples salidas (<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>).

Capítulo 1

Introducción

Cada día existe una mayor demanda de energía eléctrica, la cual, es decisiva en el desarrollo económico y social y, por lo tanto, en el mejoramiento de las condiciones económicas del país.

Sin embargo, el sistema eléctrico nacional utiliza una gran cantidad de recursos naturales no renovables, los cuales, generan una cantidad de gases contaminantes considerables. Siendo una de las principales causas del efecto invernadero, así como, de los problemas ambientales asociados como el aumento de la temperatura de nuestro planeta, el derretimiento de los polos glaciares, entre otros.

Es claro y evidente, que la producción de energía eléctrica dependiente de combustibles fósiles debe ser suprimida o restituida por generación de energías limpias y renovables, para mitigar el deterioro del medio ambiente. Las energías renovables provenientes de fuentes naturales, son la mejor alternativa para seguir produciendo energía eléctrica sin generar residuos contaminantes, y de esta forma revertir el cambio climático. Teniendo varias opciones, tales como: energía solar, eólica, hidroeléctrica, térmica, entre otras.

En México en el primer semestre del año 2018 se generó 167,893.15 GWh como se muestra en la Fig. 1.1. De esta figura se puede observar que el 75.88 % se produce con recursos naturales fósiles, el 17.29 % con recursos naturales renovables y el 6.83 % de otras fuentes limpias como la nuclear, cogeneración eficiente, frenado regenerativos y licor negro (Rodríguez y Arcos, 2018).

■ Recursos naturales no renovables ■ Recursos naturales renovables ■ Otras fuentes limpias

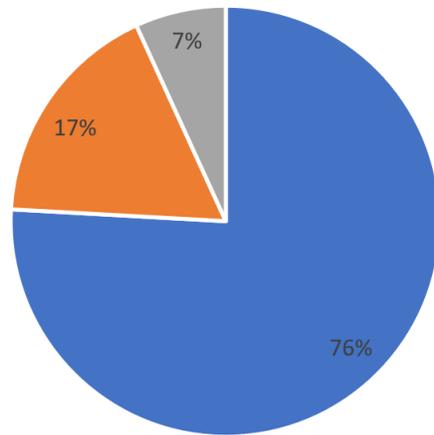


Fig. 1.1. Generación de energía en México.

De las energías renovables, la más utilizada y la más eficiente es la eólica produciendo en tan solo el primer semestre del año 2018 un total de 6,093.02 GWh lo que equivale a un 3.63% de la energía total producida en ese semestre. Como se muestra en la Fig. 1.2 la generación de energía eólica aumentó un 19.60% del primer semestre del 2017 al primer semestre del 2018.

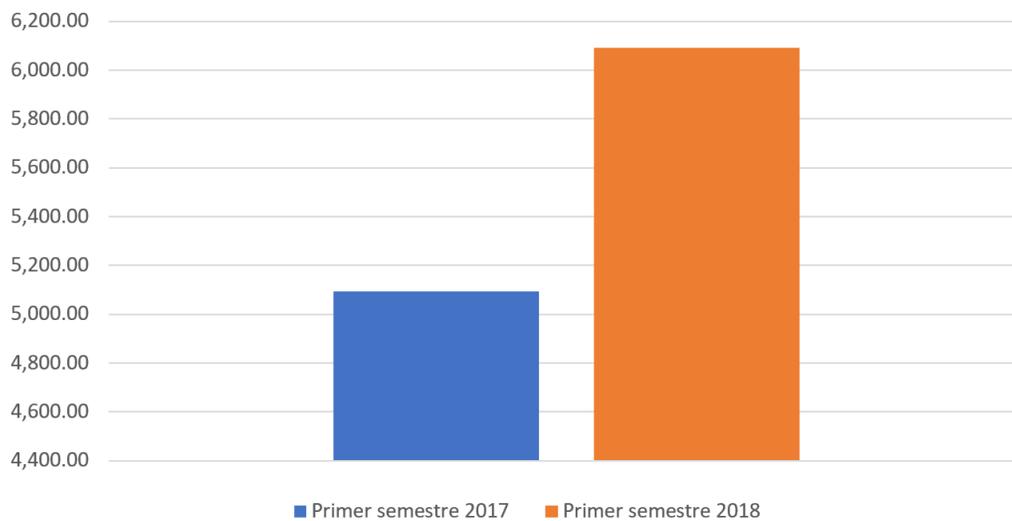


Fig. 1.2. Generación de energía eólica en México

El último reporte oficial, publicado por la Asociación Mexicana de Energía Eólica informó que en tan solo el primer semestre del 2018 existían 54 parques eólicos con 2,447 turbinas eólicas en operación. Se reportó que al cierre del 2019 el número de parques eólicos subió a 71, en donde, la mayoría son de tipo eje horizontal. Lo que significa que referente a la generación de energía eléctrica a través del aprovechamiento del viento en México, a recibido una gran importancia y un creciendo exponencial. Para el año 2020 se estima que la energía eólica generada representará aproximadamente el 14% de la energía total del país. Debido a este crecimiento se deriva la importancia de las investigaciones referentes a la industria eólica.

Algunas fallas en la turbina eólica pueden generar consecuencias serias como daño al medio ambiente, al equipo o en algunos casos pérdidas de vidas humanas. Por ello, existe una necesidad de un diagnóstico de fallas para evitar daños irreversibles y poder lograr minimizar costos de mantenimiento en la turbina y a su vez, alargar la vida útil de la misma. También proporciona mayor seguridad a los operadores, al proceso y en general a todo el medio ambiente.

En este trabajo, se propone un esquema de diagnóstico de fallas en sensores para la caja de transmisión de la turbina eólica, mediante observadores basado en sistemas Takagi-Sugeno, los cuales permiten generar residuos con el propósito de mandar una alarma al sistema de monitoreo, y así, ayudar al operador en la toma de decisiones.

1.1. Planteamiento del problema

La creciente preocupación acerca de impacto ambiental y a su vez, la disminución de las reservas de combustibles fósiles, han incitado a aprovechar la generación de energía renovable, para poco a poco sustituir la energía generada con combustibles fósiles. Siendo la generación de energía eólica la de mayor impacto en la actualidad, puesto que, ofrece un modo de satisfacer las necesidades de la economía siendo amigable con el medio ambiente.

Sin embargo, en función el incremento de la demanda de productividad y las estrictas especificaciones de eficiencia en las turbinas eólicas, causan una mayor complejidad y sofisticación en el diseño y funcionamiento de las mismas. Aunado a esto, los costos de mantenimiento se estiman en

al menos un 10 % de los ingresos netos de la generación de energía, surge entonces la necesidad de diseñar e implementar esquemas de diagnóstico de fallas. Los cuales garanticen que la información proporcionada acerca de las fallas será útil para que la operación de la turbina sea segura, continua y eficiente, asegurando así, una mayor vida útil.

Debido a la complejidad de una turbina eólica y por el hecho de contar con múltiples componentes, el número de fallas a las que se encuentra propensa es significativo. Por lo que, se decidió tratar unas de las fallas más comunes en sensores de una turbina eólica: los sensores de velocidad angular del rotor y del generador. Los cuales, en un estado de falla pueden causar que el controlador de la turbina eólica modifique erróneamente el ángulo de inclinación de las hélices provocando, en ciertos casos, severos daños a la estructura interna y externa de la turbina.

Puesto que, el modelo matemático de la turbina eólica es muy complejo ya que las fallas de sensores a tratar son las de la velocidad angular del rotor y el generador, se propone dividir el sistema de la turbina eólica en sub-sistemas, utilizando entonces el sub-sistema de la caja de transmisión. Sin embargo, el esquema de diagnóstico de fallas se validará en la turbina eólica en lazo cerrado.

En lo que se refiere al modelo matemático de la caja de transmisión, puesto que existen ciertos factores como la velocidad del viento variable y la aerodinámica de las hélices con respecto al viento, se deduce la turbina como un sistema no lineal. Sin embargo, debido a que existen más algoritmos bien establecidos para el diseño de observadores para sistemas lineales, se propone utilizar un enfoque TS como una alternativa viable, ya que se ha demostrado que puede llegar a tener el mismo alcance que los enfoques no lineales.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Diseñar un sistema capaz de detectar y diagnosticar fallas en sensores de la caja de transmisión de una turbina eólica utilizando el enfoque Takagi-Sugeno.

1.2.2. Objetivos específicos

- Establecer un modelo Takagi Sugeno para la caja de transmisión de una turbina eólica.
- Diseñar un sistema de diagnóstico de fallas utilizando un solo observador con generación de residuos.
- Validar el esquema de diagnóstico de fallas propuesto mediante simulación ante diferentes escenarios de falla.

1.3. Estudio del estado del arte

En la revisión de la bibliografía relacionada al tema se exploraron los siguientes temas:

En Manrique *y col.* (2012) integran un sistema de detección en aerogeneradores, conocido como Sistema de detección y diagnóstico de fallas (FDD, por sus siglas en inglés *Fault Detection and Diagnosis*). Realizan un análisis comparativo de diferentes técnicas: árboles de decisión, clasificación Bayesiana, redes neuronales y máquinas de vectores de soporte aplicadas a la detección de fallas. Encontraron que el clasificador Bayesiano presenta el mejor desempeño.

En Serra *y col.* (2008) analizan estrategias para el diagnóstico de fallas en turbinas eólicas específicamente en el generador, la caja reductora y las palas. Estudiaron diferentes técnicas no invasivas y se concluyó que en sistemas eólicos de pequeña y mediana potencia es conveniente el uso de técnicas basadas en variables eléctricas para disminuir costos, mientras que para equipos de gran potencia se justifica la utilización de sensores.

En Gray *y col.* (2015) presentan un diagnóstico de fallas basado en la relación de variables y sus respuestas en cadena ante presencia de falla en turbinas eólicas basado en modelos. Con los modelos lógicos pudieron determinar directamente las causas de raíz por medio del mapeo de los enlaces entre fallas, sus efectos y condiciones.

En Haghani *y col.* (2015) analizan un modelo no lineal de una turbina eólica, lo aproximan a sistemas lineales múltiples para diferentes puntos de operación y, por lo tanto, el esquema de diag-

nóstico es robusto frente a las perturbaciones.

En Odgaard *y col.* (2015) proponen un esquema de diagnóstico y control tolerante a fallas para el control individual de cabeceo (IPC, por sus siglas del inglés *Individual Pitch Controller*) en una turbina eólica. Los resultados demostraron que el esquema propuesto es útil para el IPC. Dicho esquema permitió desactivar el componente IPC durante la presencia de fallas evitando lecturas erróneas de la señal del sensor defectuoso.

En Li *y col.* (2017) presentan una estrategia de estimación de perturbaciones y fallas en un actuador de una turbina eólica usando el modelo difuso Takagi Sugeno(TS). Descomponen el sistema TS en 3 subsistemas diferentes: subsistema de estado sin falla y perturbación, subsistema de perturbación sin fallas y subsistema de falla sin perturbación. Dan condiciones suficientes para diseñar el observador propuesto y analizan su convergencia.

En Sami y Patton (2012) presentan una estrategia de control tolerante a fallas (FTC, por sus siglas en inglés *Fault Tolerant Control*) para optimizar la energía eólica capturada por un aerogenerador operando en bajas velocidades de viento. En su estrategia utilizaron observadores difusos Takagi Sugeno(TS) con control de retroalimentación de estados para mantener el control nominal de la turbina sin cambios con fallas y sin fallas.

En Feng *y col.* (2014) proponen un enfoque de control tolerante a fallas de una turbina eólica sujeta a fallas de sensores. Diseñaron un observador difuso TS y también proponen un control predictivo por modelo en modelado difuso TS.

1.4. Alcances y limitaciones

1.4.1. Alcance

Dado que la turbina eólica es un sistema bastante complejo, sólo se considerará la caja de transmisión de la turbina eólica, debido a que una falla en la medición de los sensores de la misma podría causar severos daños en la estructura de la turbina.

Se utilizará el enfoque TS como una alternativa viable a los sistemas no lineales, ya que en la literatura se ha mostrado que puede llegar a tener el mismo alcance que los enfoques no lineales. Dicho enfoque se empleará para desarrollar un esquema de diagnóstico de fallas en sensores basado en un observador con generación de residuos.

Con el fin de demostrar el comportamiento del enfoque presentado se validará en simulación utilizando datos experimentales reportados en un benchmark.

1.4.2. Limitaciones

El esquema de diagnóstico de fallas estará limitado a sólo poder detectar fallas en sensores de la caja de transmisión de la turbina eólica. Lo que significa que, si ocurre una falla de actuador, de componentes del sistema o simplemente en otro elemento de la turbina eólica, no será posible diagnosticarlos.

1.5. Aportación

La aportación científica de este trabajo fue el diseño de un esquema de diagnóstico de fallas que consta de un observador basado en la generación de residuos con un enfoque TS, el cual fue validado mediante simulación con datos reales de un benchmark de una turbina eólica.

1.6. Hipótesis

Es posible diagnosticar fallas en los sensores de la caja de transmisión de una turbina eólica con el diseño de un esquema de diagnóstico de fallas, utilizando una representación TS del modelo no lineal, mediante un observador con generación de residuos.

Capítulo 2

Marco Teórico

El presente capítulo está dedicado a la descripción de la teoría utilizada en el desarrollo de este trabajo de tesis.

En la sección 2.1 se explica el funcionamiento general de una turbina eólica, así como las partes que la componen y su clasificación según el posicionamiento de su eje. La sección 2.2 se presenta algunas definiciones sobre los sistemas TS, así como los métodos más utilizados para obtener este tipo de representaciones. En la sección 2.3 se describe qué es un observador, sus aplicaciones y se muestra un esquema de un observador de estados. Finalmente, la sección 2.5 contiene generalidades sobre los esquemas el diagnóstico de fallas basados en modelos y conceptos básicos de fallas.

2.1. Turbinas eólicas.

Una turbina eólica es un dispositivo mecánico que aprovecha la velocidad del viento para generar energía eléctrica. El funcionamiento general de una turbina es convertir la energía cinética del viento por medio de las hélices en un torque mecánico que actúa sobre un eje conectado a un generador que transforma la energía mecánica en energía eléctrica.

2.1.1. Clasificación de turbinas

Existen diferentes formas de clasificar las turbinas eólicas, por ejemplo: según la orientación respecto al viento; según el número de hélices; por el tipo de torre, según la zona donde estén instaladas, por el tipo de generador o por su conexión. Las turbinas de viento se pueden clasificar mediante la posición del rotor, tales como, turbinas de eje horizontal (HAWT, por sus siglas en inglés *Hori-*

zontal Axis Wind Turbine) y las turbinas de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés *Vertical Axis Wind Turbine*), como se muestra en la Fig. 2.1. El principio de operación es prácticamente el mismo recolectan energía del viento por medio de sus hélices transformándola en energía eléctrica.

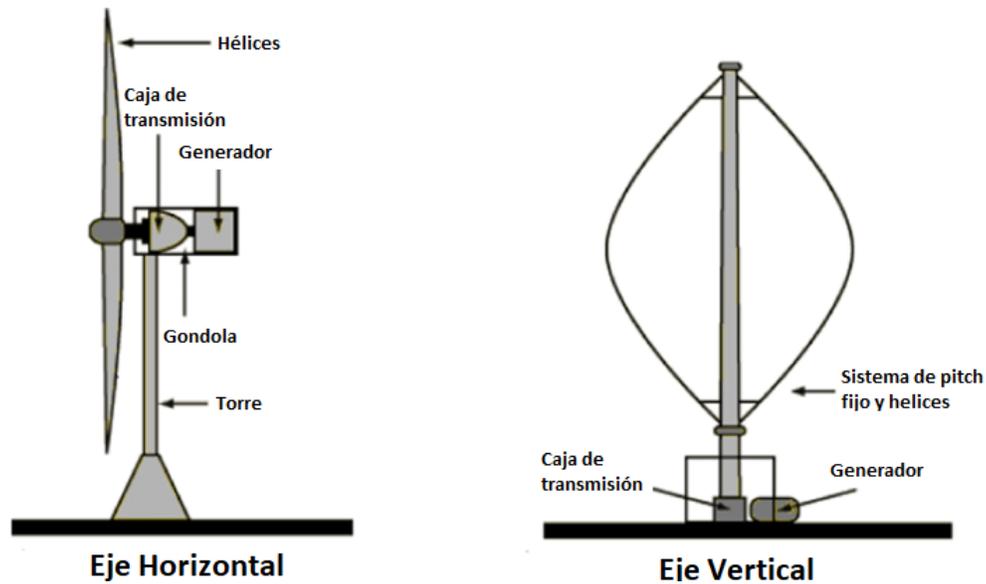


Fig. 2.1. HAWT y VAWT

2.1.2. Turbinas de eje vertical (VAWT)

El eje de rotación de una VAWT es vertical respecto del suelo y casi perpendicular a la dirección del viento como se muestra en Fig. 2.2 (Lopez *y col.*, 2007).



Fig. 2.2. Turbina de eje vertical, tipo Darrieus

El generador y la caja de transmisión se colocan en la parte inferior de la turbina, lo que facilita y disminuye el precio de la construcción y mantenimiento (Rodríguez *y col.*, 2018). En la Tabla 2.1 se presentan las ventajas y desventajas de este tipo de turbina.

Tabla 2.1. Ventajas y desventajas VAWT

Ventajas	Desventajas
No necesitan un sistema de orientación.	Baja eficiencia.
No es necesaria una torre debido a que los elementos principales están situados cerca del suelo (Económico).	Complicada estabilidad estructural y elevadas fluctuaciones de par.
Ausencia de fuerzas gravitatorias cíclicas en el rotor.	Ausencia de par de arranque, lo que significa que necesita de conexión a la red para poder arrancar.
No se necesita control de ángulo de hélice.	Reciben poca cantidad de viento al estar situadas a nivel del suelo.

2.1.3. Turbinas de eje horizontal (HAWT)

El eje de rotación es horizontal al suelo y casi en paralelo a la dirección del viento tal como las hélices de los aviones y los antiguos molinos de viento como se muestra en la Fig. 2.3 (Lopez *y col.*, 2007).



Fig. 2.3. Turbina de eje horizontal

En la Tabla 2.2 se presentan las ventajas y desventajas de este tipo de turbina.

Tabla 2.2. Ventajas y desventajas HAWT

Ventajas	Desventajas
Baja velocidad de arranque y coeficiente de potencia relativamente alto.	El generador y caja de transmisión situado en la punta de la torre hace el diseño más complejo y costoso.
Mayor aprovechamiento de vientos fuertes debido a su altura.	Necesidad de un sistema de direccionamiento que oriente la turbina en el sentido del viento.
Eficiencia en la producción de energía.	Requiere de dispositivo de frenado en los vientos fuertes.

Partes de una turbina eólica de tipo HAWT

Para la realización de este trabajo se decidió utilizar la turbina HAWT, debido a que en la actualidad son las turbinas más comúnmente usadas.

En la Fig. 2.4 se muestran las partes principales de una turbina eólica tipo horizontal.

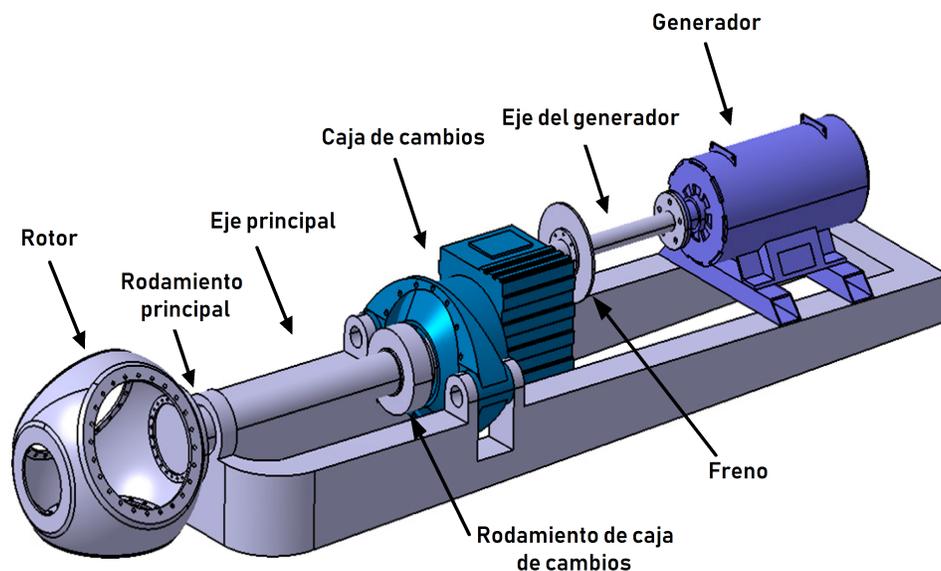


Fig. 2.4. Partes de una turbina eólica

A continuación, se detallan los principales elementos de una turbina eólica:

- **Hélices:** Parte esencial de la turbina que recibe directamente la energía cinética del viento, generalmente diseñado para aprovechar al máximo esta energía.
- **Rotor:** Está compuesto por las hélices y el eje principal.
- **Caja de cambios o caja de transmisión:** La potencia se transfiere mediante el eje principal a una serie de engranes que aumentan la baja velocidad de rotación y alta potencia del eje principal, en una velocidad de giro adecuada para el funcionamiento del motor a costa de potencia.
- **Generador:** Parte encargada de convertir la energía mecánica de giro producida por el rotor en energía eléctrica.
- **Controlador de la turbina eólica:** Monitorea las condiciones del viento y controla el mecanismo de orientación de las hélices de tal forma que se aproveche al máximo la fuerza del viento y también evitar daños a la turbina ante grandes velocidades.

2.2. Sistemas Takagi Sugeno

Los sistemas lineales e invariantes en el tiempo (LTI por sus siglas en inglés *Linear time-invariant*) han sido ampliamente utilizados en el campo de los sistemas de control. Gracias a las propiedades de estos sistemas hacen que el análisis de observadores y controladores, sea más sencillos, debido a que, existen métodos y algoritmos bien establecidos para sus diseños (Lendek *y col.*, 2011).

El modelo difuso Takagi Sugeno (TS), consiste de una regla base *if – then*, la cual representa relaciones lineales de entradas y salidas de un sistema no lineal (Wang *y col.*, 1996).

La principal característica de un modelo TS es expresar la dinámica local de cada implicación difusa por un modelo afín o lineal, válido dentro de la región definida. El modelo difuso global se consigue mediante una combinación de los modelos locales lineales.

2.2.1. Representación TS

Considerando un sistema no lineal como

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) \\ y(t) &= h(x(t)) \end{aligned} \quad (2.1)$$

donde f es la función de estados que describe la evolución de las variables de estado a través del tiempo, h es la función de medición que relaciona a las variables de estado medidas, $x(t)$ es el vector de variables de estado, $u(t)$ es el vector de entradas, $y(t)$ es el vector de salidas; todos estos vectores con dimensiones apropiadas.

Un sistema TS que representa o aproxima al sistema no lineal (2.1), es expresado con un conjunto de i -ésimas reglas que se describen como:

Modelo de regla i -ésima:

Si $z_1(t)$ es M_1^i y ... $z_p(t)$ es M_p^i entonces

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t), \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (2.2)$$

donde z_j , $j = 1, 2, \dots, p$, representan las variables de programación y p es el número de variables de programación, las cuales de acuerdo a su valor determinan el grado en que las reglas son activadas; M_j^i es el conjunto difuso y $r = 2^p$ es el número de reglas; $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de entrada, $y(t) \in \mathbb{R}^q$ es el vector de salida, $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ y $C_i \in \mathbb{R}^{q \times n}$; cada ecuación lineal representado por $A_i x(t) + B_i u(t)$ es llamado un "subsistema". Las variables de programación son usualmente escogidas como un subconjunto de estados, entradas, salidas, u otras variables exógenas en el sistema.

El valor de las variables de programación z_j , que pertenece a un conjunto difuso M_j^i , es dado por el valor verdadero de una función de pertenencia $\omega_{ij} : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$. Para la obtención del valor

verdadero, se utiliza el operador de conjunción *mínimo*.

$$\varphi_i(z) = \min_j \{\omega_{ij}(z_j)\} \quad (2.3)$$

o del producto algebraico

$$\varphi_i(z) = \prod_{j=1}^p \omega_{ij}(z_j) \quad (2.4)$$

El valor verdadero obtenido es normalizado obteniendo así

$$\omega_i(z) = \frac{\varphi_i(z)}{\sum_{j=1}^r \varphi_j(z)} \quad (2.5)$$

Asumiendo que $\sum_{j=1}^r \varphi_j(z) \neq 0$, entonces para cualquier combinación permitida de las variables de programación, al menos una regla tiene un valor de verdad mayor a cero. La expresión $w_i(z)$ se conoce como la función de pertenencia normalizada, es decir, $\omega_i(z) \geq 0$ y $\sum_{i=1}^r \omega_i(z) = 1$.

Con lo anterior, el sistema TS se representa como

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^r \omega_i(z) (A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) &= \sum_{i=1}^r \omega_i(z) C_i x(t) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Concluyendo un sistema TS es la sudatoria de la interpolación de i modelos locales, logrando describir propiedades no lineales, pero desde un enfoque lineal.

2.2.2. Modelado de sistemas TS

Existen diferentes métodos para obtener un sistema TS a partir de un sistema no lineal, tal como linealización (Johansen *y col.*, 2000; Marcos y Balas, 2004), enfoque de sector no lineal (Tanaka y Ohtake, 2001), transformación de espacio de estados (Shamma y Cloutier, 1993) e identificación (Tóth, 2010). Sin embargo, el enfoque de sector no lineal y linealización son los más considerados en estas áreas, tales métodos se detallan a continuación.

Linealización

Este método es usado para obtener un sistema TS que se aproxime al comportamiento dinámico de un modelo no lineal (Johansen *y col.*, 2000). La linealización se realiza en expansiones de las series de Taylor en diferentes puntos representativos, los cuales pueden o no pueden ser puntos de equilibrio (Lendek *y col.*, 2011).

La aproximación se obtiene por un conjunto de r reglas de la forma

Modelo de regla i -ésima:

Si $z_1(t)$ es M_1^i y..... $z_p(t)$ es M_p^i entonces

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) &= C x(t)\end{aligned}\tag{2.7}$$

o equivalente a un modelo TS de la forma

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^r \omega_i(z) (A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) &= C x(t)\end{aligned}\tag{2.8}$$

donde A_i , B_i , C_i son matrices de espacio de estados de los modelos locales lineales, los cuales son obtenidos evaluando las matrices Jacobianas en el i -ésimo punto de linealización p_i , tal como

$$A_i = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \right|_{p_i} \quad B_i = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \right|_{p_i}\tag{2.9}$$

Las variables de desviación debidas a la linealización pueden ser agregados como

$$a_i = f(x, u)|_{p_i} - (A_i x)|_{p_i} - (B_i u)|_{p_i}\tag{2.10}$$

Al aumentar el número de puntos de linealización, la precisión de la aproximación de los modelos difusos aumenta. Para conseguir el modelo TS de la forma (2.8), las funciones de pertenencia de cada regla son obtenidas como se muestra en (2.4) y normalizados utilizando la ecuación (2.5).

Sector no lineal

El método mediante el enfoque de sector no lineal es uno de los más utilizados para la construcción de modelos TS (Tanaka y Ohtake, 2001).

Las variables de programación son escogidas tal que $z_j \in [\underline{n}_j, \bar{n}_j]$, $j = 1, 2, \dots, p$, donde z_j representa el término no lineal o función diferenciable definido en un conjunto compacto, \underline{n}_j y \bar{n}_j son los valores mínimo y máximo, respectivamente, de z_j . Por cada z_j se utilizan dos funciones de ponderación

$$\eta_0^j(z_j) = \frac{\bar{n}_j - z_j}{\bar{n}_j - \underline{n}_j}, \quad \eta_1^j(z_j) = 1 - \eta_0^j \quad (2.11)$$

Estas funciones de ponderación son normalizadas, es decir $\eta_0^j(z_j) \geq 0$, $\eta_1^j(z_j) \leq 0$, y $\eta_0^j(z_j) + \eta_1^j(z_j) = 1$, para cualquier valor de z_j . También, z_j puede ser expresado como $z_j = \underline{n}_j \eta_0^j(z_j) + \bar{n}_j \eta_1^j(z_j)$.

Los conjuntos difusos correspondientes a ambas funciones de ponderación son definidos en $[\underline{n}_j, \bar{n}_j]$. Estos conjuntos difusos son expresados como \bar{M}_0^j y \bar{M}_1^j . Las reglas del sistema TS tienen la forma:

Modelo de regla i -ésima:

Si $z_1(t)$ es M_1^i y ... $z_p(t)$ es M_p^i entonces

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t), \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (2.12)$$

donde M_j^i , $i = 1, 2, \dots, r$, $j = 1, 2, \dots, p$, puede ser \bar{M}_0^j o \bar{M}_1^j . Consecuentemente, el sistema TS consiste de $r = 2^p$ reglas. La función de pertenencia de la regla i -ésima es calculada como el producto de las funciones de ponderación que corresponde a cada conjunto difuso de su respectiva regla,

$$\omega_i(z) = \prod_{j=1}^r \omega_{ij}(z_j) \quad (2.13)$$

donde $\omega_{ij}(z_j)$ es η_0^j o η_1^j , dependiendo de qué función de ponderación es usada en la regla. Con la construcción de las funciones de ponderación, las funciones de pertenencia son normalizadas, tal

que

$$0 \leq \omega_i(z) \leq 1, \quad \sum_{i=1}^r \omega_i(z) = 1 \quad (2.14)$$

Por último, un sistema dado en (2.12) es obtenido por la evaluación de las matrices de espacio de estados en los sectores escogidos $\underline{n} < z(t) < \bar{n}$.

2.3. Conceptos básicos de observadores

En el diseño de sistemas de control, en ciertas ocasiones resulta necesario estimar el valor de algunas variables de estado que no se encuentran disponibles para su retroalimentación. A la estimación de las variables de estados no medibles se le denomina observación. El programa de computadora o dispositivo que realiza dicha estimación de las variables de estado se le conoce como observador de estados, o simplemente observador (Ogata y Yang, 2010).

El objetivo de un observador de estados es estimar los estados y/o parámetros a partir de las mediciones de entradas y salidas del sistema. Regularmente los observadores son basados en modelos matemáticos los cuales describen el comportamiento dinámico de determinado sistema, por lo general dicho modelo tiene una representación en espacio de estados.

En la Fig. 2.5 se presenta el esquema de un observador donde se muestra que el observador depende únicamente de las entradas y salidas medidas para estimar las variables de estado del sistema.

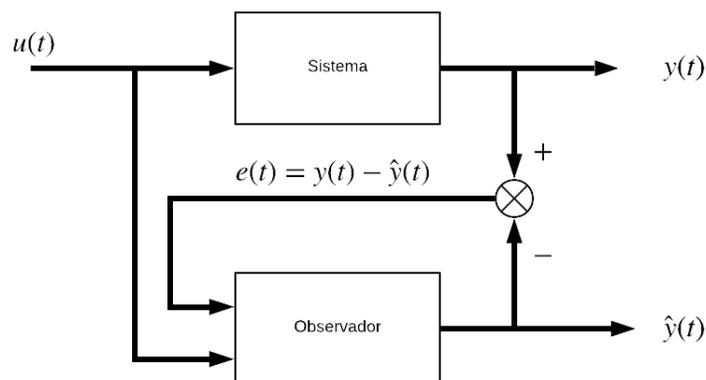


Fig. 2.5. Esquema de observador de estados

Los observadores son usados para varios propósitos como lo son el monitoreo, diagnóstico de fallas o también en tareas de control como regulación o seguimiento de trayectoria convirtiéndose así en una de las principales formas de resolver los problemas de la ingeniería.

2.3.1. Observabilidad

La observabilidad es la posibilidad de estimar los estados desde el conocimiento de sus entradas y salidas. Considerando un sistema LTI de la siguiente forma

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax + Bu \\ y(t) &= Cx + Du\end{aligned}\tag{2.15}$$

Donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de entrada, $y(t) \in \mathbb{R}^q$ es el vector de salida, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$ y $D \in \mathbb{R}^{q \times m}$ son matrices constantes del sistema.

Definición: *Un sistema es observable si existe un tiempo finito T tal que, dada una entrada u , el valor inicial $x(0)$ puede ser determinado a partir de la historia de observación de $y(t)$.*

En la ecuación (2.16) se muestra la matriz de observabilidad.

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}\tag{2.16}$$

Si la matriz de observabilidad es de rango n significa que el sistema es observable y es posible estimar todos los estados del sistema.

2.4. Conceptos sobre fallas

En general una falla se refiere a cualquier tipo de mal funcionamiento o desviación no esperada en algún elemento del sistema, lo que conduce a un mal funcionamiento.

Una falla causa un cambio en las características de un componente en su operación o desempeño. Una avería inhabilita al sistema o a un componente para continuar con su función. Esto significa que con una falla es posible continuar con la operación del sistema en un rango determinado. Sin embargo la avería no permite continuar con dicho funcionamiento (Blanke *y col.*, 2006).

Las fallas se pueden clasificar de acuerdo a su forma (Verde *y col.*, 2013):

- **Falla abrupta:** La falla se manifiesta con un cambio repentino y puede ser modelada mediante una función tipo escalón donde se desconoce el tiempo de ocurrencia. Se puede observar en Fig. (2.6 (a)).
- **Falla incipiente:** Esta falla se manifiesta como un cambio en magnitud en las variables del sistema que va aumentando paulatinamente con respecto al tiempo y puede modelarse mediante una función tipo rampa con un tiempo de ocurrencia desconocido. Se puede observar en Fig. (2.6 (b)).
- **Falla intermitente** Este tipo de falla se considera que no tiene una evolución determinada en el tiempo y frecuentemente se presenta solamente en ciclos de trabajo de manera aleatoria y desaparece también de la misma forma. Se puede observar en Fig. (2.6 (c)).

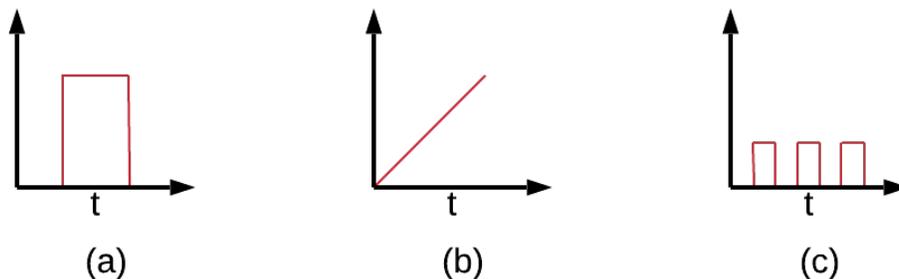


Fig. 2.6. Tipos de fallas según su forma

Ahora bien, para evaluar si las salidas de un modelo analítico se ven afectadas por las fallas, se requiere suponer cómo afectan las fallas al modelo. Dicho esto, podemos clasificar también las fallas en dos grupos (Isermann, 2006):

- **Aditiva:** Estas fallas suponen entradas adicionales al sistema, con cualquier tipo de evolución

temporal. Por ejemplo, considerando el modelo de un sistema LTI representado en espacio de estados (2.17).

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\tag{2.17}$$

Una falla aditiva $f_a(t)$ afecta al sistema de la forma (2.18), donde tal la señal $f_a(t)$ modela la falla.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + f_a(t)\end{aligned}\tag{2.18}$$

- **Multiplicativa:** Estas fallas se considera que afectan la manera multiplicativa algunas de las variables ya sea de estados, entradas, salidas o parámetros del sistema. Considerando nuevamente el sistema LTI de la ecuación (2.17), una falla multiplicativa $f_m(t)$ puede tomar dos formas tal como en la ecuación (2.19 (a)) donde denota que la acción no es correcta, o la forma (2.19 (b)) para denotar que el componente C esta averiado.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) & \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= C(x(t)f_m(t)) \quad \text{(a),} & y(t) &= (C + f_m(t))x(t) \quad \text{(b)}\end{aligned}\tag{2.19}$$

En términos de subsistemas es posible clasificar fallas dependiendo de donde están presentes. Dicho esto, las fallas se pueden ocurrir en sensores, actuadores o en componentes del sistema.

2.5. Detección y diagnóstico de fallas

El diagnóstico de fallas en un proceso dinámico es una técnica encargada de detectar la presencia de fallas o comportamientos anormales en el proceso, encargándose a su vez de localizar el componente o la causa que originó dicha anomalía. En la literatura se considera que existen tres objetivos del diagnóstico de fallas (Blanke *y col.*, 2006):

- **Detección de la falla:** Decisión de si existe o no una falla, así como la determinación de su instante de aparición.
- **Localización de la falla:** Localización del componente en el cual se ha producido la falla.

- **Identificación o estimación de la falla:** Identificación del tipo de falla y estimación de su magnitud.

La base del diagnóstico de fallas es la información disponible de las señales de entrada y salida del proceso. En la Fig. 2.7 se muestra un esquema general del diagnóstico de fallas con sus tres objetivos.

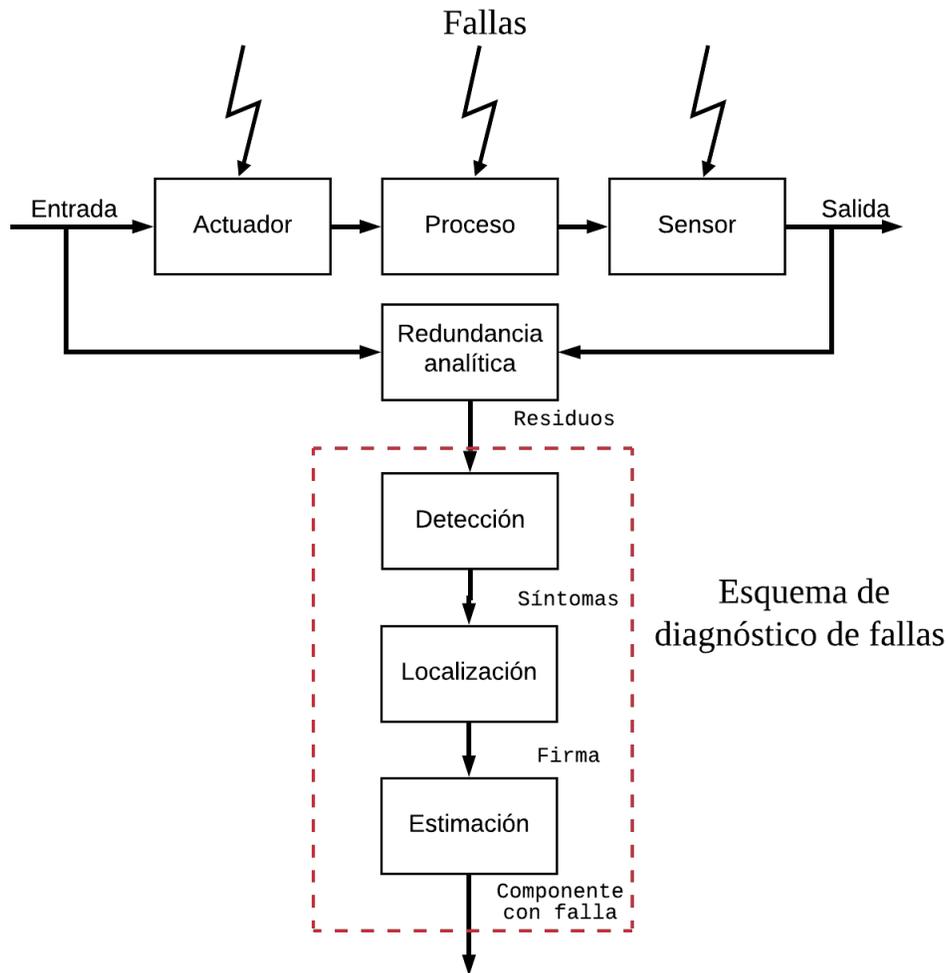


Fig. 2.7. Esquema general de diagnóstico de fallas

2.5.1. Diagnóstico de fallas basado en modelos

El diagnóstico de fallas puede clasificarse en dos grupos: los que se basan en un modelo matemático del sistema y los que no lo hacen.

La redundancia física es un método del grupo que no utiliza modelo matemático. Éstos, utilizan varias líneas de sensores, actuadores, computadoras y software para medición y control de una variable en particular (Chen y Patton, 2012). El problema de estos métodos de diagnóstico es el costo de equipos adicionales, así como el costo de mantenimiento de los mismos, además, el espacio requerido para acomodarlos. Debido a este problema, los esquemas de diagnóstico de fallas basado en modelo son utilizados ampliamente en la industria. La redundancia analítica es un método del diagnóstico de fallas basado en modelo matemático.

La Fig. 2.8 muestra los conceptos de redundancia física y redundancia analítica.

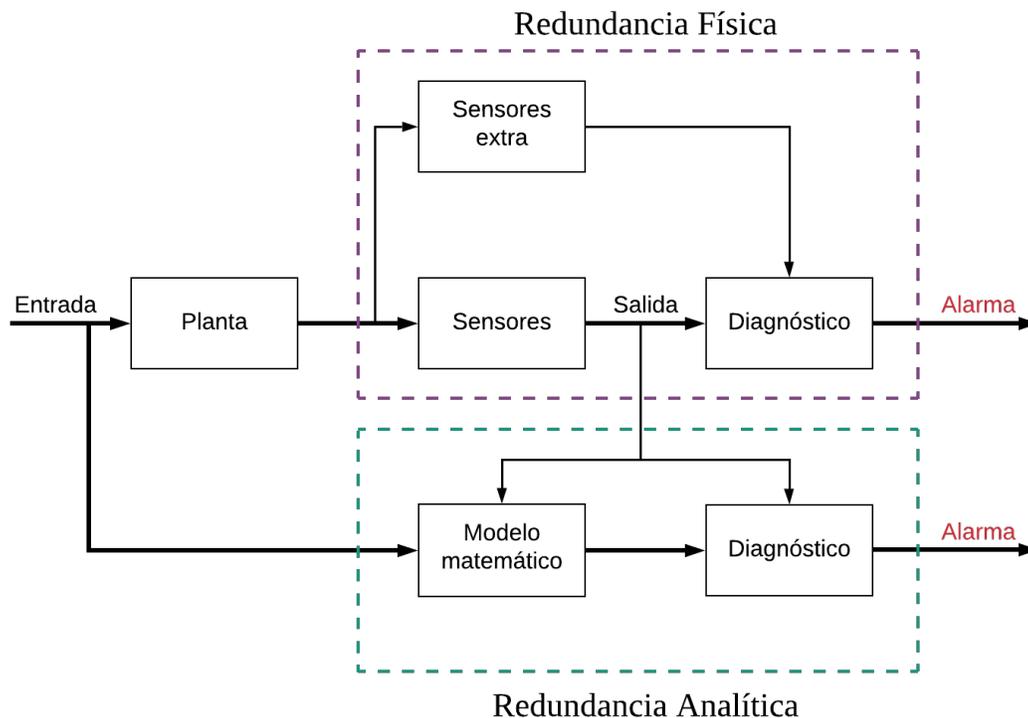


Fig. 2.8. Esquema de redundancia física y redundancia analítica

Los métodos de diagnóstico más utilizados son los de redundancia analítica basándose en la generación de residuos.

Cuando las características dinámicas de cierto sistema o proceso son conocidas con una precisión razonable, se utiliza la información disponible de las señales de entrada y salida del sistema para alimentar un observador de estados y de esta forma generar una estimación de los estados. A la diferencia entre los estados medidos y los estimados se les llama residuos, que son señales que se les da una interpretación cero en ausencia de falla y diferente de cero cuando se presenta una falla.

Sin embargo, en la práctica, el ruido y los errores de modelado ocasionan que los residuos no sean cero incluso en un caso libre de fallas. Por lo tanto, para evaluar los residuos y determinar si existe una falla o no se utilizan umbrales, los cuales, consisten en definir un valor a partir del cual se puede considerar a un residuo, residuo fallado. Los umbrales se clasifican como (Chen y Patton, 2012):

- **Umbral constante:** El valor del umbral permanece sin variaciones en todas las fases de operación del sistema.
- **Umbral adaptable:** El valor del umbral modifica su valor en cada fase de operación del sistema o cuando las condiciones de operación del sistema cambian.

Capítulo 3

Caso de estudio

La organización del capítulo es la siguiente: En la sección 3.1 de este capítulo se expone una breve introducción referente al benchmark de la turbina eólica, así como, la descripción de la turbina, sus consideraciones, una pequeña explicación del funcionamiento general y la parametrización de la misma. La sección 3.2 describe que el modelo de hélices y sistema de pitch es la combinación del modelo de la aerodinámica de la turbina, representado por una ecuación diferencial y el modelo del sistema hidráulico de pitch, modelado como una función de transferencia de lazo cerrado. En la sección 3.3 se muestran las ecuaciones diferenciales que describen la dinámica de la caja de transmisión, así como una tabla con los parámetros utilizados.

La sección 3.4 presenta la potencia generada representada por una ecuación diferencial y la dinámica del generador y convertidor modelado mediante una función de transferencia de primer orden, así como todos los parámetros utilizados. En la sección 3.5 se muestran las zonas de control en las que trabaja la turbina eólica, así como, los modos de control y los parámetros utilizados. En la sección 3.6 es representada la caja de transmisión de una turbina eólica en forma de espacio de estados, así como las sustituciones correspondientes para contener la no linealidad de la forma que se requiere. Por último, en la sección 3.7 se muestra el desarrollo de la metodología a seguir para conseguir la representación TS de la caja de transmisión y se hace una comparación del sistema no lineal contra el sistema TS.

3.1. Benchmark de la turbina eólica

Este benchmark describe el modelo de una turbina eólica genérica de tres hélices y velocidad variable, a su vez el acoplamiento a gran escala de un convertidor. Esta turbina tiene una potencia nominal de 4.8MW. El benchmark está descrito de una manera simple, en consecuencia, se realizaron algunas simplificaciones y suposiciones. Como que las hélices y la torre se consideran rígidas y la aerodinámica se describe mediante un modelo estático. A su vez, el controlador de la turbina eólica es simple, sin embargo, controla la turbina con un rendimiento aceptable.

En general, el funcionamiento de una turbina eólica comienza con el viento ejerciendo presión sobre las hélices, lo que obliga girar al rotor. De esta forma, la energía cinética del viento se convierte en energía mecánica. Esta energía se puede controlar modificando el ángulo de inclinación de las hélices o controlando la rotación del rotor en relación a la velocidad del viento. Por último, la energía mecánica se convierte en energía eléctrica por medio de un generador acoplado a un convertidor. Para cambiar la velocidad de rotación del rotor al generador, se utiliza una caja de transmisión que se encuentra entre el rotor y el generador (Odgaard *y col.*, 2013).

En la Fig. 3.1 se puede ver una descripción general del sistema, mostrando la relación entre cada subsistema de la turbina eólica.

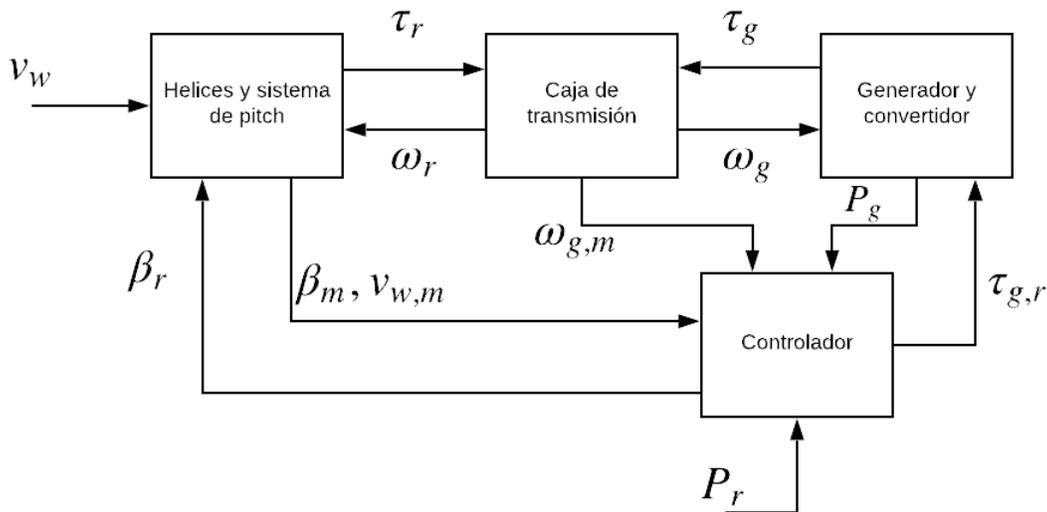


Fig. 3.1. Diagrama de la turbina eólica por sub-sistemas

En la Tabla 3.1 se definen los parámetros.

Tabla 3.1. Parámetros de la turbina eólica por sub-sistemas.

Variable	Definición	Variable	Definición
v_w	Velocidad del viento	$v_{w,m}$	Velocidad del viento medida
τ_r	Torque del rotor	ω_g	Velocidad angular del generador
τ_g	Torque del generador	$\tau_{g,r}$	Torque del generador de referencia
ω_r	Velocidad angular del rotor	β_r	Ángulo de referencia de inclinación de las hélices
$\omega_{g,m}$	Velocidad angular del generador medida	β_m	Ángulo de inclinación de las hélices medida
P_g	Potencia generada	P_r	Potencia de referencia

3.2. Modelo de las hélices y el sistema de pitch

El modelo de hélices y sistema hidráulico de pitch es la combinación del modelo de la aerodinámica de la turbina y el modelo del sistema de pitch.

Modelo de la aerodinámica de la turbina eólica

La aerodinámica de la turbina eólica es modelada como un torque actuando sobre las hélices. Dicho torque es expresado en la ecuación (3.1).

$$\tau_r(t) = \frac{\rho\pi R^3 C_q(\lambda(t), \beta(t)) v_w(t)^2}{2} \quad (3.1)$$

donde ρ es la densidad del aire, R el radio de las hélices, v_w la velocidad del viento, C_q el coeficiente del torque dependiente de λ que es la relación velocidad punta y β que es el ángulo de inclinación de las hélices. Los valores a los parámetros antes mencionados se encuentran en la Tabla 3.2.

Cabe mencionar que la ecuación (3.1) se utiliza asumiendo que el ángulo de inclinación (β) es el mismo para todas la hélices. Para este caso el número de hélices es tres, por lo tanto, el torque

aerodinámico de cada hélice es igual al tercio del torque aerodinámico total de la turbina. Esta relación se puede expresar en la ecuación (3.2).

$$\tau_r(t) = \frac{\rho\pi R^3 C_q(\lambda(t), \beta_i(t)) v_{w,i}(t)^2}{6}, \quad i \in \{1, 2, 3\} \quad (3.2)$$

donde i y denota el número de la hélice.

Modelo del sistema hidráulico de pitch

El modelo del sistema hidráulico de pitch se modela como una función de transferencia en lazo cerrado entre el ángulo de inclinación medido (β_m) y el ángulo de inclinación de referencia (β_r), el cual es proporcionado por el controlador de la turbina eólica. El ángulo de inclinación de referencia (β_r) es la entrada de la función de transferencia y el ángulo de inclinación (β_m) es la salida. El actuador del sistema de pitch es un servo sistema de pistón y en teoría, se puede modelar mediante una función de transferencia de segundo orden, expresada en la ecuación (3.3).

$$\frac{\beta_m(s)}{\beta_r(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.3)$$

donde ω_n es la frecuencia natural y ξ es la relación de amortiguación. Los valores de los parámetros antes mencionados se encuentran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros usados en el modelo de hélices y sistema de pitch.

Símbolo	Definición	Valor
R	Radio de la hélice	$57.5m$
ρ	Densidad del aire	$1.225kg/m^3$
ξ	Relación de amortiguación	0.6
ω_n	Frecuencia natural	$11.11rad/s$
C_q	Coefficiente de torque	–
λ	Relación velocidad punta	–

3.3. Modelo de la caja de transmisión

El propósito de la caja de transmisión es transferir el torque del rotor al generador. Incluye una caja de engranajes que aumenta la velocidad de rotación desde el lado del rotor de baja velocidad hasta el lado del generador de alta velocidad. En el benchmark, Odgaard modeló la caja de transmisión por un modelo de dos masas. Representado por las ecuaciones diferenciales (3.4).

$$\begin{aligned}
 J_r \dot{\omega}_r(t) &= \tau_r(t) - K_{dt} \theta_{\Delta}(t) - (B_{dt} + B_r) \omega_r(t) + \frac{B_{dt}}{N_g} \omega_g(t) \\
 J_g \dot{\omega}_g(t) &= \frac{\eta_{dt} K_{dt}}{N_g} \theta_{\Delta}(t) + \frac{\eta_{dt} B_{dt}}{N_g} \omega_r(t) - \left(\frac{\eta_{dt} B_{dt}}{N_g^2} + B_g \right) \omega_g(t) - \tau_g(t) \\
 \dot{\theta}_{\Delta}(t) &= \omega_r(t) - \frac{1}{N_g} \omega_g(t)
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

donde θ_{Δ} es el ángulo de torsión de la caja de transmisión, ω_r es la velocidad angular del rotor, ω_g es la velocidad angular del generador, B_{dt} es el coeficiente de amortiguación del torque, B_g es la amortiguación externa del generador, K_{dt} es la rigidez a la torsión, J_g es el momento de inercia del generador, B_r es la amortiguación externa del rotor, N_g es la relación de transmisión, η_{dt} es la eficiencia de la caja de transmisión y J_r es el momento de inercia del motor. Todos los valores de los parámetros mencionados anterior mente se encuentra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Parámetros usados en el modelo de la caja de transmisión.

Símbolo	Definición	Valor
B_{dt}	Coeficiente de amortiguación del torque	$775.49 \frac{Nms}{rad}$
B_r	Amortiguación externa del rotor	$7.11 \frac{Nms}{rad}$
B_g	Amortiguación externa del generador	$45.6 \frac{Nms}{rad}$
N_g	Relación de transmisión	95
K_{dt}	Rigidez a la torsión	$2.7 \times 10^9 \frac{Nm}{rad}$
η_{dt}	Eficiencia de caja de transmisión	0.97
J_g	Momento de inercia del generador	$390 kg \cdot m^2$
J_r	Momento de inercia del motor	$55 \times 10^6 kg \cdot m^2$

3.4. Modelo del generador y convertidor

La dinámica del generador y convertidor se puede modelar mediante la función de primer orden mostrada en la ecuación (3.5)

$$\frac{\tau_g(s)}{\tau_{g,r}(s)} = \frac{\alpha_{gc}}{s + \alpha_{gc}} \quad (3.5)$$

donde α_{gc} es un parámetro del generador y el convertidor y su valor se muestra en la Tabla 3.4. La potencia generada está representada por la ecuación (3.6).

$$P_g(t) = \eta_g \omega_g(t) \tau_g(t) \quad (3.6)$$

donde η_g es la eficiencia del generador y su valor se encuentra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Parámetros usados en el modelo del generador y convertidor.

Símbolo	Definición	Valor
α_{gc}	Parámetros de generador y convertidor	$50 \frac{rad}{s}$
η_g	Eficiencia del generador	0.98

3.5. Controlador de la turbina eólica

El controlador de la turbina eólica opera en cuatro zonas dependiendo de la velocidad del viento dentro de un lapso de tiempo. Estas zonas de control se pueden observar en la Fig. 3.2. En la zona 1 la turbina se encuentra parada; en la zona 2 se optimiza la producción de energía; en la zona 3 la producción de energía es constante; la zona 4 es de vientos fuertes. En la zona 4, para evitar daños a la estructura de la turbina se modifican los ángulos de inclinación de las hélices para detener la rotación y la producción de energía. Tanto en el benchmark como en este trabajo de tesis se excluyen las zonas 1 y 4, debido a que el propósito es detectar fallas en operaciones nominales, que están cubiertas por las zonas 2 y 3.

Cuando la turbina alcanza la referencia de potencia referencia (P_r), el controlador cambia a la zona 3. El objetivo de control en esta zona es mantener la referencia de potencia. Para lograr dicho objetivo se modifica el ángulo de inclinación de referencia (β_r), de modo que el coeficiente de potencia disminuya.

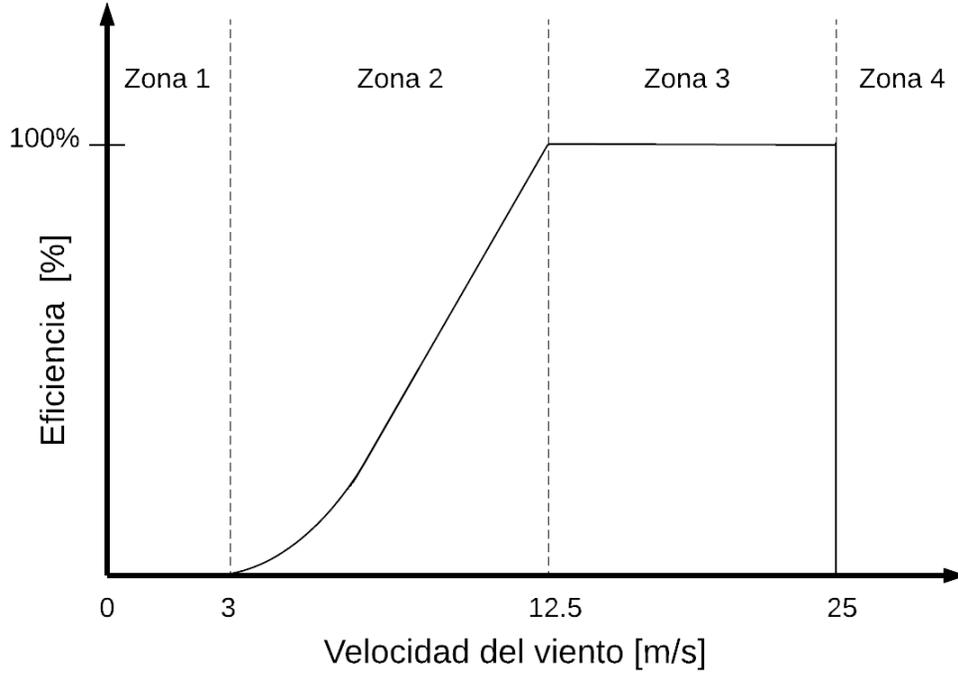


Fig. 3.2. Zonas de control

El controlador está implementado en tiempo discreto, con una frecuencia de muestreo de 100 Hz. Las variables dependientes del tiempo en el controlador se denotan como variables de tiempo discreto $[n]$.

Las zonas 2 y 3, corresponden a los modos de control 1 y 2. El controlador inicia en modo 1. El cual conmuta al modo 2 si se cumple la condición de la ecuación

(3.7)

$$P_g[n] \geq P_r[n] \vee \omega_g[n] \geq \omega_{nom} \quad (3.7)$$

donde ω_{nom} es la velocidad angular nominal del generador. El modo de control conmuta del 2 al 1 si se cumple la condición de la ecuación (3.8)

$$\omega_g[n] < \omega_{nom} - \omega_{\Delta} \quad (3.8)$$

donde ω_Δ es un pequeño offset extraído de la velocidad angular nominal del generador para introducir cierta histéresis en el esquema del conmutador y de esta forma evitando que los modos de control conmuten todo el tiempo.

Para ambos modos de control, los controladores imponen el torque de referencia del generador ($\tau_{g,r}[n]$) y el ángulo de inclinación de referencia de las hélices ($\beta_r[n]$). Las leyes de control en los dos modos de control se describen como:

- Modo de control 1:** El valor óptimo de λ se denomina λ_{opt} y es el punto óptimo de la eficiencia de la transferencia de la energía cinética del viento a la energía mecánica. El cual depende de λ y β . Este valor óptimo se encuentra ajustando el ángulo de inclinación de referencia a cero ($\beta_r[n] = 0$) y el torque de referencia del generador ($\tau_{g,r}$) de la siguiente forma:

$$\tau_{g,r}[n] = K_{opt} \left(\frac{\omega_g[n]}{N_g} \right)^2 \quad (3.9)$$

donde

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \rho A R^3 \frac{Cp_{max}}{\lambda_{opt}^3} \quad (3.10)$$

Siendo la A el área barrida por las hélices de la turbina, ρ la densidad del aire y Cp_{max} el valor máximo del coeficiente de potencia.

- Modo de control 2:** En este modo, el sistema de pitch maneja las principales acciones de control utilizando un controlador PI que intenta mantener $\omega_g[n]$ en ω_{nom}

$$\beta_r[n] = \beta_r[n-1] + k_p e[n] + (k_i T_s - k_p) e[n-1] \quad (3.11)$$

donde $e[n] = \omega_g[n] - \omega_{nom}$. En este caso, el torque de referencia del generador es usado para suprimir perturbaciones rápidas

$$\tau_{g,r}[n] = \frac{P_r[n]}{\eta_{gc} \cdot \omega_g[n]} \quad (3.12)$$

En la Tabla 3.5 se muestran los valores de los parámetros anteriormente mencionados.

Tabla 3.5. Parámetros usados en el controlador.

Símbolo	Definición	Valor
K_{opt}	Ganancia óptima	1.2171
P_r	Potencia de referencia	$4.8 \times 10^6 \text{W}$
K_p	Ganancia proporcional del controlador	4
K_i	Ganancia integral del controlador	1
ω_{Δ}	Offset de la velocidad nominal del generador	$15 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
ω_{nom}	Velocidad nominal del generador	$162 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

3.6. Modelo no lineal de la caja de transmisión

La caja de transmisión es representada en la ecuación (3.4) como ecuaciones diferenciales. Sin embargo, otra forma de representar la caja de transmisión en forma de espacio de estados, tal como se muestra en la ecuación (3.13).

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t, \lambda, \beta, v_w) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3.13)$$

donde $x(t) = [\omega_r(t) \ \omega_g(t) \ \theta_{\Delta}(t)]^T$ es el vector de estados, $y(t) = [\omega_r(t) \ \omega_g(t)]^T$ es el vector de salidas y $u(t, \lambda, \beta, v_w) = [\tau_r(t, \lambda, \beta, v_w) \ \tau_g(t)]^T$ es el vector de entradas.

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_r(t) \\ \dot{\omega}_g(t) \\ \dot{\theta}_{\Delta}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-B_{dt}-B_r}{J_r} & \frac{B_{dt}}{N_g J_r} & -\frac{K_{dt}}{J_r} \\ \frac{\eta_{dt} B_{dt}}{N_g J_g} & -\frac{\eta_{dt} B_{dt}}{N_g^2 J_g} - \frac{B_g}{J_g} & \frac{\eta_{dt} K_{dt}}{N_g J_g} \\ 1 & -\frac{1}{N_g} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_r(t) \\ \omega_g(t) \\ \theta_{\Delta}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{J_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_g} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_r(t, \lambda, \beta, v_w) \\ \tau_g(t) \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

donde τ_r es

$$\tau_r = \frac{\rho \pi R^3 C_q(\lambda(t), \beta(t)) v_w(t)^2}{2} \quad (3.15)$$

Se puede observar que la no linealidad se encuentra en el vector de entrada, para fines de detección y localización de fallas es necesario colocar la no linealidad en una de las matrices del sistema.

Entonces, si consideramos v_w como entrada, la no linealidad queda en la matriz B como se muestra en la ecuación (3.16).

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_r(t) \\ \dot{\omega}_g(t) \\ \dot{\theta}_\Delta(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-B_{dt}-B_r}{J_r} & \frac{B_{dt}}{N_g J_r} & -\frac{K_{dt}}{J_r} \\ \frac{\eta_{dt} B_{dt}}{N_g J_g} & -\frac{\eta_{dt} B_{dt}}{N_g^2 J_g} - \frac{B_g}{J_g} & \frac{\eta_{dt} K_{dt}}{N_g J_g} \\ 1 & -\frac{1}{N_g} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_r(t) \\ \omega_g(t) \\ \theta_\Delta(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\rho\pi R^3 Cq(\lambda(t), \beta(t)) v_w}{2J_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_g} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_w(t) \\ \tau_g(t) \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

De esta forma es posible utilizar un método de modelado para sistemas TS.

3.7. Modelo Takagi Sugeno de la caja de transmisión

Para obtener la representación TS de la caja de transmisión se retoma el modelo no lineal (3.16) y se identifica la no linealidad como:

$$z(t) = Cq(\lambda(t), \beta(t))v_w(t) \quad (3.17)$$

Para el cálculo de las funciones de ponderación de acuerdo con Lendek *y col.* (2011) se considera que cada variable programada contiene dos vértices. Este conjunto se obtiene al evaluar el sistema no lineal con el fin de conocer su región de operación compacta, en este sistema se tiene $z(t) \in [\underline{z}, \bar{z}]$, donde \underline{z} es el mínimo rango de operación siendo su valor numérico 0.0048 y \bar{z} es el máximo rango de operación siendo su valor numérico 1.0976. Con lo que se obtienen las siguientes funciones de ponderación:

$$\eta_0^1 = \frac{\bar{z} - z(t)}{\bar{z} - \underline{z}}, \quad \eta_1^1 = 1 - \eta_0^1 \quad (3.18)$$

Posteriormente, para calcular la función de pertenencia de la regla i se realiza el producto de las funciones de ponderación que corresponden a los conjuntos difusos en la regla, en este caso por solo haber una no linealidad las funciones de pertenencia son iguales a las funciones de ponderación

$$\omega_1(z(t)) = \eta_0^1 \quad \omega_2(z(t)) = \eta_1^1 \quad (3.19)$$

Debido a que la no linealidad se encuentra en la matriz de entradas B sólo se tendrían las siguientes matrices locales:

$$B_1 = \begin{pmatrix} \frac{\rho\pi R^3 \bar{z}}{2J_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_g} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, B_2 = \begin{pmatrix} \frac{\rho\pi R^3 \underline{z}}{2J_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_g} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

De tal modo que la representación TS de este sistema se expresa como

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax + \sum_{i=1}^r \omega_i(z(t))(B_i u), & \forall i \in \{1, 2\} \\ y(t) &= Cx \end{aligned} \quad (3.21)$$

Cabe mencionar que se está trabajando con datos reales de un benchmark (Odgaard *y col.*, 2013).

Del mismo modo, la velocidad angular del viento $v_w(t)$ es un dato real medido en un parque eólico el cual se puede observar en la Fig. 3.3.

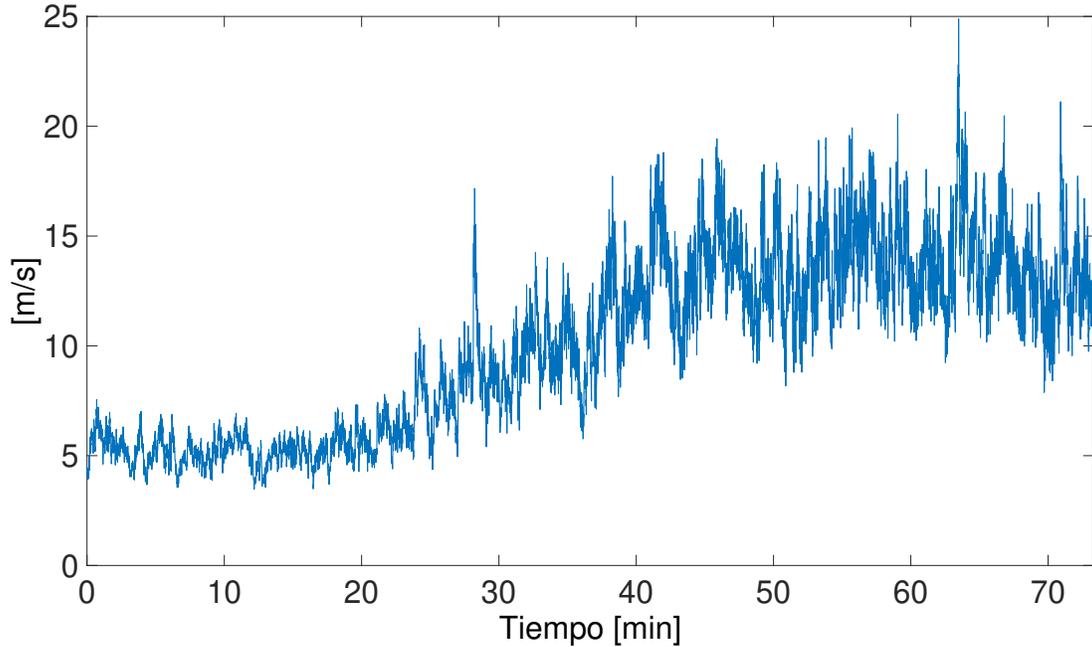


Fig. 3.3. Velocidad del viento, $v_w(t)$.

El torque del generador τ_g es la otra entrada para el sistema de la caja de transmisión. Sin embargo, a diferencia de velocidad del viento v_w esta puede cambiar según el escenario de falla, en la Fig. 3.4 se puede observar el caso cuando está libre de falla.

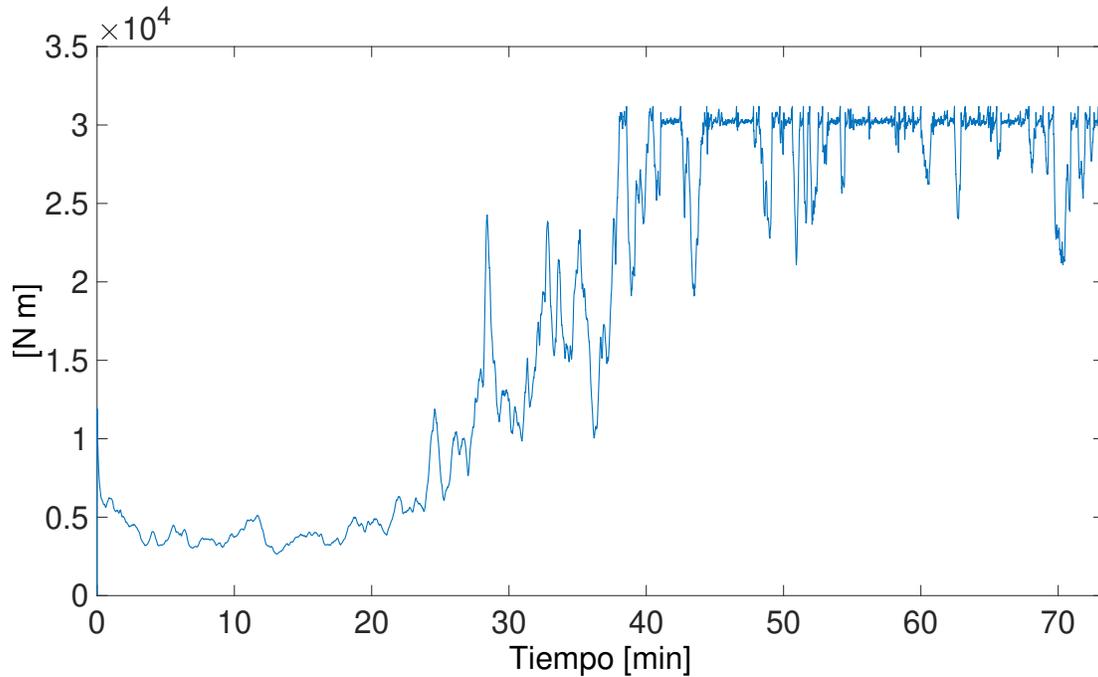


Fig. 3.4. Torque del generador, $\tau_g(t)$.

La potencia generada P_g , al igual que el torque del generador τ_g puede cambiar dependiendo el escenario de falla. Sin embargo, en la Fig. 3.5 se muestra el caso libre de falla.

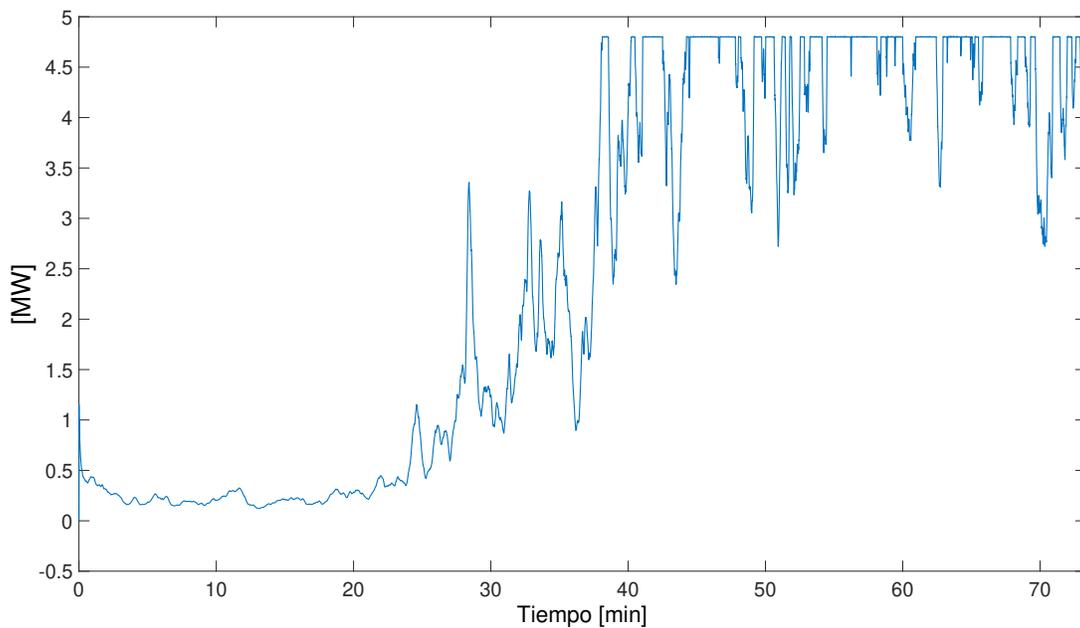


Fig. 3.5. Potencia generada, $P_g(t)$.

En Fig. 3.6 se puede observar la interpolación de las funciones de pertenencia y su sumatoria que siempre debe ser igual a 1.

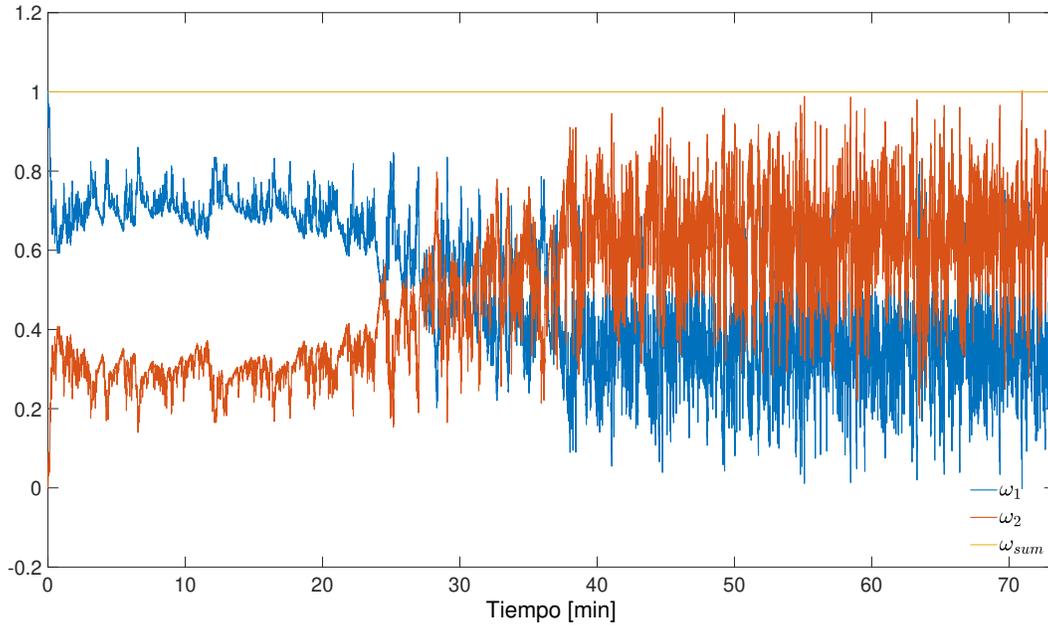


Fig. 3.6. Funciones de pertenencia

En las Fig. 3.7 y 3.8 muestra la comparación del sistema no lineal con el sistema TS de los estados ω_r y ω_g . Se puede observar que ambas representaciones tienen el mismo comportamiento.

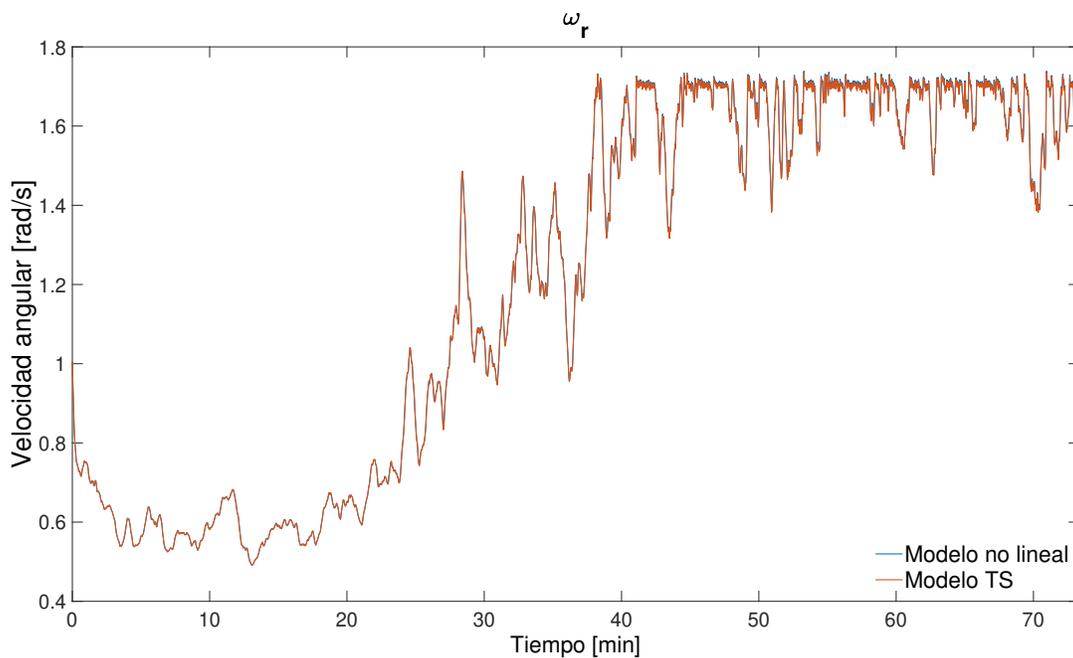


Fig. 3.7. Comparación del sistema no lineal y la representación TS para el primer estado.

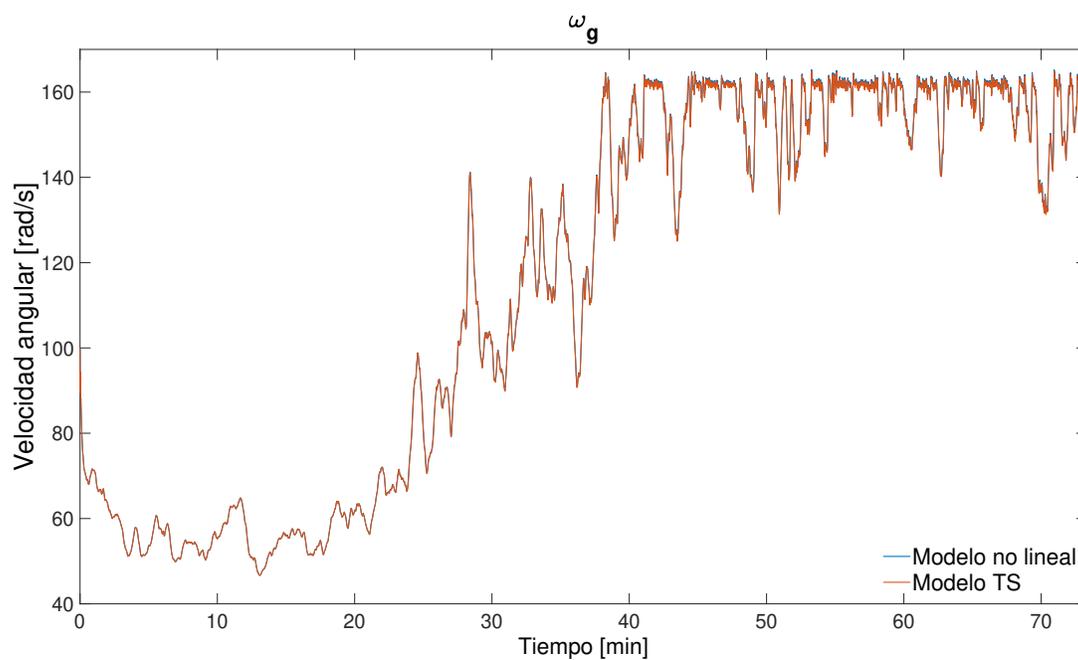


Fig. 3.8. Comparación del sistema no lineal y la representación TS para el segundo estado.

En el Anexo B se simuló el sistema TS de la caja de transmisión, con un perfil de viento ideal, es decir sin fluctuaciones en la velocidad del viento, mostrando resultados interesantes.

Capítulo 4

Diseño del esquema de diagnóstico

Este capítulo presenta el desarrollo del esquema de diagnóstico de fallas a través de sistemas TS sujetos a fallas en sensores. Cabe mencionar que en el Anexo A se presenta otro esquema de diagnóstico de fallas en sensores, utilizando un banco de observadores de tipo (DOS). El inconveniente de ese esquema de diagnóstico es que no permite estimar la magnitud de la falla.

En la sección 4.1 se presenta el diseño de un observador con un enfoque TS y generación de residuos. En la sección 4.1.1 se demuestra la estabilidad del observador propuesto, utilizando el método directo de Lyapunov, presentando las condiciones necesarias para la estabilidad mediante LMIs. La sección 4.1.2 presenta una breve descripción de qué es la generación de residuos y cómo obtenerlos. En la sección 4.1.3 se muestra la estrategia para detectar anomalías o fallas en el sistema por medio de los residuos y se define qué es un síntoma. Por último, en la sección 4.1.4 se muestra la etapa lógica para la detección de fallas, así como la firma de fallas correspondiente al sistema de la caja de transmisión y un diagrama de flujo de la detección y localización de fallas.

4.1. Diseño del observador

Considerando el siguiente sistema TS sujeto a fallas en sensores

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^r \omega_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) &= Cx(t) + Rf(t)\end{aligned}\tag{4.1}$$

donde $x(t)$ es el vector de estados, $u(t)$ es el vector de entradas, $y(t)$ es el vector de salidas medidas,

$f(t)$ es el vector de fallas, A_i , B_i , C y R son matrices constantes con dimensiones apropiadas. Las funciones de pertenencia ω_i dependen de las no linealidades $z(t)$ del sistema.

Se propone un observador con generación de residuos de la siguiente forma

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= \sum_{i=1}^r \omega_i(z(t))(A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + L_i(y(t) - \hat{y}(t))) \\ \hat{y}(t) &= C \hat{x}(t) \\ r(t) &= M(y(t) - \hat{y}(t))\end{aligned}\tag{4.2}$$

donde $\hat{x}(t)$ es el vector de estimación de estados, $r(t)$ es la señal residual, $\hat{y}(t)$ es el vector de salidas estimadas.

Definiendo el error de estimación de estados como $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$, el desarrollo de la dinámica del error es el siguiente:

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t)\tag{4.3}$$

$$= \sum_{i=1}^r \omega_i(z(t)) (A_i x(t) + B_i u(t) - A_i \hat{x}(t) - B_i u(t) - L_i(y(t) - \hat{y}(t)))\tag{4.4}$$

$$= \sum_{i=1}^r \omega_i(z(t)) (A_i(x(t) - \hat{x}(t)) - L_i((Cx(t) + Rf(t)) - (C\hat{x}(t))))\tag{4.5}$$

$$= \sum_{i=1}^r \omega_i(z(t)) ((A_i - L_i C)e(t) - L_i Rf(t))\tag{4.6}$$

Tomando la ecuación del residuo (4.2) y sustituyendo $y(t)$ y $\hat{y}(t)$, se obtiene

$$r(t) = M(y(t) - \hat{y}(t))\tag{4.7}$$

$$= M(Cx(t) + Rf(t) - C\hat{x}(t))\tag{4.8}$$

$$= M(C(x(t) - \hat{x}(t)) + Rf(t))\tag{4.9}$$

$$= M(Ce(t) + Rf(t))\tag{4.10}$$

Finalmente, la dinámica del error en conjunto con la generación de residuos puede expresarse como:

$$\begin{aligned}\dot{e}(t) &= \sum_{i=1}^r \omega_i(z(t)) ((A_i - L_i C)e(t) - L_i Rf(t)) \\ r(t) &= M C e(t) + M R f(t)\end{aligned}\tag{4.11}$$

Representando (4.11) en forma de función de transferencia se obtiene

$$G_{rf} = \left(\begin{array}{c|c} \frac{A_i - L_i C}{MC} & \frac{-L_i R}{MR} \end{array} \right) \quad (4.12)$$

Considerando una ecuación dinámica deseada que tenga una dependencia entrada-salida, donde el comportamiento deseado es que al tener un cambio en una entrada solo reaccione una salida, se propone el siguiente sistema

$$\begin{aligned} \dot{z}_f(t) &= A_f e(t) + B_f f(t) \\ y_f(t) &= C_f e(t) + D_f f(t) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Representando (4.13) en forma de función de transferencia se tiene

$$W_f = \left(\begin{array}{c|c} \frac{A_f}{C_f} & \frac{B_f}{D_f} \end{array} \right) \quad (4.14)$$

La detección y localización de las fallas depende una elección adecuada de las matrices A_f , B_f , C_f y D_f , la cuales se suponen conocidas.

Las ganancias L y M de la ecuación (4.11) deben satisfacer la siguiente restricción

$$\|G_{rf} - W_f\|_\infty < \gamma \quad (4.15)$$

donde γ es un escalar positivo. El problema (4.15) puede formularse como una diferencia $G_{rf} - W_f$

$$G_{rf} - W_f = \left(\begin{array}{cc|c} A_i - L_i C & 0 & -L_i R \\ 0 & A_f & B_f \\ \hline MC & -C_f & MR - D_f \end{array} \right) \quad (4.16)$$

Para simplificar la notación la función de transferencia (4.16) se puede escribir como

$$\mathbb{G} = \left(\begin{array}{c|c} \mathbb{A}_i & \mathbb{B}_i \\ \hline \mathbb{C} & \mathbb{D} \end{array} \right) \quad (4.17)$$

donde

$$\mathbb{A}_i = \begin{bmatrix} A_i - L_i C & 0 \\ 0 & A_f \end{bmatrix}, \quad \mathbb{B}_i = \begin{bmatrix} -L_i R \\ B_f \end{bmatrix}, \quad \mathbb{C} = [MC \quad -C_f], \quad \mathbb{D} = MR - D_f \quad (4.18)$$

La forma en espacio de estados de la función de transferencia (4.17)

$$\begin{aligned}\dot{\varphi}(t) &= \sum_{i=1}^r \omega_i(z(t)) (\mathbb{A}_i \varphi(t) + \mathbb{B}_i f(t)) \\ e_r(t) &= \mathbb{C} \varphi(t) + \mathbb{D} f(t)\end{aligned}\tag{4.19}$$

donde $\varphi(t) = [e(t) \ z_f(t)]^T$ y $e_r(t) = r(t) - y_f(t)$

4.1.1. Estabilidad basada en Lyapunov

En esta sección se muestran las condiciones de estabilidad del observador en forma de desigualdades matriciales lineales, partiendo de una función candidata de Lyapunov. El objetivo de la solución de las desigualdades matriciales es encontrar las matrices M y L_i , tal que dinámica del error (4.19) sea estable.

Teorema 1: Existen matrices M y L_i tal que el sistema (4.19) es estable si existe una matriz

$P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix} > 0$ tal que la siguiente LMI es verificada

$$\begin{bmatrix} A_i^T P_1 + P_1 A_i - K_i C - C^T K_i^T & 0 & -K_i R & (MC)^T \\ 0 & A_f^T P_2 + P_2 A_f & P_2 B_f & -C_f^T \\ (-K_i R)^T & (P_2 B_f)^T & -\gamma^2 I & (MR - D_f)^T \\ MC & -C_f & MR - D_f & -I \end{bmatrix} < 0\tag{4.20}$$

donde $L_i = P_1^{-1} K_i$.

Demostración: Considerando la función cuadrática de Lyapunov

$$V(\varphi(t)) = \varphi(t)^T P \varphi(t) > 0\tag{4.21}$$

donde

$$P = P^T > 0, \quad P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix}.\tag{4.22}$$

Su derivada a lo largo de la trayectoria de (4.19) está dada por

$$\dot{V}(\varphi(t)) = \varphi(t)^T (\mathbb{A}_i^T P + P \mathbb{A}_i) \varphi(t) + \varphi(t)^T P \mathbb{B}_i f(t) + f(t)^T \mathbb{B}_i^T \varphi(t) < 0\tag{4.23}$$

El siguiente paso para el diseño del observador es relacionar el efecto de la falla a solo un residuo

utilizando la norma H_∞ de la siguiente forma

$$\frac{\|e_r\|^2}{\|f\|^2} < \gamma^2 \quad (4.24)$$

donde γ es un escalar positivo, expresando (4.24) en términos de un índice de desempeño tenemos

$$J < \int_0^\infty [e_r(t)^T e_r(t) - \gamma^2 f(t)^T f(t) + \dot{V}(\varphi(t))] dt \quad (4.25)$$

La condición suficiente para que $J < 0$ es

$$e_r(t)^T e_r(t) - \gamma^2 f(t)^T f(t) + \dot{V}(\varphi(t)) < 0, \quad \forall t \in [0, \infty) \quad (4.26)$$

Sustituyendo $e_r(t)$ de (4.19)

$$(\mathbb{C}\varphi(t) + \mathbb{D}f(t))^T (\mathbb{C}\varphi(t) + \mathbb{D}f(t)) - \gamma^2 f(t)^T f(t) + \dot{V}(\varphi(t)) < 0 \quad (4.27)$$

Sustituyendo $\dot{V}(\varphi(t))$ de (4.23)

$$\begin{aligned} & \varphi(t)^T \mathbb{C}^T \mathbb{C} \varphi(t) + \varphi(t)^T \mathbb{C}^T \mathbb{D} f(t) + f(t)^T \mathbb{D}^T \mathbb{D} f(t) + f(t)^T \mathbb{D}^T \mathbb{C} \varphi(t) - \gamma^2 f(t)^T f(t) \\ & + \varphi(t)^T \mathbb{A}_i^T P \varphi(t) + f(t)^T \mathbb{B}_i^T P \varphi(t) + \varphi(t)^T P \mathbb{A}_i \varphi(t) + \varphi(t)^T P \mathbb{B}_i f(t) < 0 \end{aligned} \quad (4.28)$$

Expresado de forma matricial se tiene

$$\begin{bmatrix} \varphi(t)^T \\ f(t)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbb{A}_i^T P + P \mathbb{A}_i + \mathbb{C}^T \mathbb{C} & P \mathbb{B}_i + \mathbb{D} \mathbb{C} \\ \mathbb{B}_i^T P + \mathbb{D}^T \mathbb{C} & \mathbb{D}^T \mathbb{D} - \gamma^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi(t) \\ f(t) \end{bmatrix} < 0 \quad (4.29)$$

donde la condición suficiente para satisfacer la desigualdad, es que (4.30) sea negativo definido

$$\begin{bmatrix} \mathbb{A}_i^T P + P \mathbb{A}_i + \mathbb{C}^T \mathbb{C} & P \mathbb{B}_i + \mathbb{D} \mathbb{C} \\ \mathbb{B}_i^T P + \mathbb{D}^T \mathbb{C} & \mathbb{D}^T \mathbb{D} - \gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (4.30)$$

la matriz (4.30) se puede descomponer como

$$\begin{bmatrix} \mathbb{A}_i^T P + P \mathbb{A}_i & P \mathbb{B}_i \\ \mathbb{B}_i^T P & \gamma^2 I \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbb{C}^T \\ \mathbb{D}^T \end{bmatrix} [-I] \begin{bmatrix} \mathbb{C} & \mathbb{D} \end{bmatrix} < 0 \quad (4.31)$$

de tal forma que, aplicando el complemento de Schur obtenemos

$$\begin{bmatrix} A_i^T P + P A_i & P B_i & C^T \\ B_i^T P & -\gamma^2 I & D^T \\ C & D & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (4.32)$$

Sustituyendo las matrices de (4.18) en la ecuación (4.32) y desarrollando se obtiene la desigualdad que hay que resolver para encontrar las ganancias L_i y M necesarias para el observador

$$\begin{bmatrix} A_i^T P_1 + P_1 A_i - P_1 L_i C - C^T L_i^T P_1 & 0 & -P_1 L_i R & (MC)^T \\ 0 & A_f^T P_2 + P_2 A_f & P_2 B_f & -C_f^T \\ (-P_1 L_i R)^T & (P_2 B_f)^T & -\gamma^2 I & (MR - D_f)^T \\ MC & -C_f & MR - D_f & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (4.33)$$

considerando $K_i = P_1 L_i$ la desigualdad puede ser escrita como una expresión lineal

$$\begin{bmatrix} A_i^T P_1 + P_1 A_i - K_i C - C^T K_i^T & 0 & -K_i R & (MC)^T \\ 0 & A_f^T P_2 + P_2 A_f & P_2 B_f & -C_f^T \\ (-K_i R)^T & (P_2 B_f)^T & -\gamma^2 I & (MR - D_f)^T \\ MC & -C_f & MR - D_f & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (4.34)$$

□

4.1.2. Generación de residuos

La generación de residuos consiste en realizar una comparación entre las mediciones reales del sistema y las estimaciones del modelo matemático que representa el comportamiento dinámico del sistema. A la señal obtenida de la diferencia entre el valor de la señal del sistema real y la señal de salida del modelo se le conoce como residuo.

En este caso, el diseño del observador incluye el cálculo de las ganancias del observador, quedando definido como

$$r(t) = M(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (4.35)$$

4.1.3. Evaluación de residuos

Para la etapa de evaluación de residuos, estos se comparan respecto a los umbrales definidos previamente y de dicha comparación se genera un síntoma. Lo complicado de la evaluación consiste

en definir un umbral cuyo valor puede ser el máximo error de estimación en el caso libre de falla, esto para cada salida, de tal forma que se puedan detectar las anomalías en el funcionamiento del sistema.

Un residuo (r) toma el valor de síntoma $S_f = 1$ cuando sobrepasa el umbral (T_h) durante un tiempo (t_d) determinado. Esto para evitar falsas alarmas no deseadas debidas por alguna perturbación.

$$S_f = \begin{cases} 1 & \Rightarrow r > T_h \wedge t_f > t_d \\ 0 & \Rightarrow r < T_h \wedge t_f < t_d \end{cases} \quad (4.36)$$

donde t_f es el tiempo de duración de la falla.

Determinación de umbrales

Para establecer los umbrales se simuló la caja de transmisión de la turbina libre de fallas Fig. 4.1 y el valor máximo de cada residuo determino el valor de los umbrales. Los cuales para el primer residuo fueron de 0.05 y para el segundo residuo fueron de 1.0614.

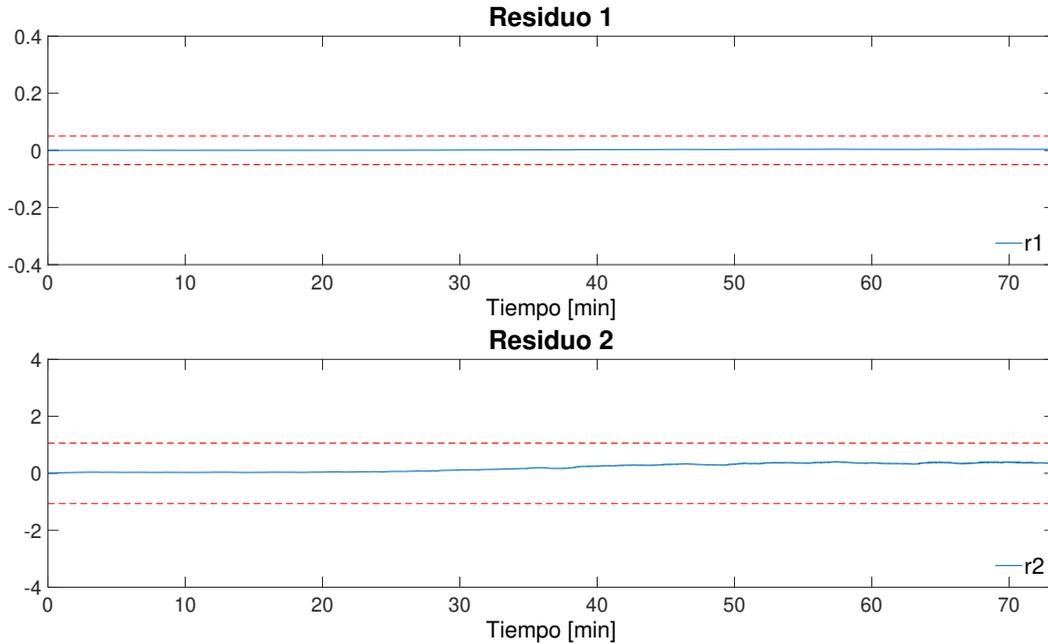


Fig. 4.1. Evolución de los dos residuos (r1 y r2) libre de fallas

4.1.4. Decisión

En esta etapa se realiza una comparación entre el conjunto de síntomas obtenidos y la matriz de firma de fallas. La detección de la falla se efectúa mediante una lógica de decisión binaria de tal forma que un síntoma solo puede tener valores de 1 o 0 dependiendo el caso, como se muestra en la ecuación (4.37)

$$f_j = \begin{cases} 1 & \Rightarrow S_f = 1 & \text{(caso con falla)} \\ 0 & \Rightarrow S_f = 0 & \text{(caso libre de falla)} \end{cases} \quad (4.37)$$

Cada residuo (r_j) es estructuralmente sensible a una falla (f_j), siendo pues que para este caso de estudio los residuos son sensibles a una falla e insensible a la otra, ya que al ocurrir una falla en el sensor de la primera salida (f_{ω_r}) solo se ve afectado el primer residuo ($r1$) y a su vez en el caso de ocurrir una falla en el sensor de la segunda salida (f_{ω_g}) solo se ve afectado el segundo residuo ($r2$). Dicho esto, la matriz de firmas de fallas se muestra en la tabla (4.1).

Tabla 4.1. Matriz de firma de fallas.

Residuos	Fallas en sensores	
	f_{ω_r}	f_{ω_g}
$r1$	1	0
$r2$	0	1

En la Fig. 4.2 se muestra un diagrama de flujo de la lógica de decisión que hay que tomar para llevar a cabo la detección y localización de las fallas.

El diagrama empieza por la comparación entre las mediciones reales del sistema y las estimaciones del observador, obteniendo de esta diferencia los residuos r , a esta etapa se le conoce como generación de residuos. La siguiente etapa comienza con la decisión si los residuos superan o no el umbral definido, si no se supera significa que el sistema tiene un comportamiento normal y en este punto el sistema de detección entra en un bucle hasta que ocurra una falla. Por otro lado, si al menos un residuo es mayor al umbral previamente establecido se generan síntomas los cuales se comparan con una matriz de firma de fallas previamente establecida y en donde se tiene un registro de qué

firma corresponde a qué falla. Por último, sabiendo el instante en el cual ocurre la falla y en donde está ocurriendo se puede decir que se cumple el objetivo de la detección y localización de la falla.

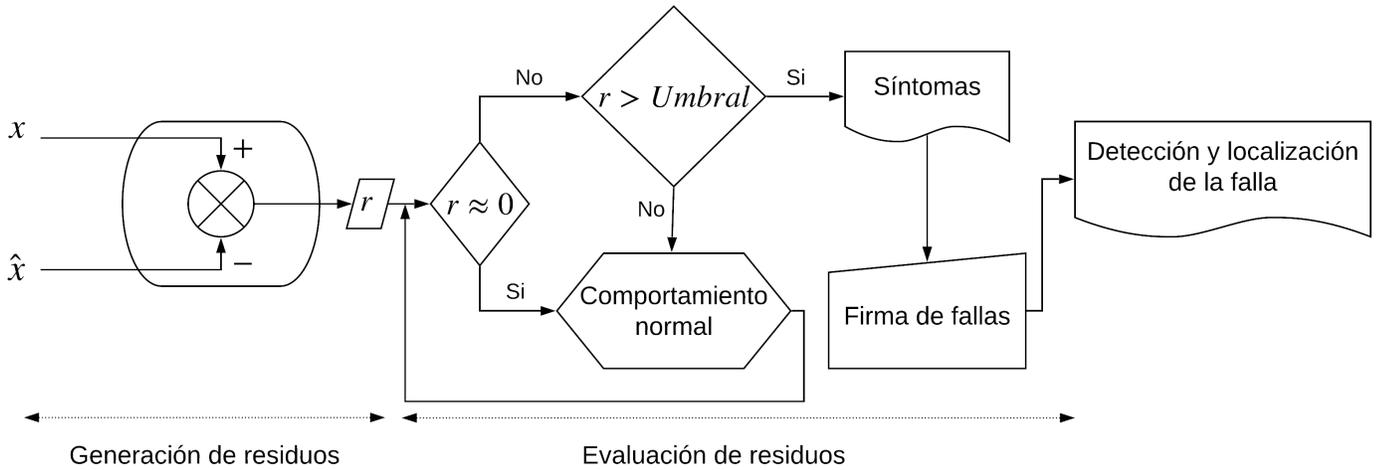


Fig. 4.2. Diagrama de flujo de la detección y localización de la falla

4.1.5. Estimación de la falla

Para este esquema de diagnóstico donde el observador cuenta con generación de residuos y se basa en minimizar el efecto de la falla en los estados estimados y maximizar el efecto de la falla en los residuos, el cálculo correspondiente para estimar la falla es la diferencia entre las señales de medición reales del sistema y las estimaciones del observador, dicho cálculo se muestra en la ecuación (4.38).

$$\hat{f}(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (4.38)$$

Capítulo 5

Pruebas y resultados de simulación

En este capítulo se presentan las diferentes pruebas realizadas al esquema de diagnóstico de fallas y los resultados obtenidos. Las pruebas efectuadas se dividieron en cinco escenarios de fallas; los primeros dos se pensaron por las fallas más recurrentes en las turbinas y los escenarios de fallas restantes tienen como objetivo probar la robustez del esquema de diagnóstico ante diferentes tipos de fallas. En la Fig. 5.1 se muestra un diagrama a bloques de la turbina con fallas en sensores, junto con el observador que genera residuos.

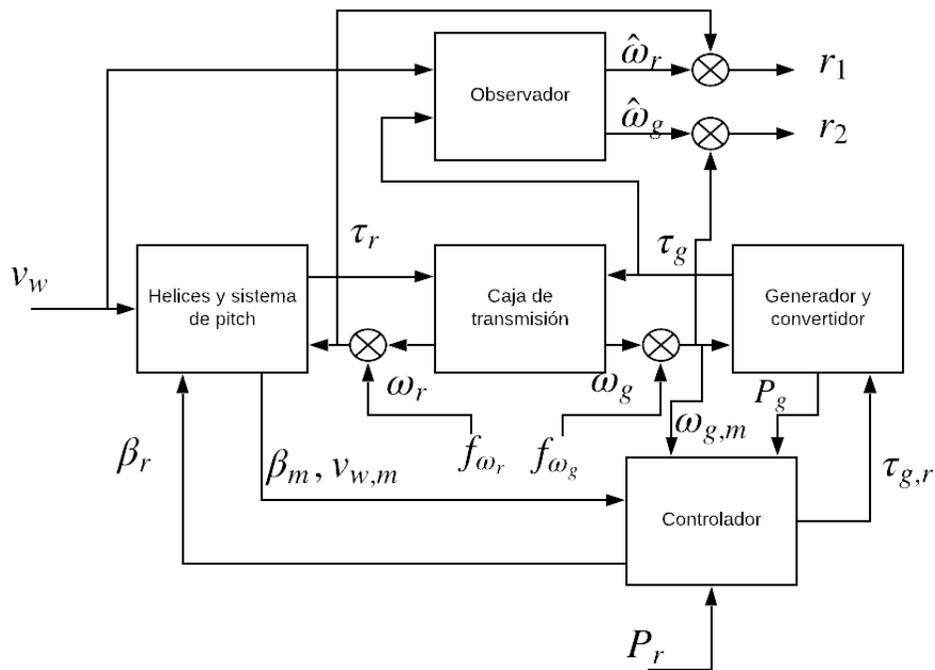


Fig. 5.1. Diagrama a bloques del esquema de generación de residuos.

Para llevar a cabo las simulaciones se utilizó el benchmark de Odgaard *y col.* (2013). Las configuraciones empleadas para llevar a cabo las simulaciones fueron las siguientes: el método utilizado para la solución de las ecuaciones diferenciales fue ode45 con un paso fijo de integración de 0.01, con una duración de 73 minutos, con condiciones iniciales $\omega_r(0) = 1rad/s$, $\omega_g(0) = 100rad/s$, utilizando el software Matlab R2018b.

5.1. Escenario 1. Falla abrupta en sensores por factor de ganancia.

El objetivo de este escenario es demostrar que el esquema de diagnóstico de fallas funciona para fallas de tipo abruptas como resultado de una falla de sensor con factor de ganancia. Una falla por factor de ganancia puede ser expresada como:

$$y_f(t) = y(t) + k \quad (5.1)$$

donde $y_f(t)$ es la salida con falla, $y(t)$ es la salida libre de falla y k es el factor de ganancia añadido.

5.1.1. Simulación 1. Falla en el sensor de la velocidad angular del rotor, ω_r

En la presente simulación se supone una falla en sensor de la velocidad angular del rotor $w_r(t)$, aditiva y de tipo abrupta del +35 %, ocurriendo en el minuto 21.6 y posteriormente desapareciendo en el minuto 28.3, matemáticamente expresado como:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 21.6\text{min} \\ k = 0.59 & 21.6\text{min} \leq t \leq 28.3\text{min} \\ 0 & t > 28.3\text{min} \end{cases} \quad (5.2)$$

En la Fig. 5.2 se muestra gráficamente la falla para esta simulación.

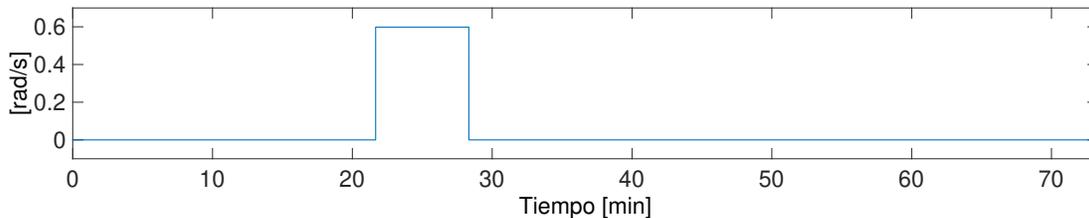


Fig. 5.2. Falla abrupta para simulación 1.

5.1. ESCENARIO 1. FALLA ABRUPTA EN SENSORES POR FACTOR DE GANANCIA.

El perfil de viento utilizado en esta simulación tiene el siguiente rango de variación $v_w(t) = [3m/s, 25m/s]$ y el torque del generador varía entre $\tau_g(t) = [0, 3.1 \times 10^4 Nm]$. Ambas entradas de la caja de transmisión se muestran en la Fig. 5.3.

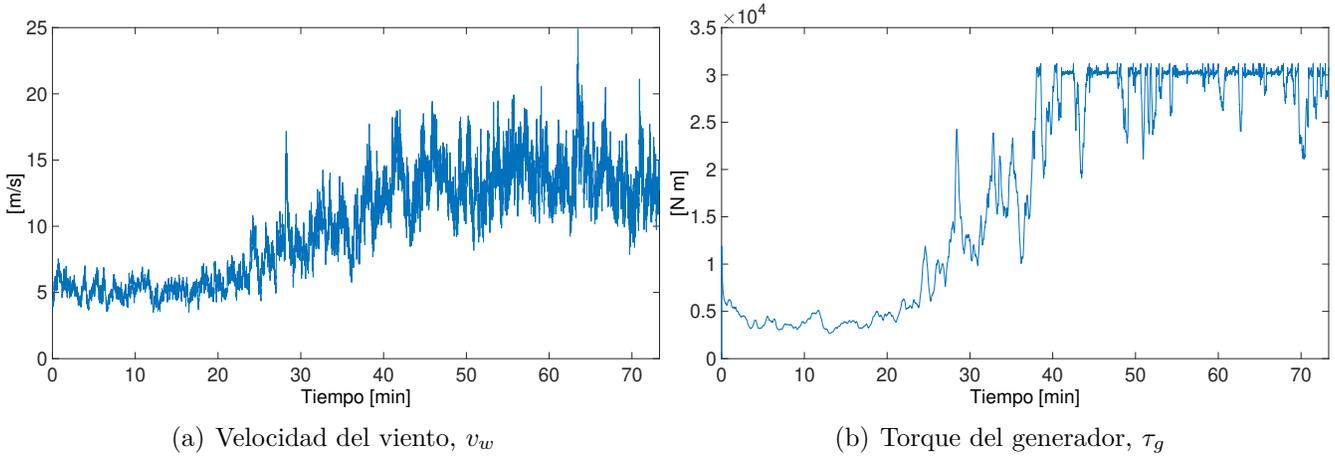


Fig. 5.3. Entradas para la simulación 1.

Una vez mostradas las condiciones para llevar a cabo la simulación, se simuló el benchmark de la turbina eólica con la falla mostrada en la Fig. 5.2 en el sensor de la velocidad angular del rotor $\omega_r(t)$. La Fig. 5.4 muestra los dos estados medibles de la caja de transmisión comparados con los estados estimados del correspondientes a las salidas del observador TS. Dado las condiciones de diseño del observador, permite filtrar el efecto de la falla en los estados estimados, permitiendo así **detectar** la presencia de una falla.

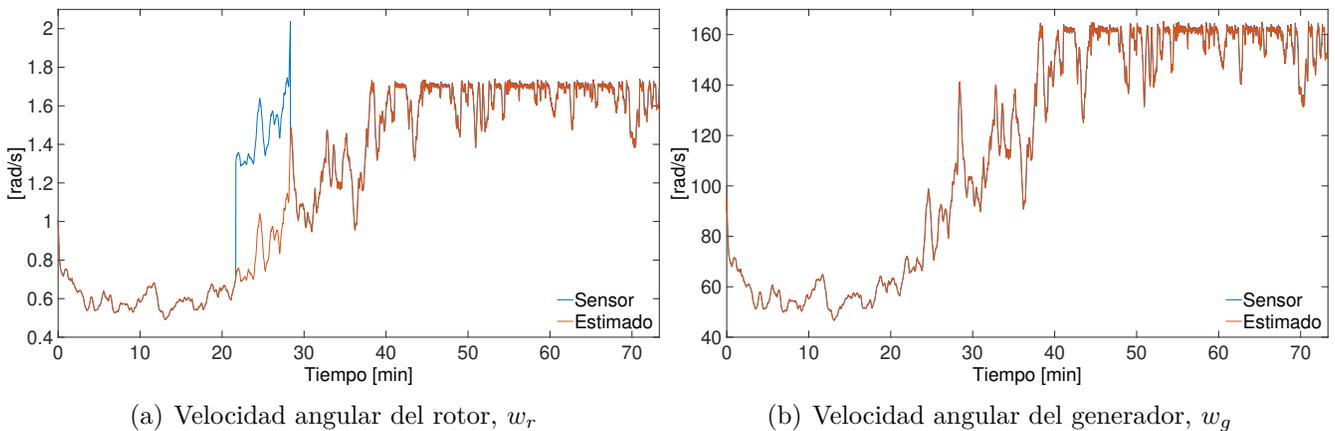


Fig. 5.4. Comparación de mediciones reales y estados estimados para la simulación 1.

5.1. ESCENARIO 1. FALLA ABRUPTA EN SENSORES POR FACTOR DE GANANCIA.

En la Fig. 5.5 se observa que en el residuo 1 por unos cuantos minutos se sobrepasan los umbrales previamente definidos, generando de esta forma un síntoma, mientras que el residuo 2 se mantiene dentro de los umbrales definidos.

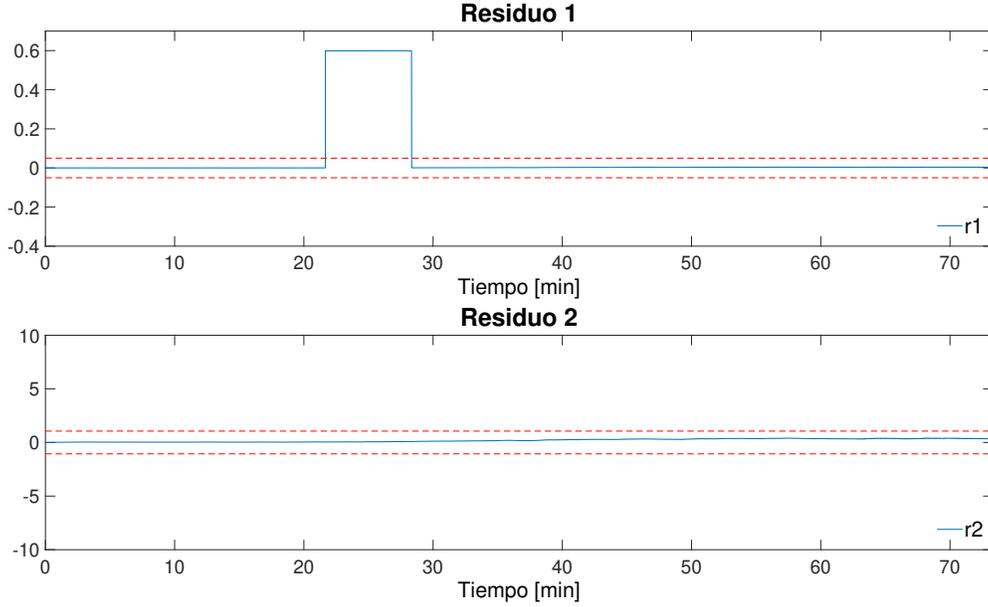


Fig. 5.5. Evolución de los residuos (r1 y r2) para falla abrupta en ω_r .

Los síntomas generados a partir de la interpretación de los residuos se pueden observar en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Síntomas de generados en simulación 1.

Residuos	
$r1$	$r2$
1	0

Después de generados los síntomas en la evaluación de residuos se realiza la etapa de decisión, en donde se comparan los síntomas generados contra la matriz de firma de fallas mostrada en la tabla 4.1, pudiendo **localizar** que la falla ocurre en el sensor de la velocidad angular del rotor, $\omega_r(t)$.

Para **estimar** la magnitud de la falla se realiza la diferencia entre la salida estimada y la medición del sensor con falla, obteniendo la magnitud de la falla, como se muestra en la Fig. 5.6.

En este caso, la estimación de la falla es posible, ya que como se mencionó anteriormente, la estimación de la salida filtra totalmente el efecto de la falla, esto debido a que en el diseño del

observador se consideró el enfoque H_∞ , que permite que las estimaciones sean robustas al efecto de la falla.

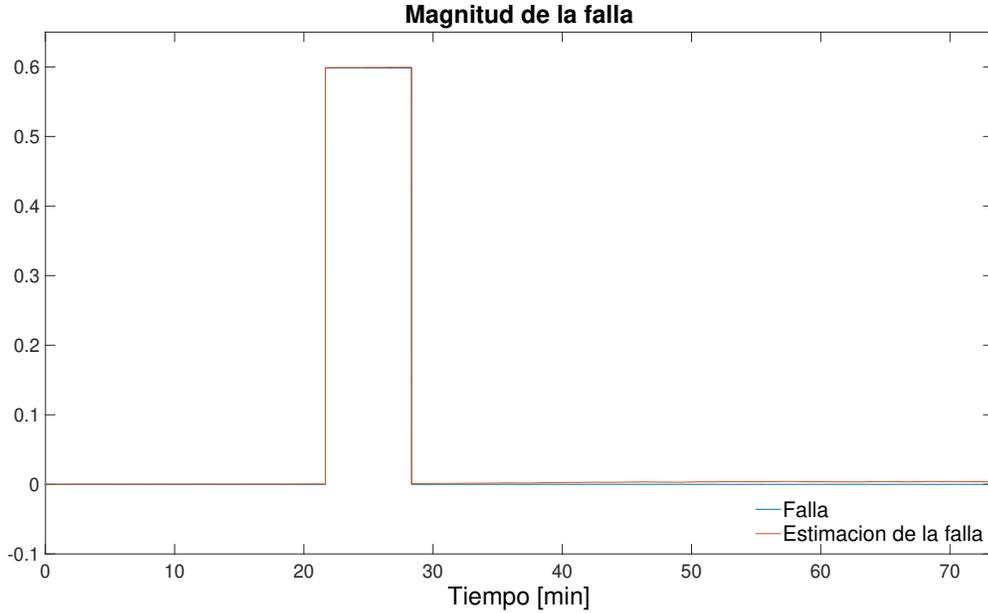


Fig. 5.6. Comparación de la falla abrupta en ω_r y su estimación

5.1.2. Simulación 2. Falla en el sensor de la velocidad angular del rotor, ω_g

En la presente simulación se supone una falla aditiva y de tipo abrupta del +15% en el sensor de la velocidad angular del rotor $w_g(t)$, ocurriendo en el minuto 36.6 y posteriormente desapareciendo en el minuto 48.3, matemáticamente expresado como:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 36.6\text{min} \\ k = 24.3 & 36.6\text{min} \leq t \leq 48.3\text{min} \\ 0 & t > 48.3\text{min} \end{cases} \quad (5.3)$$

En la Fig. 5.7 se muestra gráficamente la falla para esta simulación.

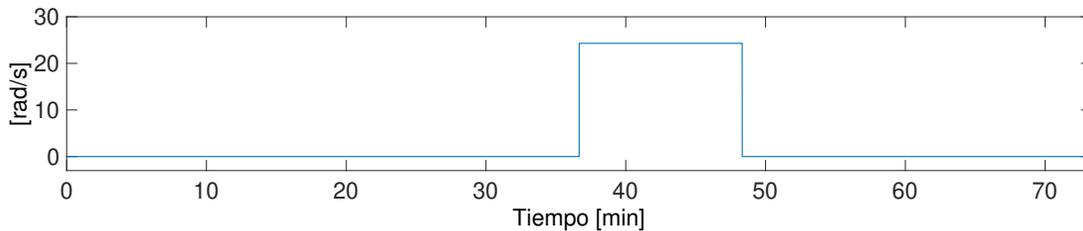


Fig. 5.7. Falla abrupta para simulación 1.

5.1. ESCENARIO 1. FALLA ABRUPTA EN SENSORES POR FACTOR DE GANANCIA.

El perfil de viento ocupado para esta simulación tiene el siguiente rango de variación $v_w(t) = [3m/s, 25m/s]$ y el torque del generador varía entre $\tau_g(t) = [0, 3.1 \times 10^4 Nm]$. Ambas entradas de la caja de transmisión se muestran en la Fig. 5.8.

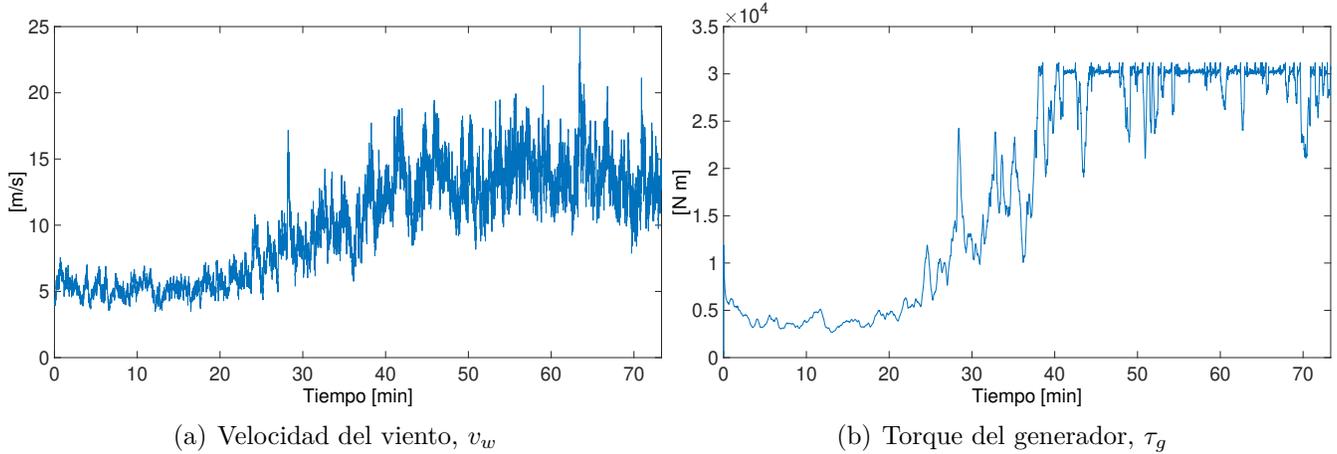


Fig. 5.8. Entradas para la simulación 2.

Utilizando las entradas mostradas se simuló el benchmark de la turbina eólica con la falla mostrada en la Fig. 5.7 en el sensor de la velocidad angular del generador $\omega_g(t)$. La Fig. 5.9 muestra la comparación de los dos estados medibles de la caja de transmisión con las salidas estimadas del observador TS, lo cual permite **detectar** la falla al haber una diferencia evidente entre las salidas medidas y las estimadas.

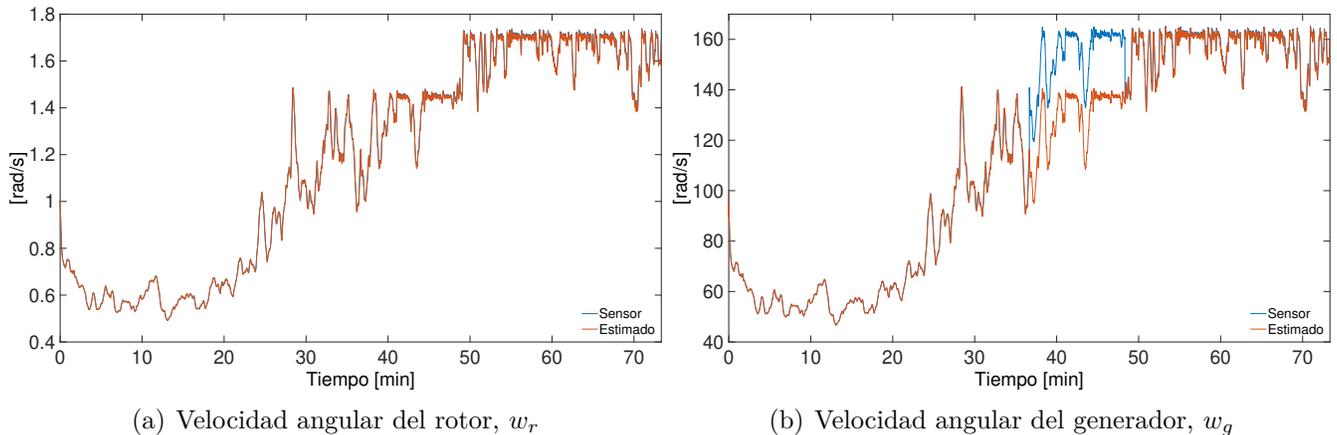


Fig. 5.9. Comparación de mediciones reales y estados estimados para la simulación 2.

En la Fig. 5.9 (a) se observa que la velocidad angular del rotor $\omega_r(t)$, tiene un comportamiento diferente a cuando se encuentra libre de falla, esto porque al ocurrir una falla en el sensor de la

5.1. ESCENARIO 1. FALLA ABRUPTA EN SENSORES POR FACTOR DE GANANCIA.

velocidad angular del generador $\omega_g(t)$, y debido a que, esta medición es una de las entradas del controlador hace que la entrada de la caja de transmisión $\tau_g(t)$ compense la falla y por consiguiente cambie también el estado $\omega_r(t)$. En la Fig. 5.10 se muestra la comparación entre el torque del generador $\tau_g(t)$, libre de falla y con la falla.

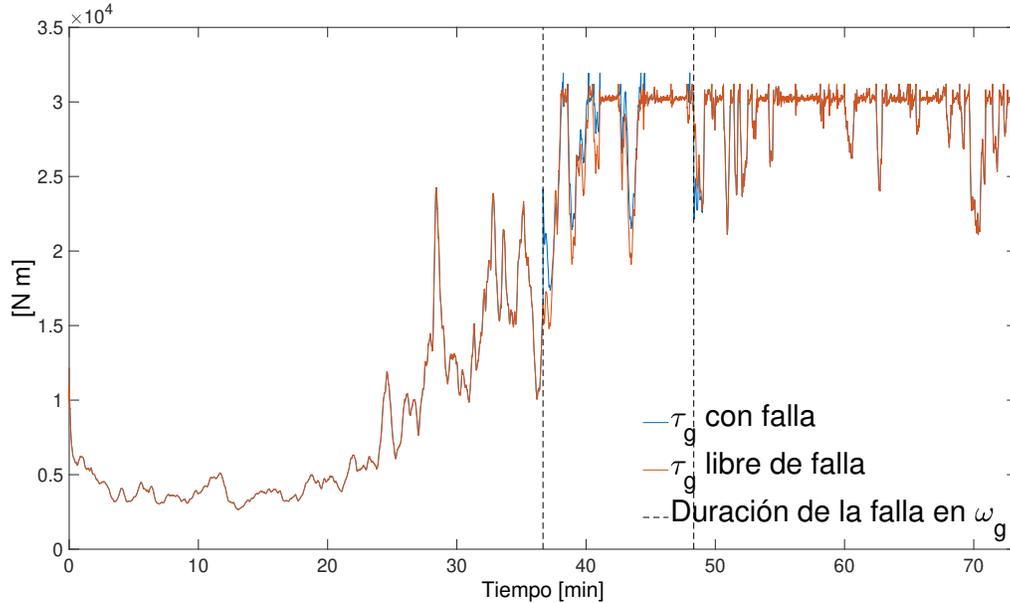


Fig. 5.10. Comparación del torque del generador libre de falla y con falla abrupta por factor de ganancia en ω_g

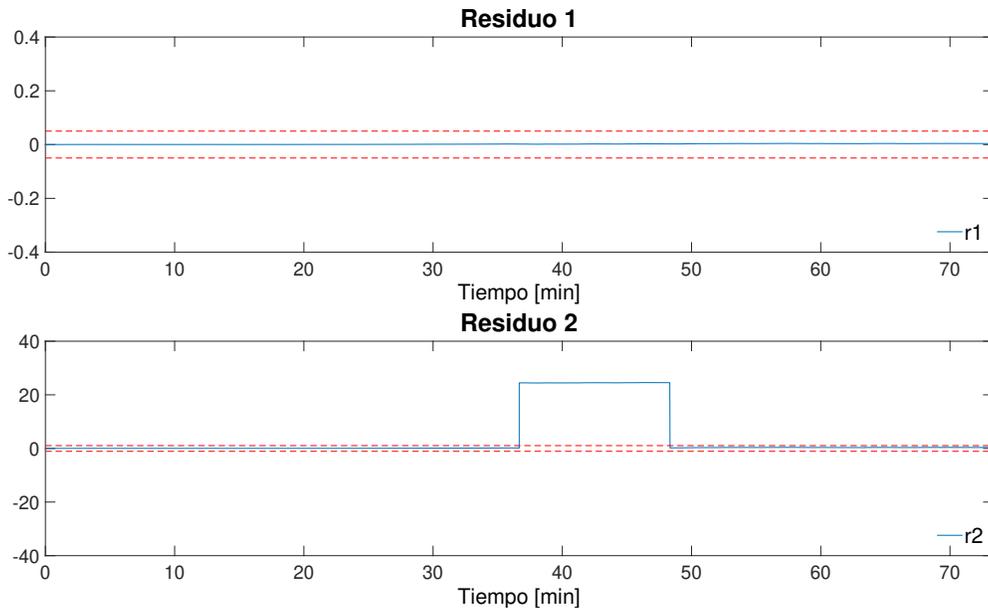


Fig. 5.11. Evolución de los residuos (r_1 y r_2) para falla abrupta en ω_r .

5.1. ESCENARIO 1. FALLA ABRUPTA EN SENSORES POR FACTOR DE GANANCIA.

En la Fig. 5.11 se observa que en el residuo 2 por unos cuantos minutos se sobrepasan los umbrales previamente definidos, generando de esta forma un síntoma, mientras que el residuo 1 se mantiene dentro de los umbrales definidos.

Los síntomas generados a partir de la interpretación de los residuos se pueden observar en la tabla 5.3.

Tabla 5.2. Síntomas de generados en simulación 2.

Residuos	
$r1$	$r2$
0	1

Después de generados los síntomas en la evaluación de residuos se realiza la etapa de decisión, en donde se comparan los síntomas generados contra la matriz de firma de fallas mostrada en la tabla 4.1, pudiendo **localizar** que ocurre una falla en el sensor de la velocidad angular del generador $\omega_g(t)$.

Para **estimar** la magnitud de la falla se realiza la diferencia entre la salida estimada y la medición del sensor con falla, obteniendo la magnitud de la falla, como se muestra en la Fig. 5.12.

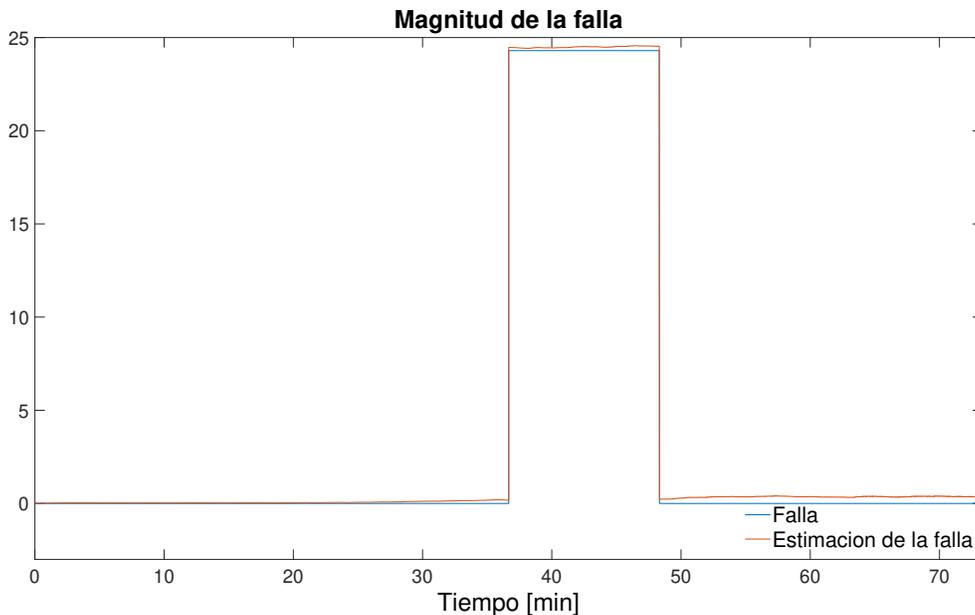


Fig. 5.12. Comparación de la falla abrupta en ω_g y su estimación

En este caso, la estimación de la falla es posible, ya que como se mencionó anteriormente, la estimación de la salida filtra totalmente el efecto de la falla, esto debido a que en el diseño del observador se consideró el enfoque H_∞ , que permite que las estimaciones sean robustas al efecto de la falla.

5.1.3. Simulación 3. Fallas múltiples en sensores ω_r y ω_g

En la presente simulación se supone fallas múltiples en los sensores de velocidad angular del rotor y del generador, de tipo aditivas y de abruptas. En el caso del sensor de ω_r es una falla del -40% , ocurriendo en el minuto 30 y posteriormente desapareciendo en el minuto 41.6, y en el caso del sensor de ω_g es una falla del $+25\%$, ocurriendo en el minuto 33.3 y desapareciendo en el minuto 38.3, matemáticamente se expresan en la ecuación (5.4).

$$f_{\omega_r}(t) = \begin{cases} 0 & t < 30\text{min} \\ k1 & 30\text{min} \leq t \leq 41.6\text{min} \\ 0 & t > 41.6\text{min} \end{cases}, \quad f_{\omega_g}(t) = \begin{cases} 0 & t < 33.3\text{min} \\ k2 & 33.3\text{min} \leq t \leq 38.3\text{min} \\ 0 & t > 38.3\text{min} \end{cases} \quad (5.4)$$

donde $k1 = -0.68$ y $k2 = 40.5$. En la Fig. 5.13 se muestra gráficamente la falla en el sensor de la velocidad angular del rotor y en la Fig. 5.14 se muestra la falla para el sensor de la velocidad angular del generador.

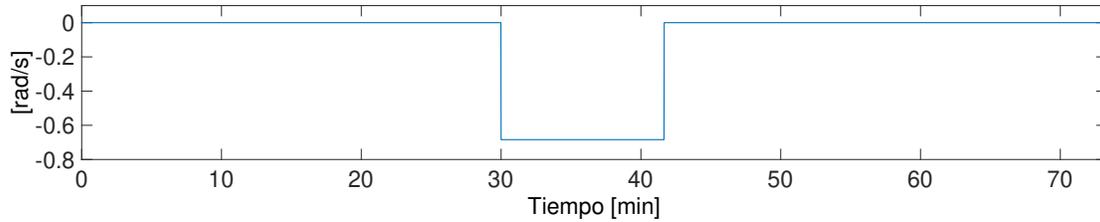


Fig. 5.13. Falla abrupta en sensor de ω_r para simulación 3.

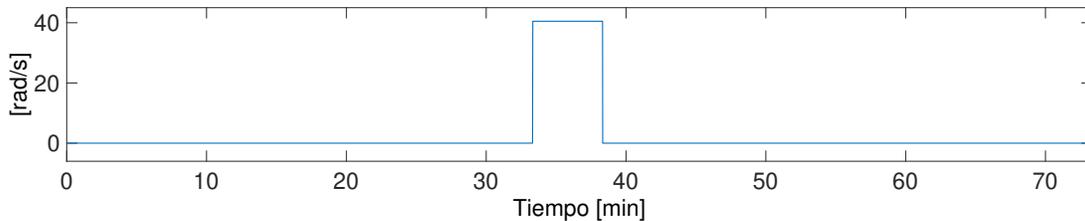


Fig. 5.14. Falla abrupta en sensor de ω_g para simulación 3.

5.1. ESCENARIO 1. FALLA ABRUPTA EN SENSORES POR FACTOR DE GANANCIA.

El perfil de viento utilizado para esta simulación tiene el siguiente rango de variación $v_w(t) = [3m/s, 25m/s]$ y el torque del generador varía entre $\tau_g(t) = [0, 3.1 \times 10^4 Nm]$. Ambas entradas de la caja de transmisión se muestran en la Fig. 5.15.

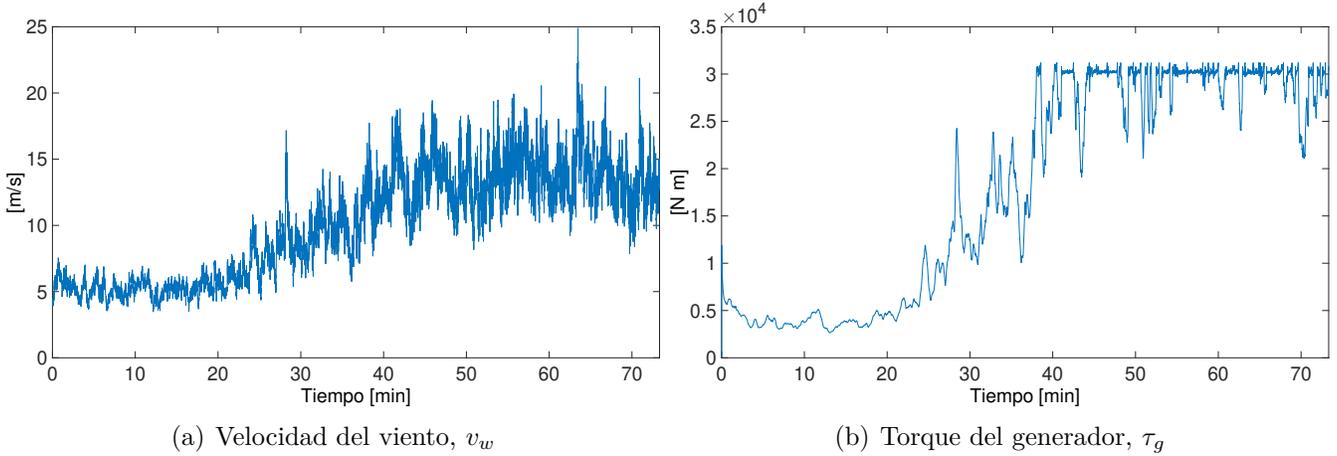


Fig. 5.15. Entradas para la simulación 2.

Se simuló el benchmark de la turbina eólica con la falla mostrada en la Fig. 5.13 en el sensor de la velocidad angular del generador ω_r y la falla mostrada en la Fig. 5.14 en el sensor de la velocidad angular del generador ω_g , junto con las entradas mostradas en la Fig. 5.9.

La Fig. 5.16 muestra los dos estados medibles de la caja de transmisión comparándolos con los estados estimados por el observador TS. Donde podemos notar que el observador permite **detectar** la presencia de fallas múltiples en el mismo instante de tiempo.

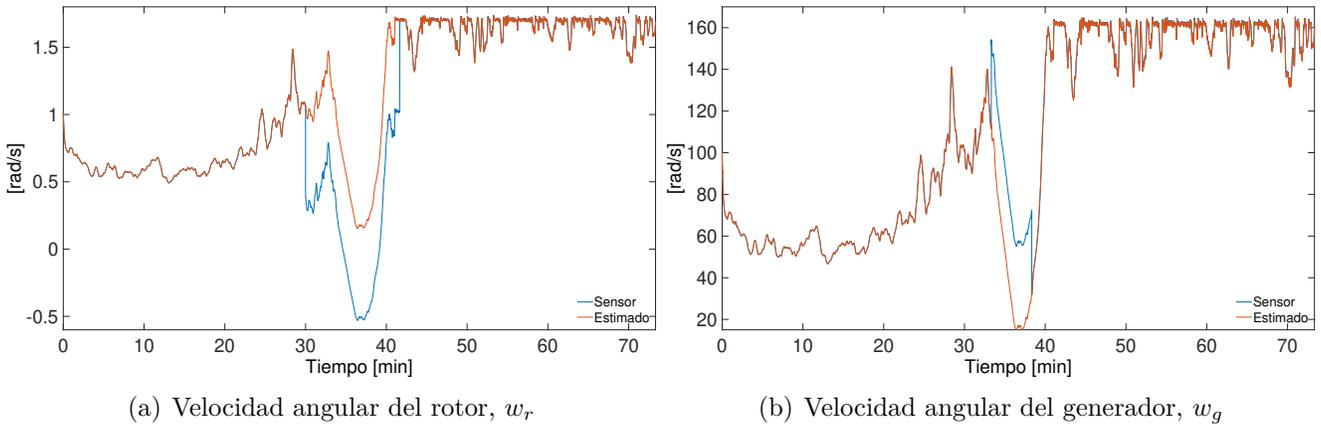


Fig. 5.16. Comparación de mediciones reales y estados estimados para la simulación 3.

5.1. ESCENARIO 1. FALLA ABRUPTA EN SENSORES POR FACTOR DE GANANCIA.

En la Fig. 5.17 se observa que ambos residuos sobrepasan por unos cuantos minutos los umbrales previamente definidos, generando de esta forma los síntomas.

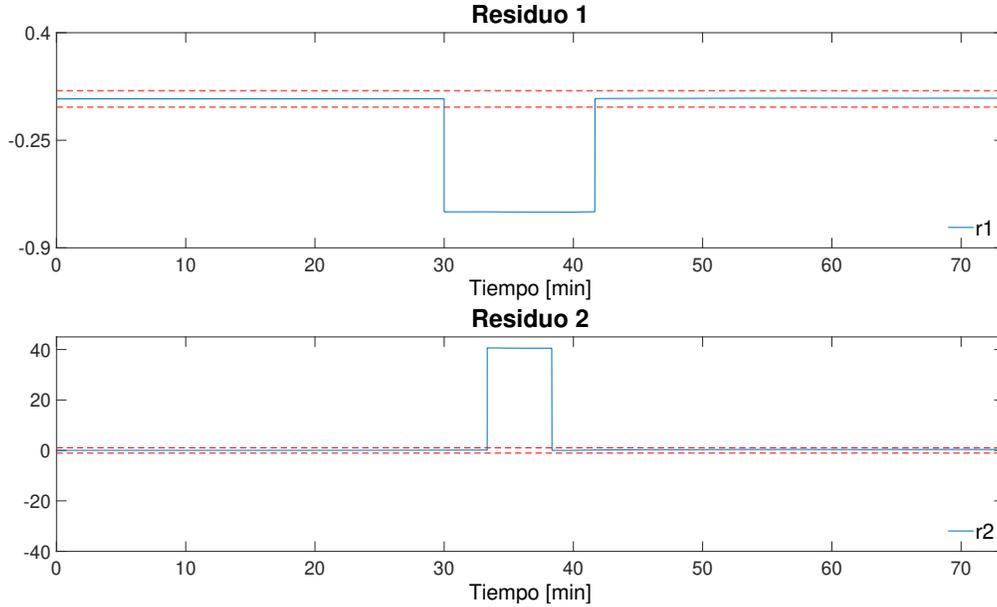


Fig. 5.17. Evolución de los residuos ($r1$ y $r2$) para falla abrupta en múltiples sensores.

Los síntomas generados a partir de la interpretación de los residuos se pueden observar en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Síntomas de generados en simulación 3.

Residuos	
$r1$	$r2$
1	1

Después de generados los síntomas en la evaluación de residuos se realiza la etapa de decisión, en donde se comparan los síntomas generados contra la matriz de firma de fallas mostrada en la tabla 4.1, pudiendo **localizar** que ocurre una falla en el sensor de la velocidad angular del rotor $\omega_r(t)$, y también se localizó una falla en el sensor de la velocidad angular de generador $\omega_g(t)$ en el mismo instante de tiempo y con diferentes duraciones.

Para **estimar** la magnitud de la falla se realiza la diferencia entre la salida estimada y la medición del sensor con falla, obteniendo la magnitud de la falla. La Fig. 5.18 muestra las dos magnitudes de las fallas reales de la caja de transmisión comparándolas con las magnitudes de las fallas estimadas.

5.1. ESCENARIO 1. FALLA ABRUPTA EN SENSORES POR FACTOR DE GANANCIA.

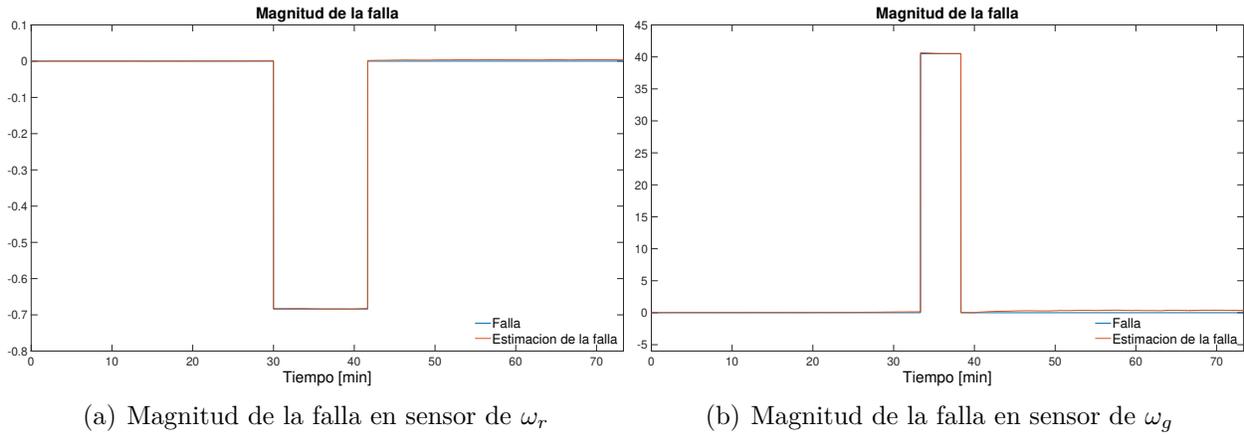


Fig. 5.18. Comparación de las fallas en ω_y y en ω_g contra sus estimaciones para simulación 3.

5.1.4. Conclusión de Escenario 1

Con el esquema de diagnóstico propuesto, es posible detectar fallas de tipo abruptas, tanto a los dos sensores por separado como para cuando ocurren fallas múltiples. Por su parte, la estimación de la falla se puede observar aceptable, a pesar de tener un pequeño error en estado estable.

Cabe mencionar que algunas de las fallas se simularon con el propósito de probar la robustez del esquema de diagnóstico haciendo aparecer las fallas cuando el controlador cambia del modo de control 1 al 2, debido a la velocidad del viento, dando resultados eficientes.

Por otra parte, es importante mencionar que cuando ocurre la falla en el sensor de la velocidad angular del generador $w_g(t)$, afecta a todo el sistema de la turbina eólica en general, debido a que esa medición es una de las variables utilizadas por el controlador.

5.2. Escenario 2. Falla abrupta por sensores pasmado.

El objetivo de este escenario es demostrar que el esquema de diagnóstico de fallas funciona para para fallas de tipo abruptas como resultado de una falla de sensor cuando este se queda pasmado arrojando el último dato medido por un determinado tiempo.

Una falla por efecto de sensor pasmado puede ser expresada como:

$$y_f(t) = y(t_f) \quad (5.5)$$

donde $y_f(t)$ es la salida con falla, t_f es el tiempo en el que se presenta la falla y $y(t_f)$ es el valor de la salida en instante en el que se presenta la falla.

5.2.1. Simulación 4. Falla en el sensor de la velocidad angular del rotor, ω_r

En la presente simulación se supone una falla abrupta y de sensor, simulando que el sensor de la velocidad angular del rotor $\omega_r(t)$ se queda pasmado en el minuto 36.6 y retomando la lectura correcta en el minuto 46.6. Matemáticamente se puede expresar la falla como:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 36.6\text{min} \\ \omega_r & 36.6\text{min} \leq t \leq 46.6\text{min} \\ 0 & t > 46.6\text{min} \end{cases} \quad (5.6)$$

En la Fig. 5.19 se muestra gráficamente la falla para esta simulación.

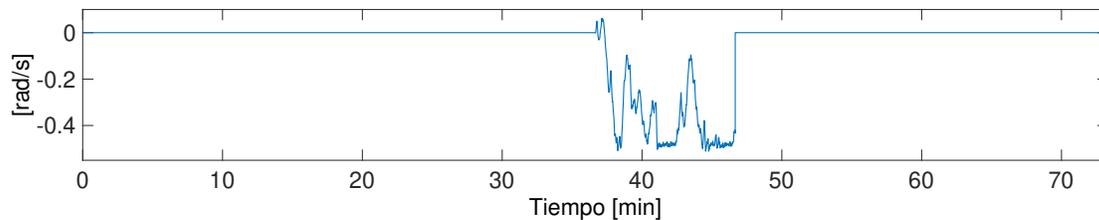


Fig. 5.19. Falla abrupta para simulación 4

El perfil de viento utilizado para esta simulación tiene el siguiente rango de variación $v_w(t) = [3m/s, 25m/s]$ y el torque del generador varía entre $\tau_g(t) = [0, 3.1 \times 10^4 Nm]$. Ambas entradas de la caja de transmisión se muestran en la Fig. 5.20.

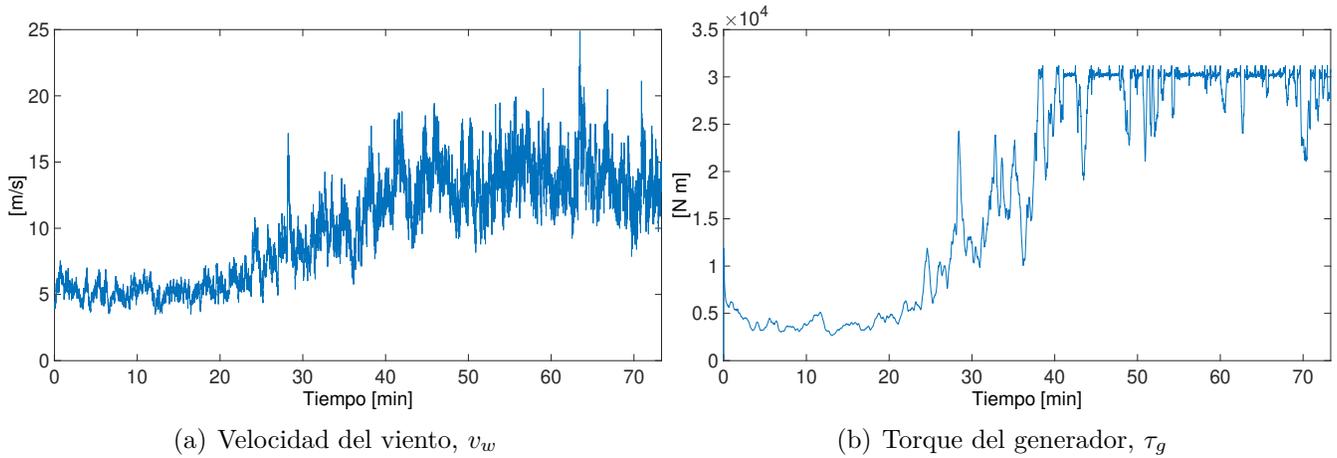


Fig. 5.20. Entradas para la simulación 4

Una vez mostradas las entradas para llevar acabo la simulación, se simuló el benchmark de la turbina eólica con la falla mostrada en la Fig. 5.19 en el sensor de la velocidad angular del rotor $\omega_r(t)$. La Fig. 5.21 muestra los dos estados medibles de la caja de transmisión comparándolos con las salidas estimadas del observador TS. Dado las condiciones de diseño del observador, permite **detectar** la presencia de una falla.

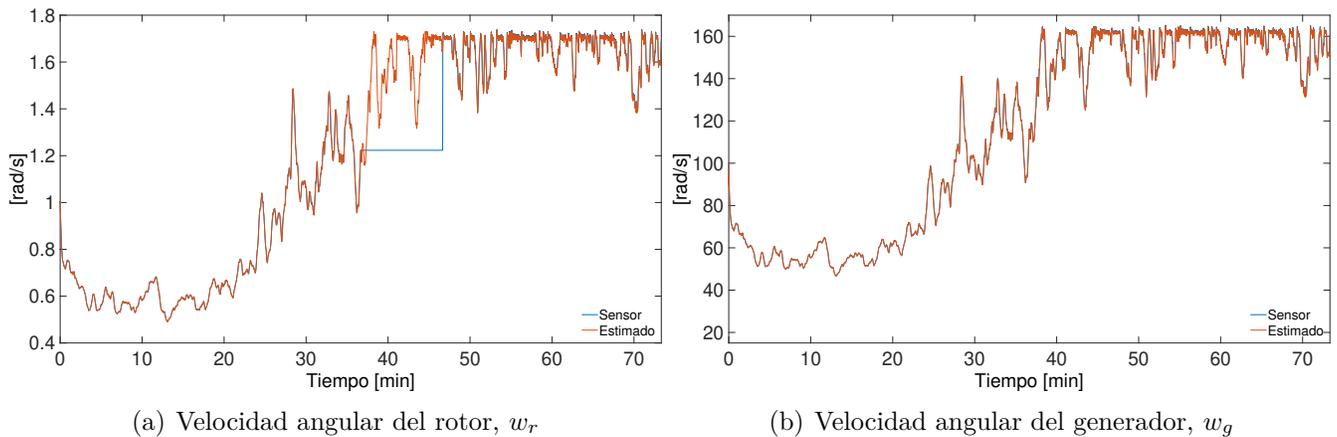


Fig. 5.21. Comparación de mediciones reales y estados estimados para la simulación 4.

En la Fig. 5.22 se observa que en el residuo 1 por unos cuantos minutos se sobrepasan los umbrales previamente definidos, generando de esta forma un síntoma, mientras que el residuo 2 se mantiene dentro de los umbrales definidos.

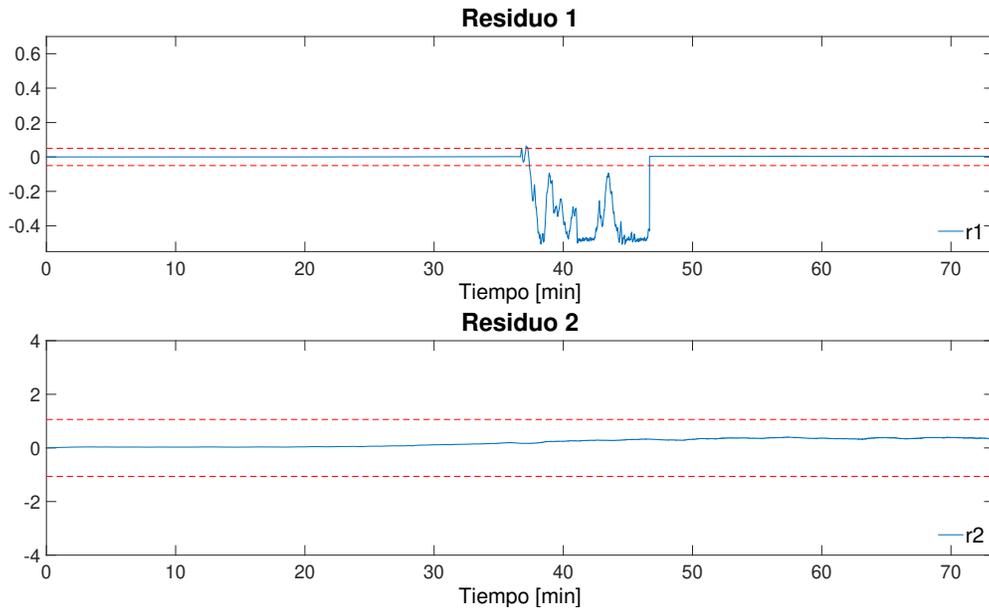


Fig. 5.22. Evolución de los dos residuos (r_1 y r_2) para falla de valor fijo en ω_r

Los síntomas generados a partir de la interpretación de los residuos se pueden observar en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Síntomas de generados en simulación 4.

Residuos	
r_1	r_2
1	0

Después de generados los síntomas en la evaluación de residuos se realiza la etapa de decisión, en donde se comparan los síntomas generados contra la matriz de firma de fallas mostrada en la tabla 4.1, pudiendo **localizar** que ocurre una falla en el sensor de la velocidad angular del rotor $\omega_r(t)$.

Para **estimar** la magnitud de la falla se realiza la diferencia entre la salida estimada y la medición del sensor con falla, obteniendo la magnitud de la falla, como se muestra en la Fig. 5.23.

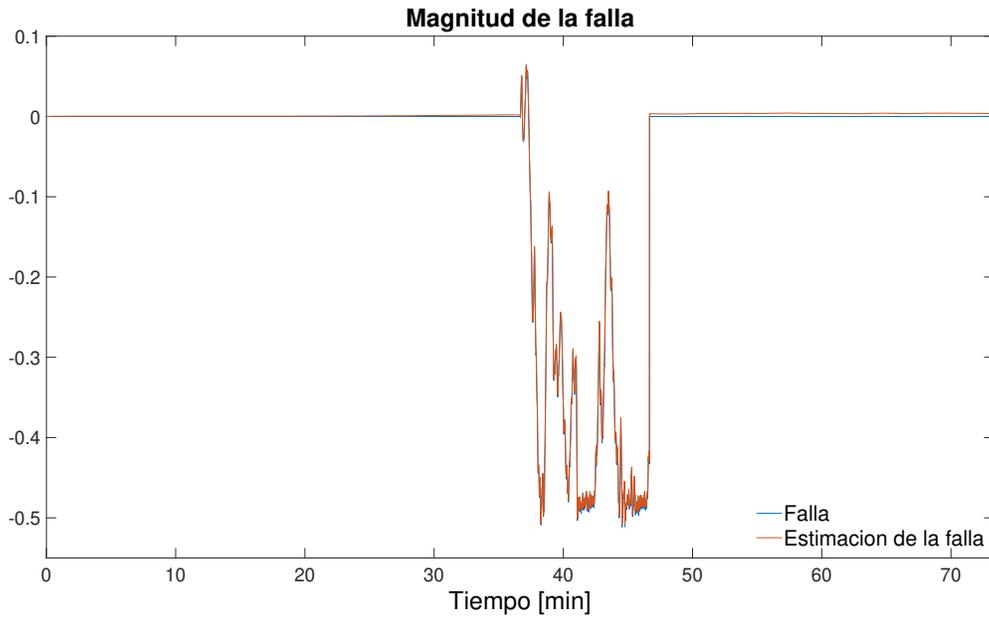


Fig. 5.23. Comparación de la falla abrupta de valor fijo en ω_r y su estimación

5.2.2. Simulación 5. Falla en el sensor de la velocidad angular del generador, ω_g

En la presente simulación se supone una falla abrupta y de sensor, simulando que el sensor de la velocidad angular del generador $\omega_g(t)$ se queda pasmado en el minuto 46.6 y se retoma la lectura correcta en el minuto 58.3. Matemáticamente se puede expresar la falla como:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 46.6\text{min} \\ \omega_g & 46.6\text{min} \leq t \leq 58.3\text{min} \\ 0 & t > 58.3\text{min} \end{cases} \quad (5.7)$$

En la Fig. 5.24 se muestra gráficamente la falla para esta simulación.

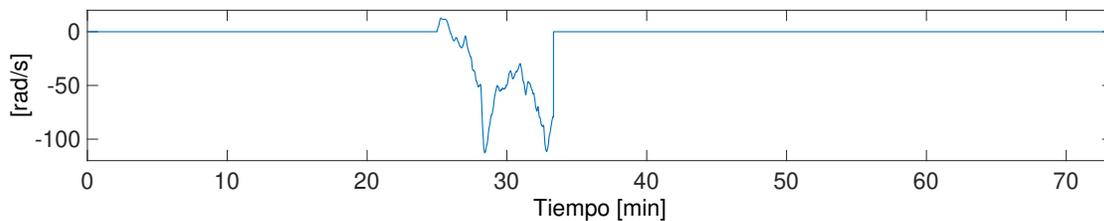


Fig. 5.24. Falla abrupta para simulación 5.

El perfil de viento utilizado para esta simulación tiene el siguiente rango de variación $v_w(t) = [3m/s, 25m/s]$ y el torque del generador varía entre $\tau_g(t) = [0, 3.1 \times 10^4 Nm]$. Ambas entradas de la caja de transmisión se muestran en la Fig. 5.25.

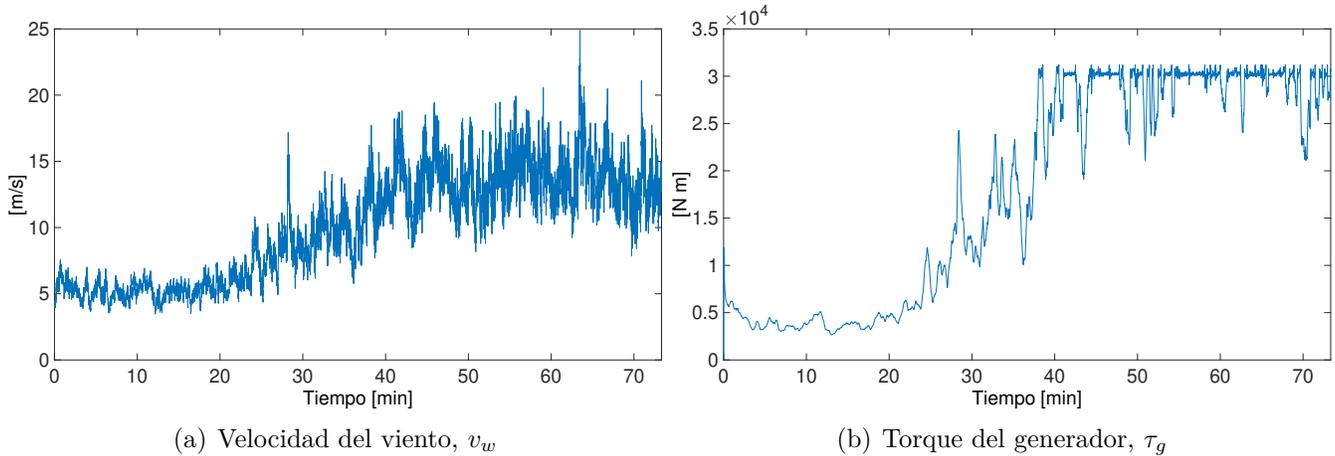


Fig. 5.25. Entradas para la simulación 2.

Se simuló el benchmark de la turbina eólica con la falla mostrada en la Fig. 5.24 en el sensor de la velocidad angular del generador $\omega_g(t)$ y las entradas de la Fig. 5.25. La Fig. 5.26 muestra los dos estados medibles de la caja de transmisión comparándolos con las salidas del observador TS. Dado las condiciones de diseño del observador, permite **detectar** la presencia de una falla.

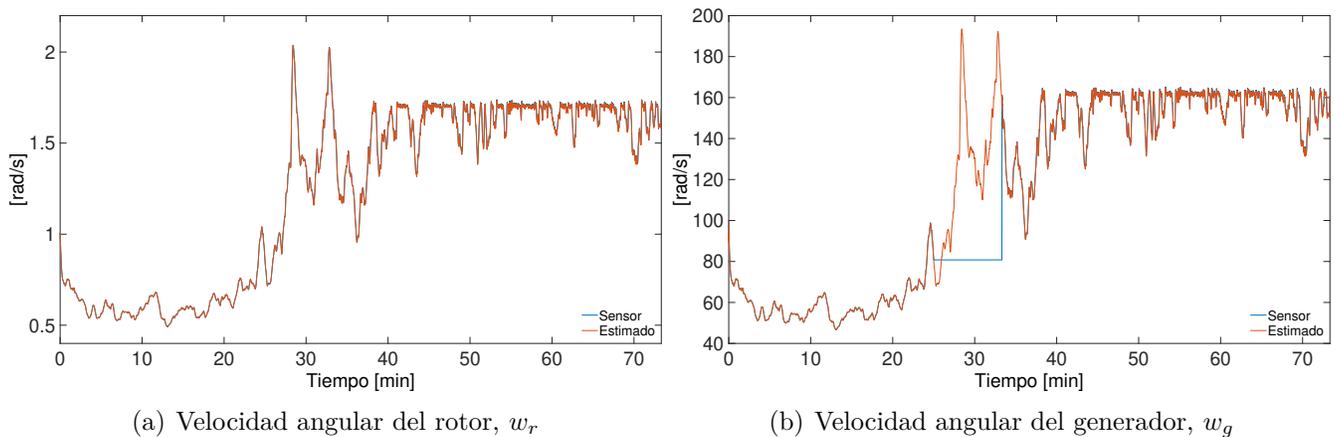


Fig. 5.26. Comparación de mediciones reales y estados estimados para la simulación 5.

En la Fig. 5.26 (a) se observa que la velocidad angular del rotor $\omega_r(t)$, tiene un comportamiento diferente a cuando se encuentra libre de falla, esto porque al ocurrir una falla en el sensor de la velocidad angular del generador $\omega_g(t)$, y debido a que, esta medición es una de las entradas del

controlador hace que la entrada de la caja de transmisión τ_g compense la falla y por consiguiente cambie también el estado $\omega_r(t)$. En la Fig. 5.27 se muestra la comparación entre el torque del generador $\tau_g(t)$, libre de falla y con la falla.

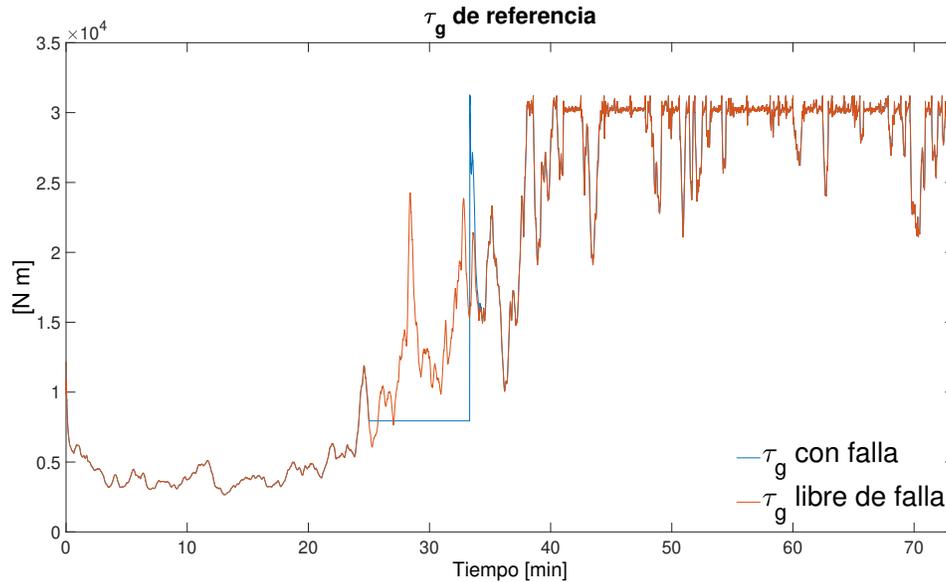


Fig. 5.27. Comparación del torque del generador libre de falla y para falla abrupta por sensor pasmado.

En la Fig. 5.28 se observa que en el residuo 2 por unos cuantos minutos se sobrepasan los umbrales previamente definidos, generando de esta forma un síntoma, mientras que el residuo 1 se mantiene dentro de los umbrales definidos.

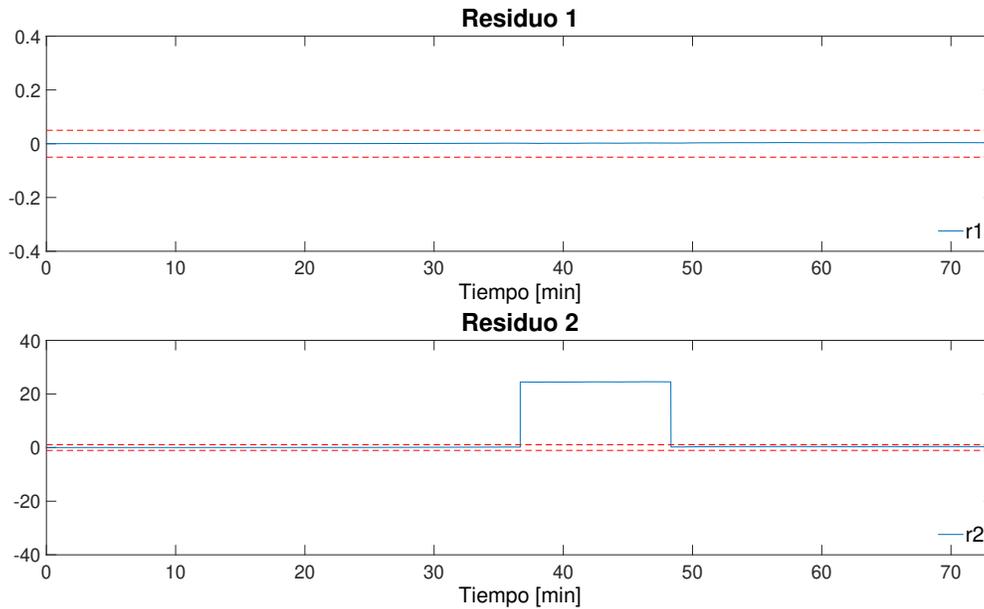


Fig. 5.28. Evolución de los residuos (r_1 y r_2) para falla abrupta en ω_r .

Los síntomas generados a partir de la interpretación de los residuos se pueden observar en la tabla 5.5.

Tabla 5.5. Síntomas de generados en simulación 5.

Residuos	
$r1$	$r2$
0	1

Los síntomas generados se comparan contra la matriz de firma de fallas mostrada en la tabla 4.1, pudiendo **localizar** que la falla ocurre en el sensor de la velocidad angular del generador $\omega_g(t)$.

Para **estimar** la magnitud de la falla se realiza la diferencia entre la salida estimada y la medición del sensor con falla, obteniendo la magnitud de la falla, como se muestra en la Fig. 5.12.

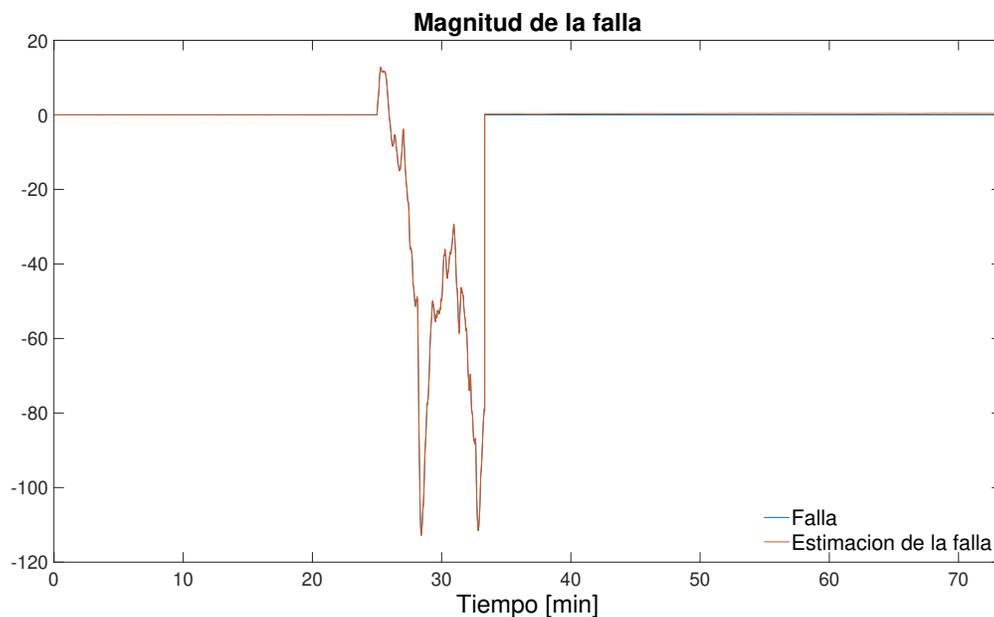


Fig. 5.29. Comparación de la falla abrupta de valor fijo en ω_g y su estimación

5.2.3. Conclusión de Escenario 2

Se concluye que con el esquema de diagnóstico de fallas propuesto para fallas que simulan que el sensor se queda pasmado por unos minutos, es posible detectar el instante en el que ocurre la falla, localizar el sensor dañado y estimar de forma aceptable la magnitud de la falla. Esto para fallas tanto en el sensor de $\omega_r(t)$ como para fallas en el sensor de $\omega_g(t)$.

5.3. Escenario 3. Falla incipiente

El objetivo de este escenario es demostrar que el esquema de diagnóstico de fallas funciona para fallas de tipo incipientes.

Una falla de tipo incipiente puede ser expresada como:

$$y_f(t) = y(t) + k(t) \quad (5.8)$$

donde $y_f(t)$ es la salida con falla, $y(t)$ es la salida libre de falla y $k(t)$ es una señal que depende del tiempo.

5.3.1. Simulación 6. Falla en el sensor de la velocidad angular del rotor, ω_r

En la presente simulación se supone una falla en sensor, aditiva y de tipo incipiente, en el sensor de la velocidad angular del rotor y ocurriendo en el minuto 25 con una pendiente de $\frac{1}{440}$ y dejando de crecer en el minuto 41.6, matemáticamente expresado como:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 25\text{min} \\ \frac{1}{440}t & t \geq 25\text{min} \\ 0.22 & t \leq 41.6\text{min} \end{cases} \quad (5.9)$$

En la Fig. 5.30 se muestra gráficamente la falla para esta simulación.

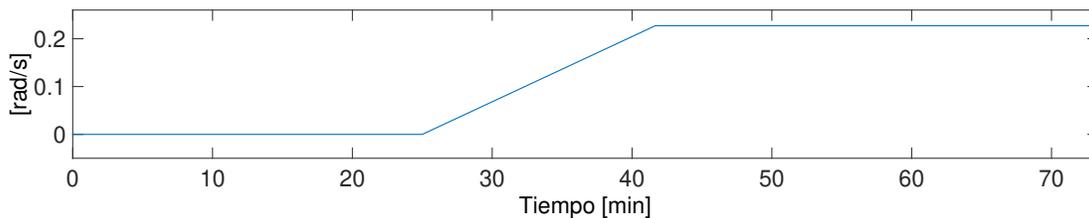


Fig. 5.30. Falla incipiente para simulación 6.

El perfil de viento ocupado para esta simulación tiene el siguiente rango de variación $v_w(t) = [3m/s, 25m/s]$ y el torque del generador varía entre $\tau_g(t) = [0, 3.1 \times 10^4 Nm]$. Ambas entradas de la caja de transmisión se muestran en la Fig. 5.31.

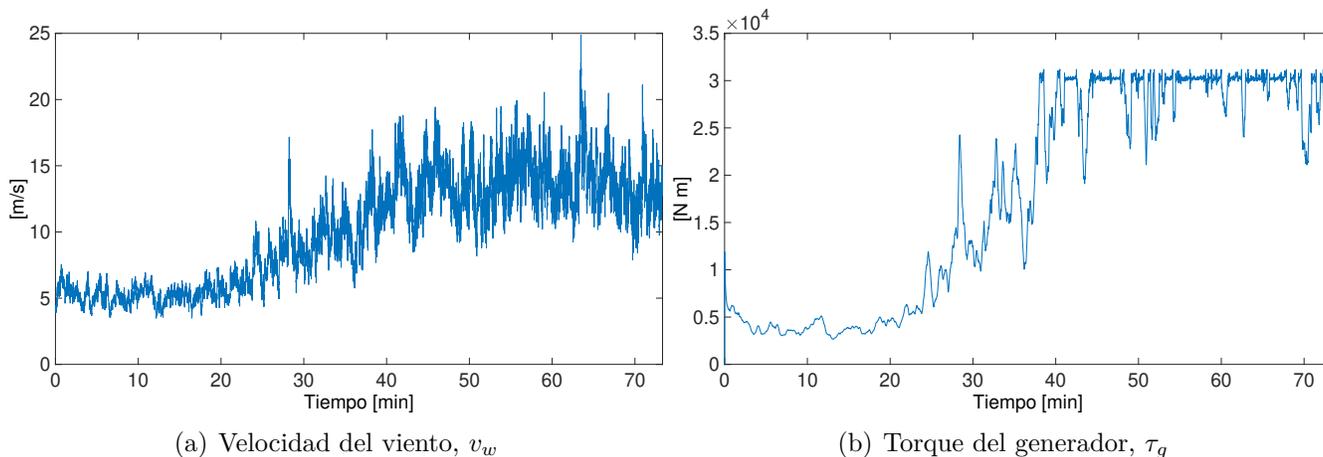


Fig. 5.31. Entradas para la simulación 6.

Se simuló el benchmark de la turbina eólica con la falla mostrada en la Fig. 5.30 en el sensor de la velocidad angular del rotor $\omega_r(t)$. La Fig. 5.32 muestra los dos estados medibles de la caja de transmisión comparados con las salidas del observador TS.

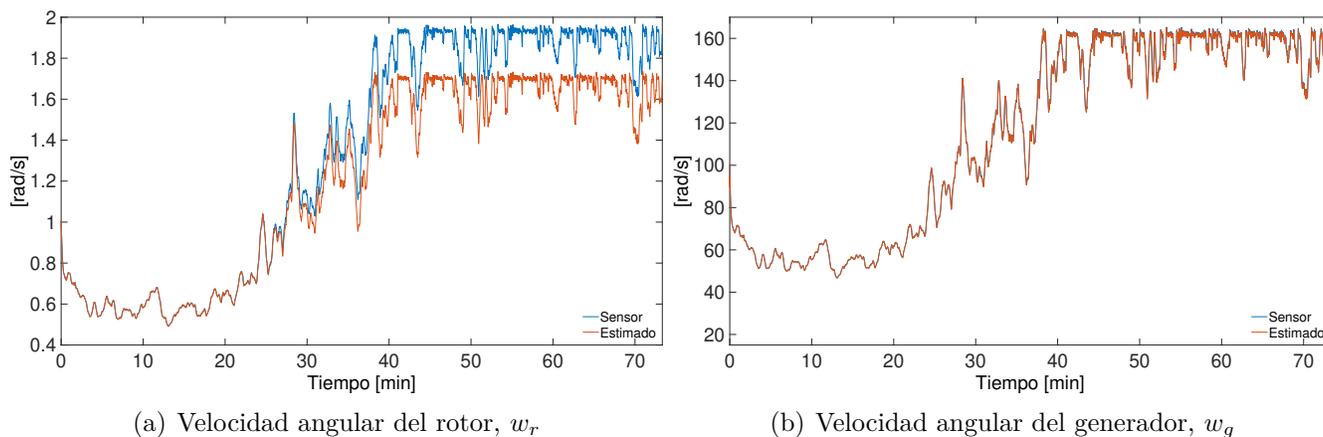


Fig. 5.32. Comparación de mediciones reales y estados estimados para la simulación 6.

En la Fig. 5.33 se observa que en el residuo 1 por unos cuantos minutos se sobrepasan los umbrales previamente definidos, generando de esta forma un síntoma, mientras que el residuo 2 se mantiene dentro de los umbrales definidos.

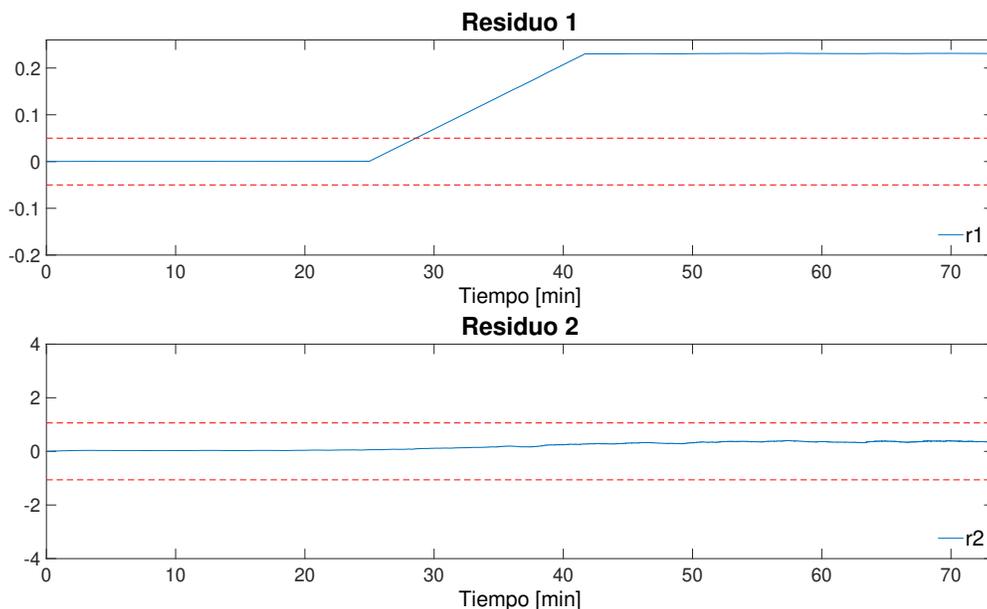


Fig. 5.33. Evolución de los residuos ($r1$ y $r2$) para falla abrupta en ω_r .

Los síntomas generados a partir de la interpretación de los residuos se pueden observar en la tabla 5.6.

Tabla 5.6. Síntomas de generados en simulación 6.

Residuos	
$r1$	$r2$
1	0

Después de generado los síntomas en la evaluación de residuos se realiza la etapa de decisión, en donde se comparan los síntomas generados contra la matriz de firma de fallas mostrada en la tabla 4.1, pudiendo **localizar** que ocurre una falla en el sensor de la velocidad angular del rotor $\omega_r(t)$.

Para **estimar** la magnitud de la falla se realiza la diferencia entre la salida estimada y la medición del sensor con falla, obteniendo la magnitud de la falla, como se muestra en la Fig. 5.34.

En este caso, la estimación de la falla es posible, ya que la estimación de la salida filtra el efecto de la falla, esto debido a que en el diseño del observador se consideró el enfoque H_∞ , que permite que las estimaciones sean robustas al efecto de la falla.

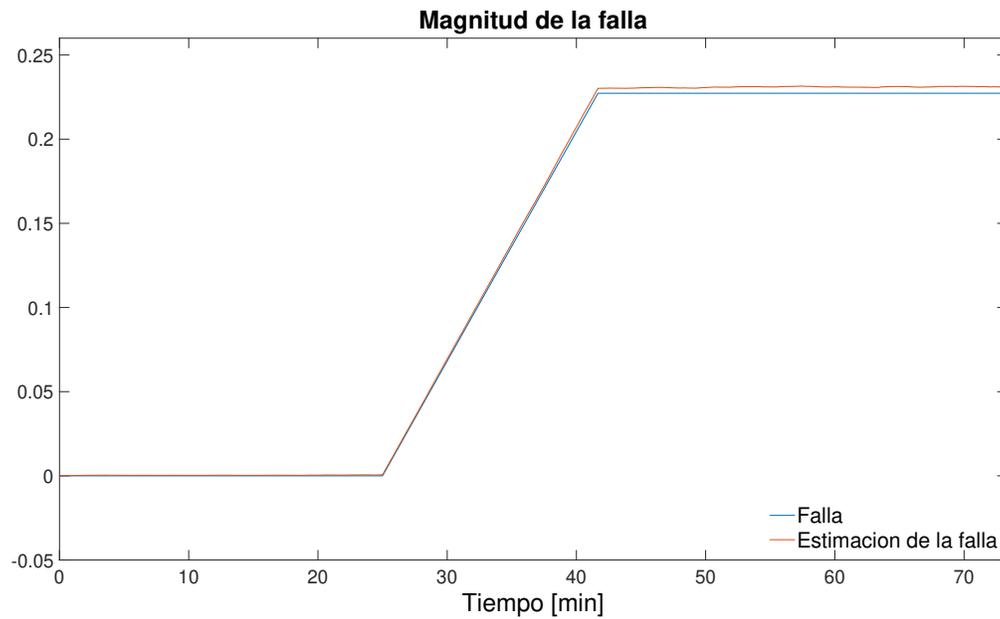


Fig. 5.34. Comparación de la falla incipiente en ω_r t su estimación

5.3.2. Conclusión de Escenario 3

El propósito de este escenario de falla es probar el esquema de diagnóstico de fallas propuesto ante fallas de tipo incipientes, dando resultados permisibles para la estimación de la falla, a pesar de un pequeño error en estado estable. Sin embargo, para la etapa de detección en el instante en el que ocurre la falla y localización del sensor fallado los resultados fueron buenos.

5.4. Escenario 4. Falla intermitente

El objetivo de este escenario es mostrar el funcionamiento del esquema de diagnóstico de fallas para fallas de tipo intermitentes. Una falla de tipo intermitente puede ser expresada como:

$$y_f(t) = y(t) + k \quad (5.10)$$

donde $y_f(t)$ es la salida con falla, $y(t)$ es la salida libre de falla y k es ganancia.

5.4.1. Simulación 7. Falla en el sensor de la velocidad angular del generador, ω_g

En la presente simulación se supone una falla en sensor, aditiva y de tipo intermitente, ocurriendo desde el minuto 2.5 con una amplitud equivalente a +10 % y un periodo de 8.3 min hasta el término de la simulación. En la Fig. 5.35 se muestra gráficamente la falla intermitente.

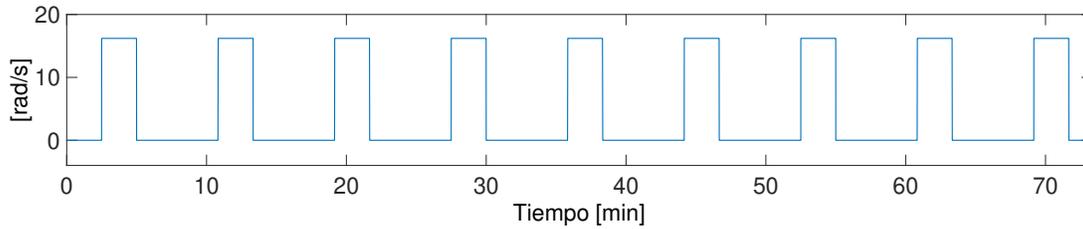


Fig. 5.35. Falla intermitente para simulación 7.

El perfil de viento utilizado para esta simulación tiene el siguiente rango de variación $v_w(t) = [3m/s, 25m/s]$ y el torque del generador varía entre $\tau_g(t) = [0, 3.1 \times 10^4 Nm]$. Ambas entradas de la caja de transmisión se muestran en la Fig. 5.36.

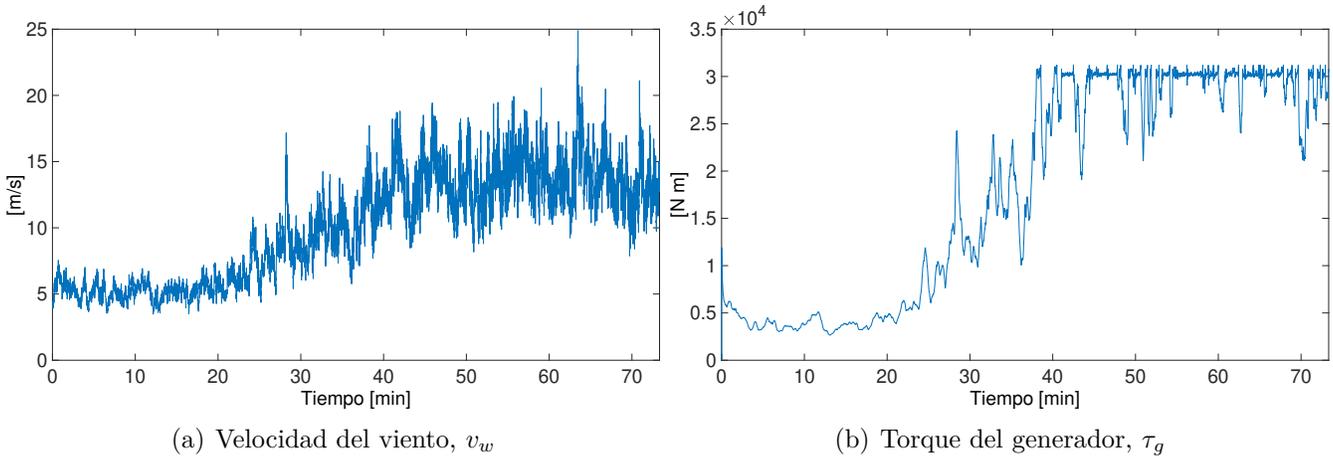


Fig. 5.36. Entradas para la simulación 7.

Se simuló el benchmark de la turbina eólica considerando las entradas de la Fig. 5.36 y la falla de la Fig. 5.35. La Fig. 5.37 muestra los dos estados medibles de la caja de transmisión comparándolos con las salidas del observador TS. Dado las condiciones de diseño del observador, permite **detectar** la presencia de una falla.

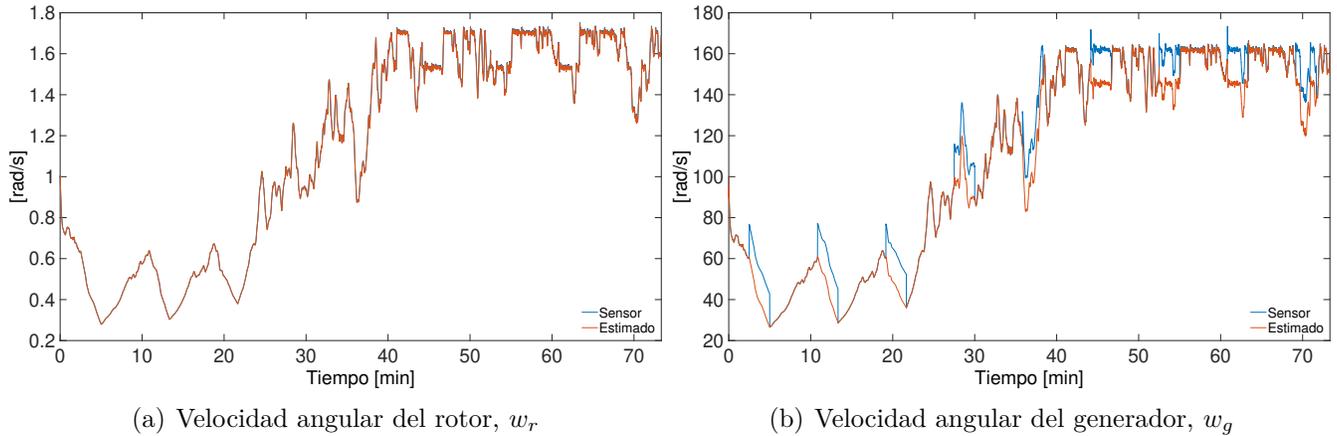


Fig. 5.37. Comparación de mediciones reales y estados estimados para la simulación 7.

En la Fig. 5.37 (a) se observa que la velocidad angular del rotor $\omega_r(t)$, tiene un comportamiento diferente al ocurrir una falla en el sensor de la velocidad angular del generador $\omega_g(t)$, esto debido a que, $\omega_r(t)$ es una de las entradas del controlador haciendo que la entrada de la caja de transmisión $\tau_g(t)$ compense la falla. En la Fig. 5.38 se muestra la comparación entre el torque del generador $\tau_g(t)$, libre de falla y con la falla.

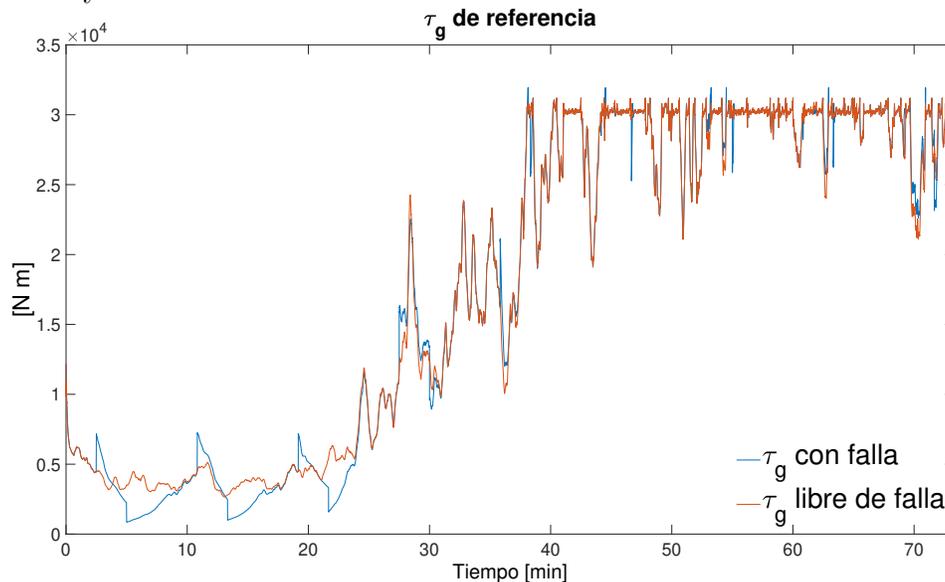


Fig. 5.38. Comparación del torque del generador en caso libre de falla y para falla intermitente en ω_g .

En la Fig. 5.39 se observa que en el residuo 2 por unos cuantos minutos se sobrepasa los umbrales previamente definidos, generando de esta forma un síntoma, mientras que el residuo 1 se mantiene dentro de los umbrales definidos.

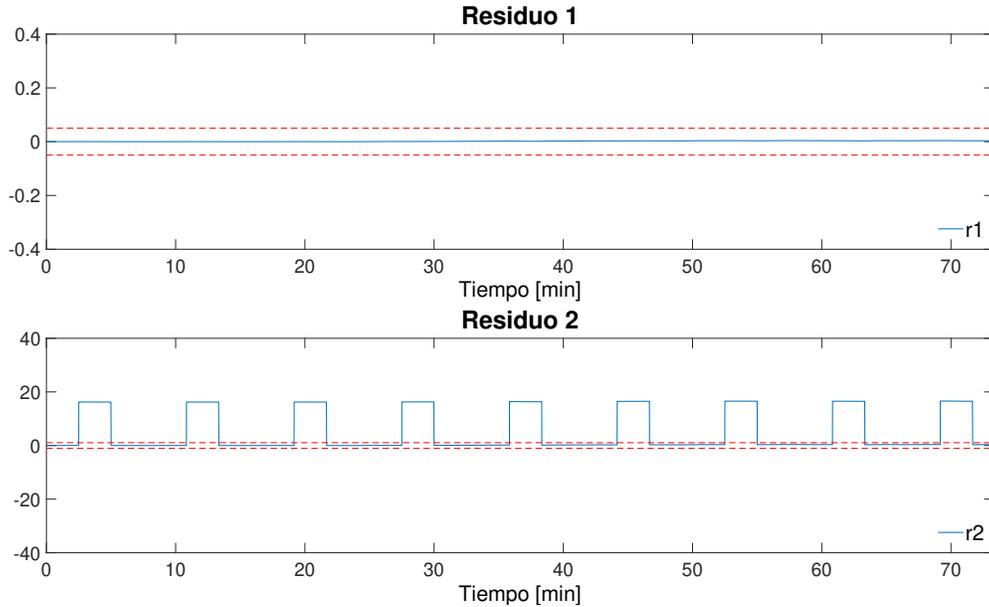


Fig. 5.39. Evolución de los residuos ($r1$ y $r2$) para falla abrupta en ω_r .

Los síntomas generados a partir de la interpretación de los residuos se pueden observar en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Síntomas de generados en simulación 7.

Residuos	
$r1$	$r2$
0	1

Después de generados los síntomas en la evaluación de residuos se realiza la etapa de decisión, en donde se comparan los síntomas generados contra la matriz de firma de fallas mostrada en la tabla 4.1, pudiendo **localizar** que ocurre una falla en el sensor de la velocidad angular del generador (ω_g).

Para **estimar** la magnitud de la falla se realiza la diferencia entre la salida estimada y la medición del sensor con falla, obteniendo la magnitud de la falla, como se muestra en la Fig. 5.40.

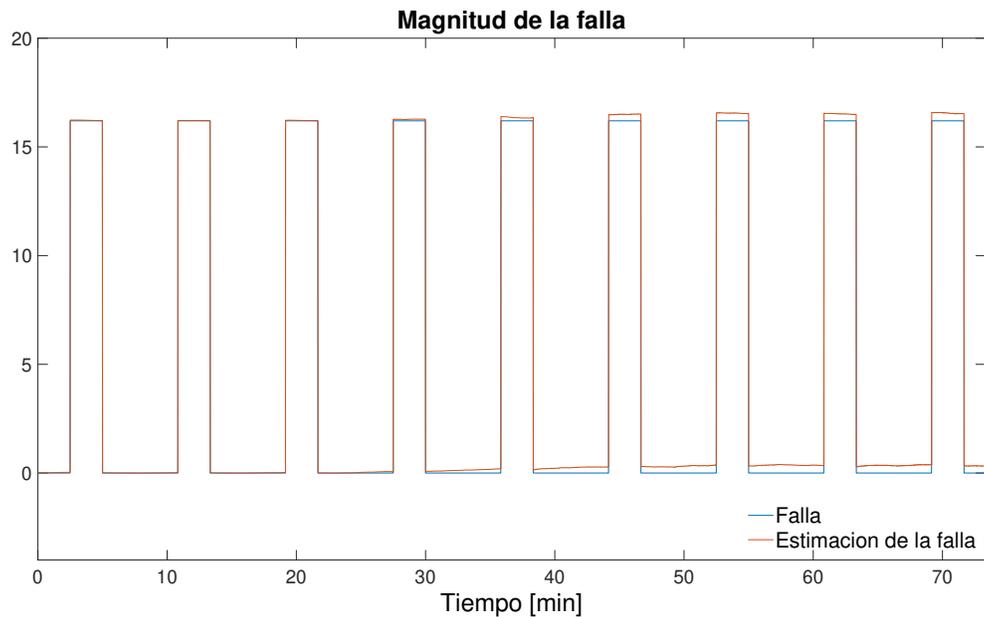


Fig. 5.40. Comparación de la falla intermitente en ω_g y su estimación

5.4.2. Conclusión de Escenario 4.

Para este último escenario de falla se mostraron resultados aceptables sobre el desempeño del esquema de diagnóstico. Para este escenario al simular una falla en el sensor de la velocidad angular del generador $\omega_g(t)$ y a su vez ser una de las entradas del controlador, la entrada $\tau_g(t)$ cambia tratando de ajustar la falla ocurrida en $\omega_g(t)$. Este ajuste afecta al primer estado $\omega_r(t)$. Sin embargo, el residuo del primer estado en ningún momento rebasa los umbrales definidos, dando una localización de fallas acertada.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo de investigación se abordó el problema del diagnóstico de fallas, como caso de estudio se presentó el benchmark de una turbina eólica de tipo horizontal, la cual se encuentra dividida por sub-sistemas. Acotando el trabajo se utilizó únicamente el sub-sistema de la caja de transmisión, debido a que es considerada como una de las partes de la turbina eólica con más fallas de funcionamiento, mismas que pueden llegar a provocar severos daños a la estructura interna y externa de la turbina eólica.

Durante el desarrollo del presente trabajo de tesis se abordó la teoría de sistemas TS, así como la teoría básica de observadores y diagnóstico de fallas basado en modelo. También se profundizó sobre el funcionamiento de la turbina eólica analizando todas sus partes, observando que las fallas en un sub-sistema pueden afectar el funcionamiento de otros.

Considerando el modelo matemático de la caja de transmisión de la turbina eólica, se observó que contiene una no linealidad en la entrada, por tanto, haciendo sustituciones se logró contener esa no linealidad en la matriz de actuadores del sistema. Con la finalidad de utilizar teoría lineal en el planteamiento del sistema y en el diseño de observadores, se decidió utilizar un enfoque TS. Se utilizó el enfoque del sector no lineal para obtener el modelo TS de la caja de transmisión, el cual se comparó con el modelo no lineal y se validó que representa la misma dinámica dentro de los parámetros establecidos.

Se diseñó un esquema de diagnóstico de fallas en sensores basado en modelo para la caja de transmi-

sión de una turbina eólica tipo horizontal utilizando un observador TS con generación de residuos basado en minimizar el efecto de las fallas en los estados estimados y maximizar el efecto de las fallas en los residuos. Para garantizar la estabilidad del observador se utilizó el método directo de Lyapunov, encontrando que las condiciones de estabilidad para este observador se muestran como desigualdades matriciales lineales. También se definieron umbrales fijos para la evaluación de residuos y de esta forma detectar y localizar las fallas.

Los resultados obtenidos en simulación prueban que el esquema de diagnóstico es eficiente para realizar las tareas de detección, localización y estimación de las fallas en sensores para cuatro escenarios de falla; en el primer escenario se simularon fallas de tipo abruptas, en el segundo de valor fijo, en el tercero de tipo incipiente y en el último se simuló una falla de tipo intermitente. Sin embargo, es importante mencionar que al realizar las simulaciones se observó un cambio no solo en las salidas y entradas del propio sistema, sino también en otros sub-sistemas que conforman la turbina eólica, debido a que esta se encuentra en lazo cerrado. Lo mencionado anteriormente afecta seriamente la generación de energía eléctrica siendo el principal objetivo de la turbina eólica. Para futuros trabajos se propone la realización de un esquema de control tolerante a fallas mediante el esquema de diagnóstico obtenido en esta investigación.

Bibliografía

- Blanke, Mogens, Michel Kinnaert, Jan Lunze, Marcel Staroswiecki y J Schröder (2006). *Diagnosis and fault-tolerant control*. Vol. 2. Springer.
- Chen, Jie y Ron J. Patton (2012). *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*. Vol. 3. Springer Science & Business Media.
- Feng, Xiaoran, Ron Patton y Zhihuo Wang (2014). Sensor fault tolerant control of a wind turbine via takagi-sugeno fuzzy observer and model predictive control. En: *International Conference on Control*. 480–485.
- Gray, Christopher S., Roxane Koitz, Siegfried Psutka y Franz Wotawa (2015). An abductive diagnosis and modeling concept for wind power plants. *IFAC-PapersOnLine* **48**(21), 404–409.
- Haghani, Adel, Minjia Krueger, Torsten Jeinsch, Steven X. Ding y Peter Engel (2015). Data-driven multimode fault detection for wind energy conversion systems. *IFAC-PapersOnLine* **48**(21), 633–638.
- Isermann, Rolf (2006). *Fault-diagnosis systems: An introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer Science & Business Media.
- Johansen, Tor Arne, Robert Shorten y Roderick Murray-Smith (2000). On the interpretation and identification of dynamic Takagi-Sugeno fuzzy models. *IEEE Transactions on Fuzzy systems* **8**(3), 297–313.
- Lendek, Zsófia, Thierry Marie Guerra, Robert Babuska y Bart De Schutter (2011). *Stability analysis and nonlinear observer design using Takagi-Sugeno fuzzy models*. Springer.
- Li, Shanzhi, Haoping Wang, Abdel Aitouche, Yang Tian y Nicolai Christov (2017). Actuator fault and disturbance estimation using the TS fuzzy model. *IFAC-PapersOnLine* **50**(1), 15722–15727.

- Lopez, Miguel, Jean-Claude Vannier y Daniel Sadarnac (2007). Sistemas de conversión de energía eólica control y diseño. En: *Asociation Chilienne de Contrôle Automatique*.
- Manrique, Rubén Francisco, Fabián Andrés Giraldo y Jorge Sofrony Esmeral (2012). Fault detection and diagnosis for wind turbines using data-driven approach. 1–6.
- Marcos, Andrés y Gary J Balas (2004). Development of linear-parameter-varying models for aircraft. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* **27**(2), 218–228.
- Odgaard, Peter Fogh, Hector Sanchez, Teresa Escobet y Vicenç Puig (2015). Fault diagnosis and fault tolerant control with application on a wind turbine low speed shaft encoder. *IFAC-PapersOnLine* **48**(21), 1357–1362.
- Odgaard, Peter Fogh, Jakob Stoustrup y Michel Kinnaert (2013). Fault-tolerant control of wind turbines: A benchmark model. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **21**(4), 1168–1182.
- Ogata, Katsuhiko y Yanjuan Yang (2010). *Modern control engineering*. Vol. 17. Pearson Upper Saddle River, NJ.
- Rodríguez, Cerón, Ernesto Alonso y Alejandro Javier Ventura Rodríguez (2018). Diseño de un controlador digital, para la velocidad de una Turbina Eólica. Tesis de Doctorado. Universidad de El Salvador.
- Rodríguez, Leonardo Beltrán y Efraín Villanueva Arcos (2018). Reporte de avance de energías limpias primer semestre 2018. *Secretaría de Energía*.
- Sami, Montadher y Ron J. Patton (2012). Wind turbine sensor fault tolerant control via a multiple-model approach. En: *International Conference on Control*. IEEE. 114–119.
- Serra, F, G Catuogno, C De Angelo y G Bossio (2008). Sistemas de monitoreo de condición en turbinas eólicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **12**, 06–57.
- Shamma, Jeff S y James R Cloutier (1993). Gain-scheduled missile autopilot design using linear parameter varying transformations. *Journal of guidance, Control, and dynamics* **16**(2), 256–263.

- Tanaka, Kazuo y Hiroshi Ohtake (2001). Fuzzy modeling via sector nonlinearity concept. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers* **37**(4), 372–378.
- Tóth, Roland (2010). *Modeling and identification of linear parameter-varying systems*. Vol. 403. Springer.
- Verde, Cristina, Sylviane Gentil y Rubén Morales-Menéndez (2013). *Monitoreo y diagnóstico automático de fallas en sistemas dinámicos*. Trillas.
- Wang, Hua O, Kazuo Tanaka y Michael F Griffin (1996). An approach to fuzzy control of nonlinear systems: Stability and design issues. *IEEE transactions on fuzzy systems* **4**(1), 14–23.

Anexos

Anexo A

Banco de observadores

Para diseñar el esquema de detección y localización de fallas se utiliza un banco tipo DOS (Esquema de observadores dedicados) por la factibilidad de detectar fallas simultáneas en el sistema y determinar su localización mediante un procedimiento relativamente sencillo.

El esquema DOS utiliza todas las entradas y solo una salida para el diseño de los observadores, permitiendo localizar fallas múltiples, su diagrama se muestra en Figura A.1.

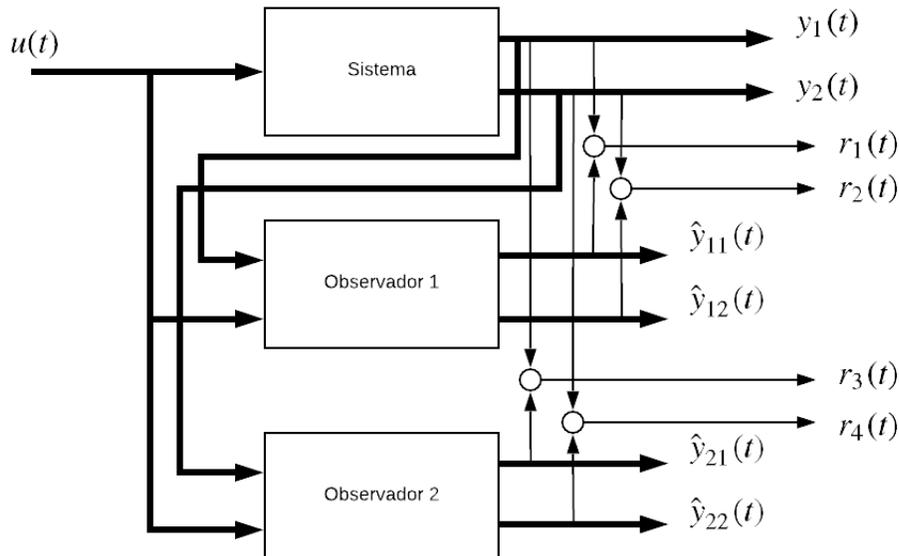


Fig. A.1. Esquema DOS

Cada observador es tipo Luenberger TS (A.1), donde la ganancia L se calcula con la fórmula de Ackerman de tal modo que al obtener un error en estado estable sea posible encontrar diferentes firmas de fallas para localizar cuál es el sensor dañado.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + \sum_{i=1}^m \omega_i(x(t))(B_i u(t) + L(y(t) - \hat{y}(t))), \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t).\end{aligned}\tag{A.1}$$

Para el observador 1 se considera la salida $y(t) = \omega_r(t)$, una vez que dicha salida cumple la propiedad de observabilidad, se propone la siguiente colocación de polos para la dinámica del error de estimación

$$P = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

obteniendo así la siguiente matriz L :

$$L = \begin{bmatrix} 2.8828 \\ -3981.4515 \\ 16.1030 \end{bmatrix}\tag{A.2}$$

Para el observador 2, se considera la salida $y(t) = \omega_g(t)$, utilizando la misma colocación de polos que el observador 1, se obtiene la matriz L de la forma:

$$L = \begin{bmatrix} -0.0020 \\ 2.8828 \\ -0.0111 \end{bmatrix}\tag{A.3}$$

En la Figura A.1 se muestra que cada observador puede estimar los estados del sistema y simultáneamente generar residuos.

Cada residuo está dado por:

$$\begin{aligned}r_1 &= y_1(t) - \hat{y}_{11}(t) \\ r_2 &= y_2(t) - \hat{y}_{12}(t) \\ r_3 &= y_1(t) - \hat{y}_{21}(t) \\ r_4 &= y_2(t) - \hat{y}_{22}(t)\end{aligned}\tag{A.4}$$

A.1. Prueba del esquema de detección y localización de fallas

Las mediciones de las velocidades angulares tanto del rotor como del generador se realizan utilizando encoders. Las fallas en encoder pueden deberse tanto a fallas eléctricas como mecánicas, lo

que resulta en un valor fijo o un factor de ganancia cambiante en las mediciones. En caso de una falla de valor fijo, la salida del encoder no se actualiza con nuevos valores y la falla de factor de ganancia se introduce cuando el sensor detecta más lecturas en la parte giratoria. Este escenario puede suceder como resultado de suciedad u otras lecturas falsas en la parte giratoria (Odgaard *y col.* (2013)).

A.1.1. Escenarios de falla.

Según lo descrito anteriormente se pueden simular dos escenarios de fallas diferentes. El primer escenario se presenta cuando el factor de ganancia cambia del que tendría que ser y el segundo cuando el encoder se queda en un valor fijo, es decir, no cambia el último valor registrado, y después de cierto tiempo vuelve a funcionar con normalidad.

En el escenario de falla 1 se simuló una falla abrupta del 20% en el segundo 1300, primero simulando la falla en el sensor de la velocidad angular del rotor (Figura A.1) obteniendo como resultados los residuos Figura A.2.

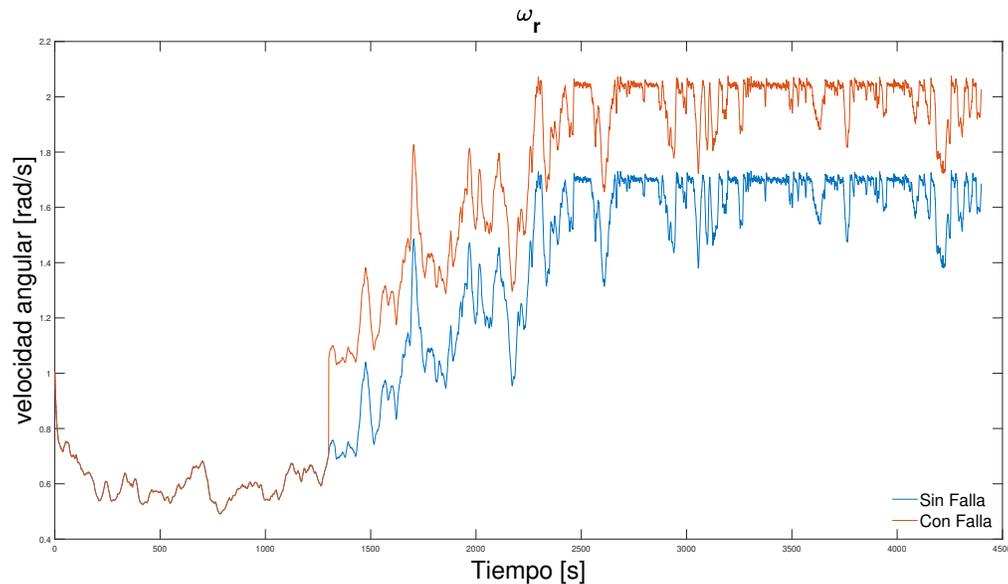


Fig. A.1. Falla abrupta en ω_r

A.1. PRUEBA DEL ESQUEMA DE DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS

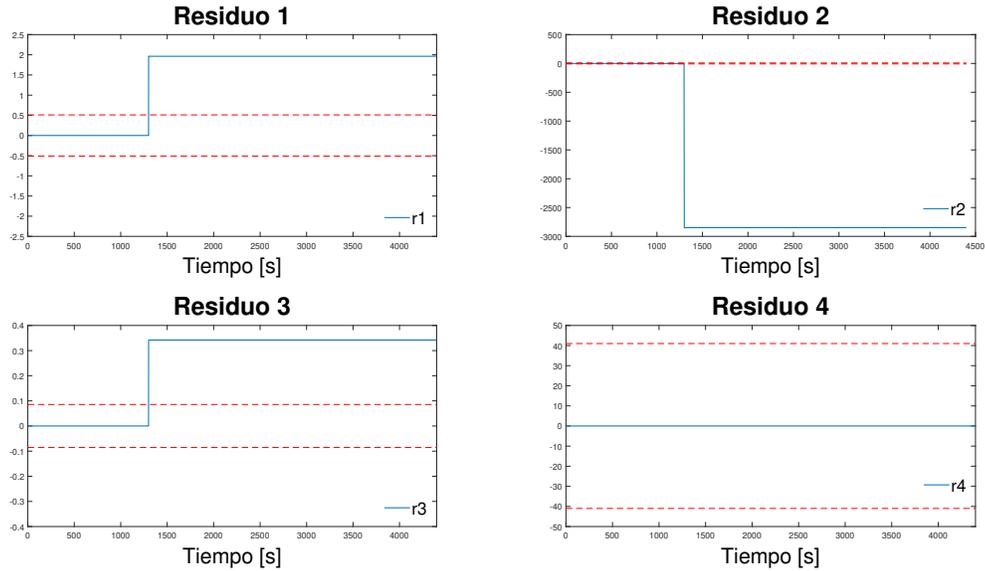


Fig. A.2. Residuos, escenario de falla 1 ω_r

A continuación, se presenta la simulación de una falla abrupta del 15% en el segundo 3000 pero ahora en el sensor de la velocidad angular del generador (Figura A.3) obteniendo los residuos Figura A.4.

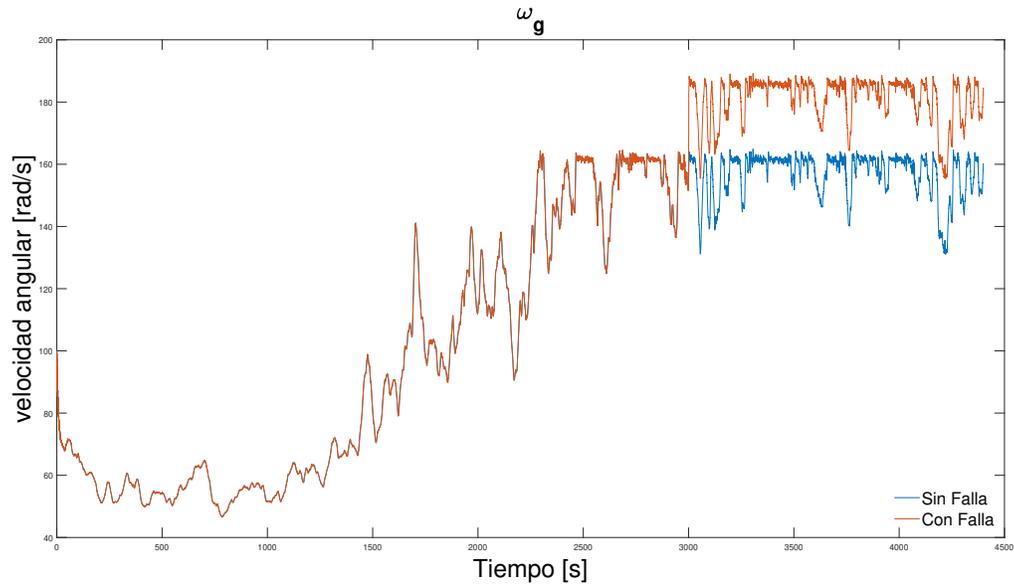


Fig. A.3. Falla abrupta en ω_g

A.1. PRUEBA DEL ESQUEMA DE DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS

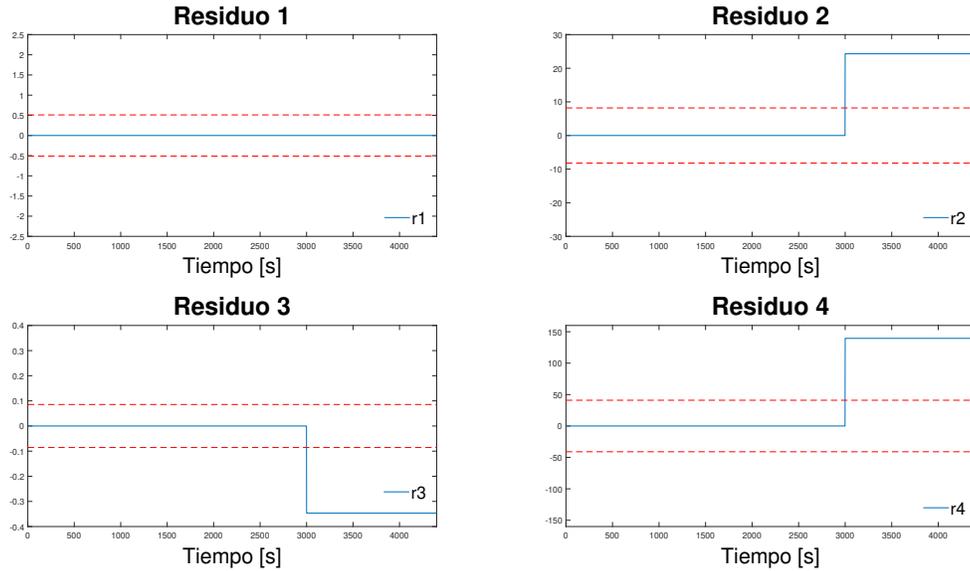


Fig. A.4. Residuos, escenario de falla 1 ω_g

En el escenario de falla 2 se simuló una falla en el segundo 2000 emulando que el encoder se quedó pegado durante 1000 segundos y después vuelve a retomar la lectura correcta de la velocidad angular del rotor (Figura A.5), donde se obtuvieron los residuos ilustrados en la Figura A.6.

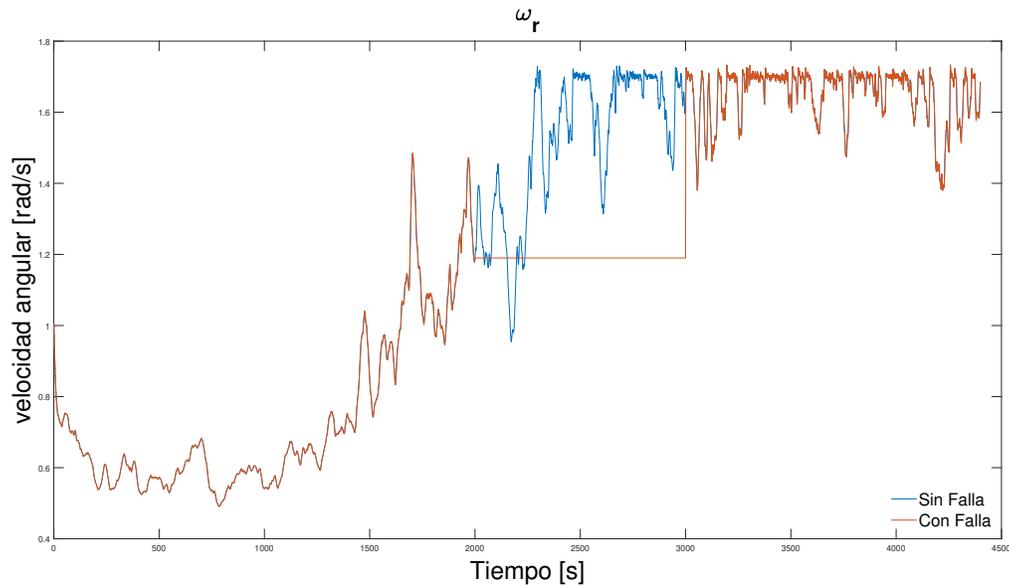


Fig. A.5. Falla abrupta en ω_r por falta de lectura.

A.1. PRUEBA DEL ESQUEMA DE DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS

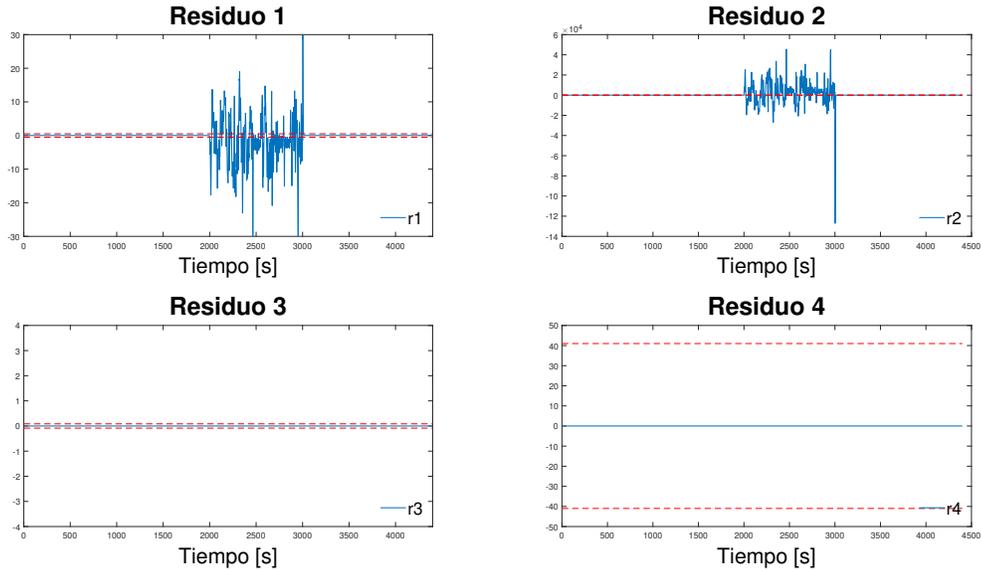


Fig. A.6. Residuos, escenario de falla 2 ω_r por falta de lectura.

Después se simuló una falla en el segundo 1000 y después de 500 segundos retoma la lectura correcta de la velocidad angular del generador (Figura A.7) obteniendo los residuos de la Figura A.8.

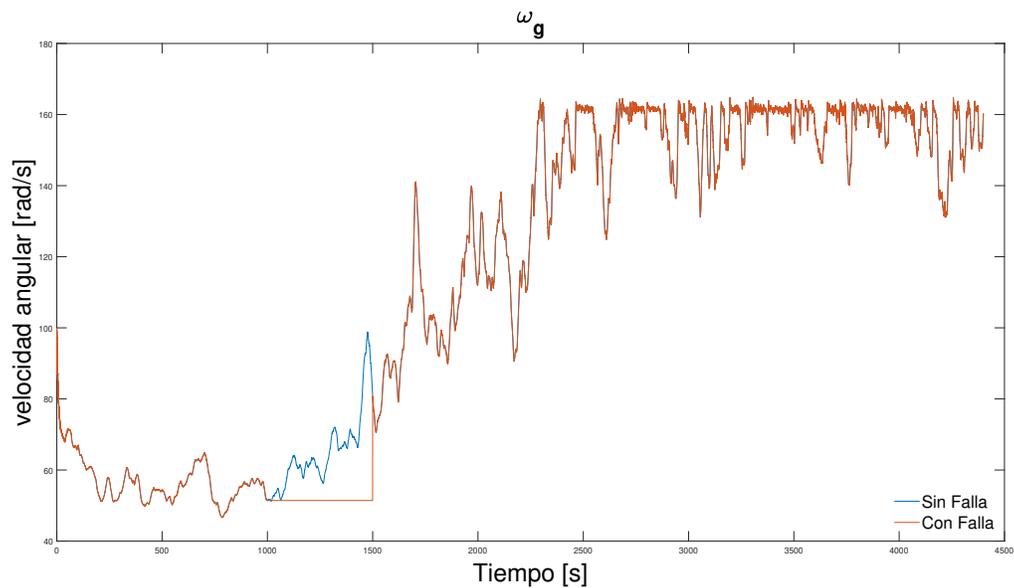


Fig. A.7. Falla abrupta en ω_g por falta de lectura.

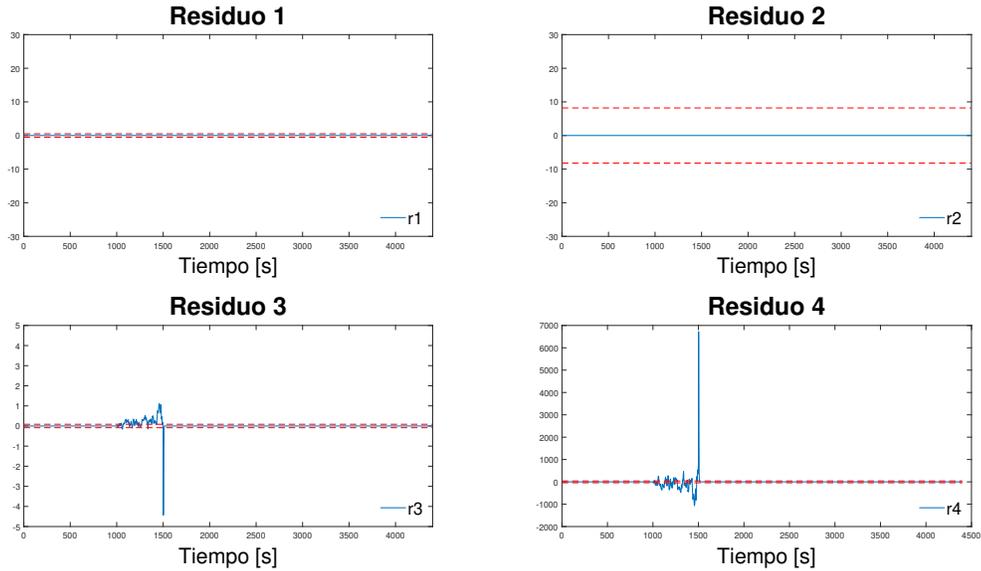


Fig. A.8. Residuos, escenario de falla $2 \omega_g$

A.1.2. Firma de fallas

Al hacer la evaluación de residuos se puede obtener una firma de cada falla en particular como se muestra en la Tabla A.1.1.

	Caso Falla 1		Caso Falla 2	
	ω_r	ω_g	ω_r	ω_g
R1	M	0	M	0
R2	M	M	0	M
R3	M	M	M	0
R4	0	M	0	M

Tabla A.1.1. Firma de fallas

A.1.3. Conclusión

El esquema de diagnóstico creado y presentado en Anexos A, solo es capaz de detectar y localizar fallas en sensores, pero no estimarlas como es deseado.

Anexo B

Simulación con perfil de viento ideal

En la presente simulación se generó una velocidad de viento ideal que varía entre los $3m/s$ hasta los $25m/s$ con una forma sigmoide como se muestra en la Fig. B.1 siendo generada en software simulink.

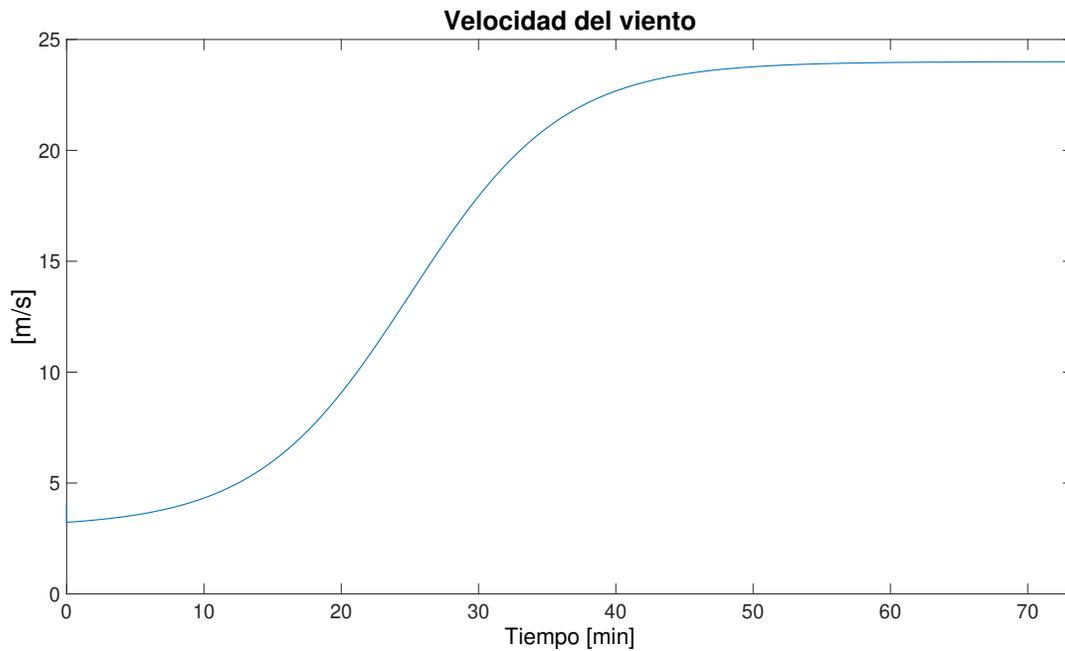


Fig. B.1. Velocidad del viento ideal

En la Fig. B.2 se puede observar la potencia generada utilizando el perfil de viento ideal, a su vez en la Fig. B.3 se observa la velocidad angular del rotor, de igual manera utilizando el perfil de viento ideal.

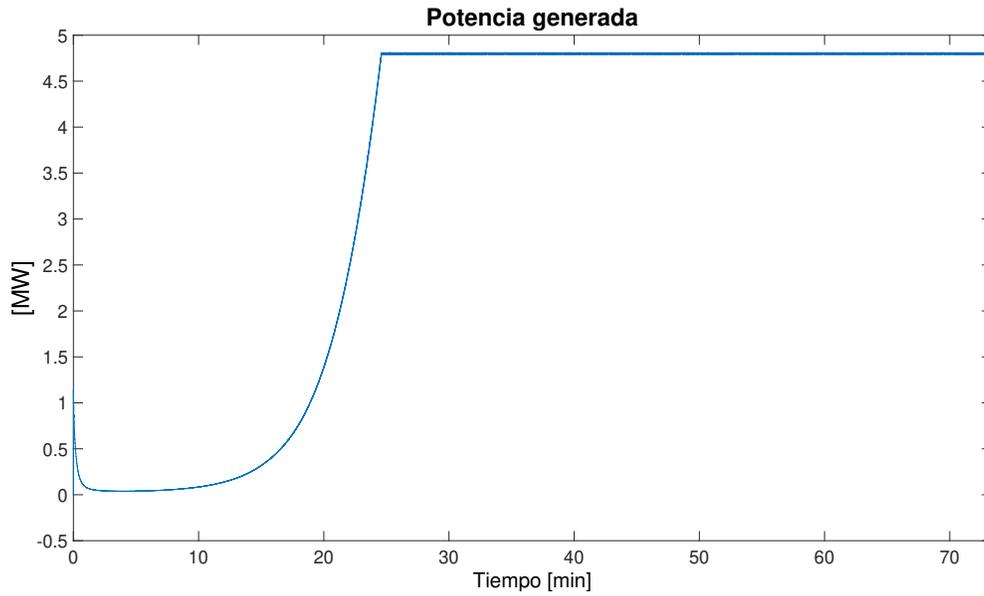


Fig. B.2. Potencia generada con viento ideal

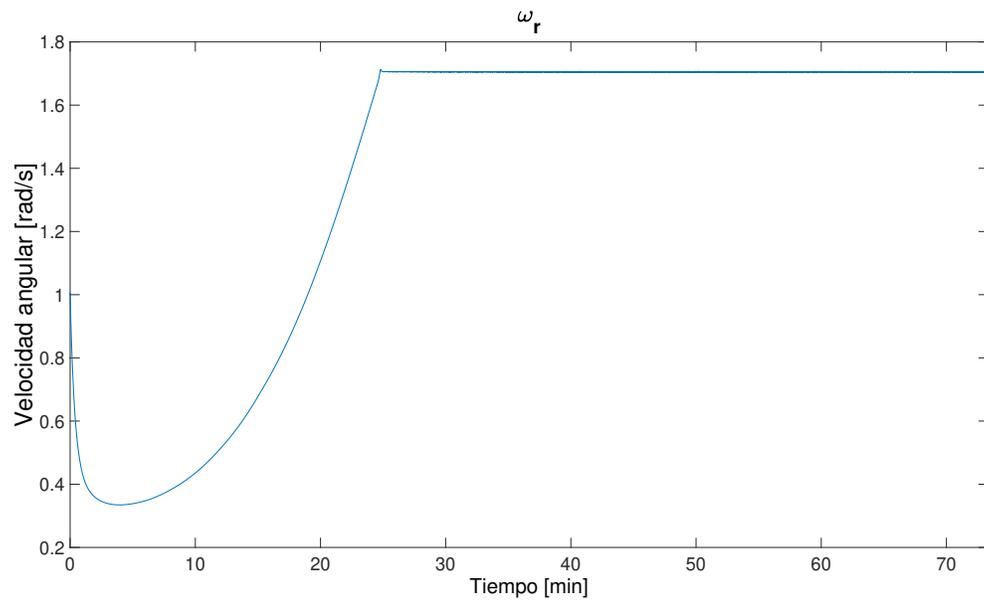


Fig. B.3. Velocidad angular del rotor con viento ideal

En Fig. B.4 se puede observar la interpolación de las funciones de pertenencia y su sumatoria que siempre debe ser igual a 1. Lo interesante de esta figura es cuando el controlador se encuentra en el modo 1 (entre los $3m/s$ a los $12.5m/s$) las funciones de ponderación se ven normales, pero un momento después de que se superan los $12.5m/s$ el controlador cambia al modo 2 y se puede observar cómo se satura las funciones de ponderación.

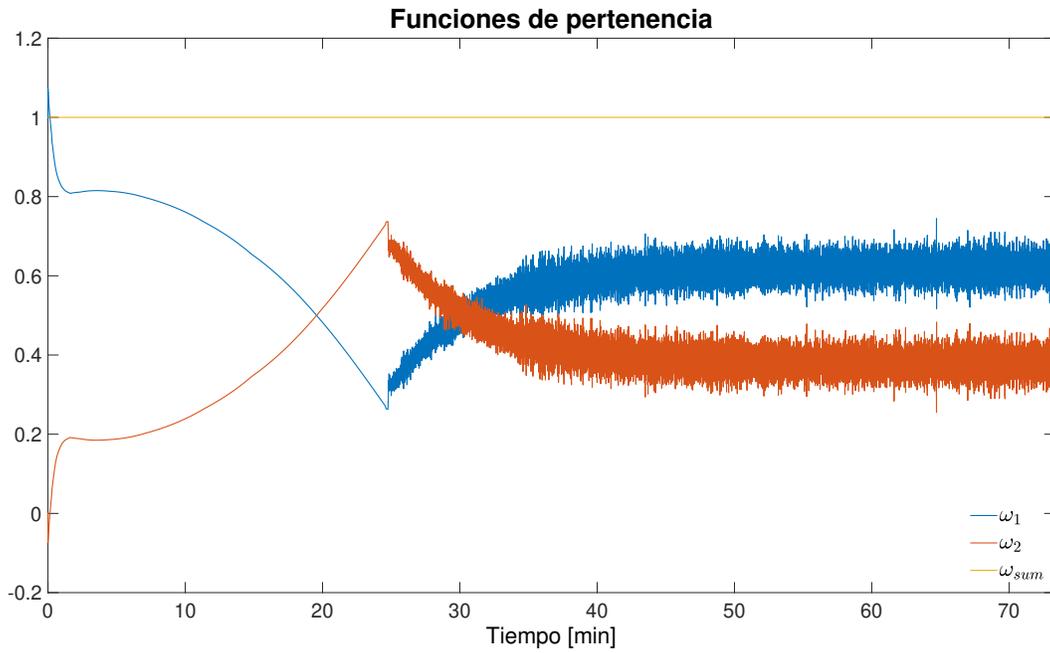


Fig. B.4. Funciones de pertenencia con viento ideal