



**Modelado e identificación  
para la detección de  
dinámicas de comportamiento  
en generadores de inducción  
doblemente alimentados**

Jorge Patricio Murillo Oviedo  
Francisco Herrera Fernández  
Lesyani Teresa León Viltre



# **Modelado e identificación para la detección de dinámicas de comportamiento en generadores de inducción doblemente alimentados**

# **Modelado e identificación para la detección de dinámicas de comportamiento en generadores de inducción doblemente alimentados**

**Jorge Patricio Murillo Oviedo  
Francisco Herrera Fernández  
Lesyani Teresa León Viltre**

Título original: Modelado e identificación  
para la detección de  
dinámicas de comportamiento  
en generadores de inducción  
doblemente alimentados

© Jorge Patricio Murillo Oviedo  
Francisco Herrera Fernández  
Lesyani Teresa León Viltre

2020,  
Publicado por acuerdo con los autores.  
© 2020, Editorial Grupo Compás  
Universidad Técnica Estatal de Quevedo  
Guayaquil-Ecuador

Grupo Compás apoya la protección del copyright, cada uno de sus  
textos han sido sometido a un proceso de evaluación por pares  
externos con base en la normativa del editorial.

El copyright estimula la creatividad, defiende la diversidad en el  
ámbito de las ideas y el conocimiento, promueve la libre expresión y  
favorece una cultura viva. Quedan rigurosamente prohibidas, bajo las  
sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total o  
parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la  
portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus  
medios, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de  
grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del  
copyright.

Editado en Guayaquil - Ecuador

ISBN: 978-9942-33-270-7

Cita.

Murillo. J. Herrera. F, León. L. (2020) Modelado e identificación para la detección de dinámicas de comportamiento en generadores de inducción doblemente alimentados, Editorial Compás, Guayaquil Ecuador, 106 pag

## Contenido

Índice de tablas.....	iv
Índice de ilustraciones .....	v
Prólogo.....	viii
Introducción.....	1
Capítulo 1. Caracterización del DFIG/WECS (Generador de Inducción Doblemente Alimentado y Componentes del Sistema).....	7
Modelado .....	8
El sistema de control en el DFIG .....	17
Turbina eólica .....	25
No linealidades. Saturación .....	28
Fundamentos de los métodos de identificación .....	34
Capítulo 2.- Modelado Del Dfig-Wecs.....	39
Modelado de los Sistemas de Conversión de Energía del Viento basados en el Generador de Inducción Doblemente Alimentado DFIG-WECS .....	39
Modelado del general del sistema DFIG-WECS .....	39
Modelado de la saturación .....	41
Generación de huecos de tensión.....	44
Resultados del Modelo DFIG en condiciones estables .....	46
Resultados con el Modelo DFIG con saturación y sin saturación, simulados con huecos de tensión a diferentes velocidades de viento. ....	48
Resultados con el Modelo DFIG con saturación y sin saturación, simulados con disturbios, y varios huecos de tensión. ....	52
Comparación entre los modelos saturados y no saturados.....	56
Capítulo 3.- identificación en los DFIG. ....	60
Consideraciones para la identificación .....	60
Sobre el lazo cerrado.....	61
Sobre la velocidad del viento. ....	64
Sobre los disturbios .....	65
Sobre las variables de salida.....	67

Sobre los datos para la identificación .....	68
Preparación de los datos para la identificación .....	69
Entrada: Patrón de huecos .....	70
El sistema de Identificación .....	72
Identificación Lineal.....	73
Análisis de resultados .....	81
Capítulo 4. Modelado e identificación inteligente en el DFIG .....	88
Consideraciones para la identificación inteligente .....	88
El modelo difuso Takagi-Sugeno .....	91
Algoritmo para la identificación .....	93
Resultados experimentales .....	94
Resultados experimentales .....	96
Conclusiones.....	104
Bibliografía.....	106

## Índice de tablas

Tabla 1: Características del DFIG [17] .....	40
Tabla 2: Valores de tensión y corriente del estator para hallar la curva de magnetización.....	41
Tabla 3: Valores de tensión y $L_m$ calculado para cada punto de tensión aplicado .....	41
Tabla 4: Índices de calidad promedio obtenidos en la identificación ....	75
Tabla 5: Índices de calidad obtenido en identificación no lineal .....	82
Tabla 6: Índices de calidad obtenido en identificación no lineal utilizado WH .....	84

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Países con más capacidad de potencia eólica instalada en GW .....	7
Ilustración 2: Velocidad promedio del viento en Holguín-Cuba .....	8
Ilustración 3: Esquema básico de un DFIG aplicado en generación eólica. ....	9
Ilustración 4: Diagrama de bloques general del esquema de control propuesto. ....	17
Ilustración 5: Diagrama de bloques del control del convertidor del lado de la máquina. ....	23
Ilustración 6: Diagrama de bloques general del esquema de control propuesto. ....	25
Ilustración 7: Superficie bicúbica que representa al coeficiente de potencia $C_p$ . ....	27
Ilustración 8: Principio de funcionamiento de la identificación aplicada .....	36
Ilustración 9: Modelo identificado como relación de salida a entradas. ....	36
Ilustración 10: Procedimiento general de identificación [87] .....	37
Ilustración 11: Modelo en Simulink DFIG-WECS .....	40
Ilustración 12: Configuración de los parámetros de Lookup Table .....	42
Ilustración 13: Bloque Eq.7 a 10 para el cálculo de las corrientes .....	43
Ilustración 14: Bloque Eq. 7 a 10 con cambios en el sub-bloque Gain ....	43
Ilustración 15: Huecos de tensión tomados de una simulación del sistema electroenergético cubano. ....	44
Ilustración 16: Bloque para generar huecos y sobretensiones .....	45
Ilustración 17: Huecos de tensión de 70% de la tensión nominal de 110 milisegundos de duración .....	45
Ilustración 18: Curvas de velocidad del rotor, a velocidades de viento de 4, 5 y 6 m/s.....	47
Ilustración 19: Curvas de potencia activa, a velocidades de viento de 4, 5 y 6 m/s con y sin saturación .....	47

Ilustración 20: Huecos de tensión para la simulación a diferentes velocidades .....	48
Ilustración 21: Potencia activa, con y sin saturación a huecos de tensión de 60% y Velocidad de viento 4, 5 y 6 m/s .....	49
Ilustración 22: Potencia reactiva, con y sin saturación a huecos de tensión de 60% y Velocidades de viento de 4, 5 y 6 m/s. ....	49
Ilustración 23: Velocidad del rotor, con y sin saturación a huecos de tensión de 60% y Velocidad de viento 4, 5 y 6 m/s.....	50
Ilustración 24: Torque electromagnético, con y sin saturación a huecos de tensión de 60% y Velocidad de viento 4, 5 y 6 m/s.....	51
Ilustración 25: Pares de huecos de tensión 60%, 32%, 60%, 70%, 32% y 70% de la tensión nominal .....	52
Ilustración 26: Curvas de potencia y velocidad del rotor para la velocidad del viento 6 m/s. ....	52
Ilustración 27: Curvas de potencia y velocidad del rotor para la velocidad del viento 5 m/s .....	53
Ilustración 28: Curvas de potencia y velocidad del rotor para la velocidad del viento 4 m/s .....	54
Ilustración 29: Curvas de potencia y velocidad para la velocidad del viento 5 m/s y 6 m/s .....	54
Ilustración 30: Curva de inductancia de magnetización $L_m$ , en función del patrón de huecos de tensión a velocidad del viento 6 m/s .....	55
Ilustración 31: Curvas de Potencia activa con disturbios, huecos de 60% del valor nominal con y sin saturación. ....	57
Ilustración 32: Curvas de Potencia reactiva con disturbios, huecos de 60% del valor nominal con y sin saturación. ....	58
Ilustración 33: Curvas de la velocidad del rotor con disturbios, huecos de 60% del valor nominal con y sin saturación. ....	58
Ilustración 34: Curvas de torque electromagnético con disturbios, huecos de 60% del valor nominal con y sin saturación. ....	59
Ilustración 35: lazo cerrado de velocidad del rotor.....	62

Ilustración 36: Huecos de tensión tomados de una simulación del sistema electroenergético cubano. ....	66
Ilustración 37: Patrón de huecos de tensión .....	67
Ilustración 38: Respuesta temporal de Potencia activa y velocidad del rotor para juegos de patrones de huecos.....	69
Ilustración 39: Ejemplo de patrón de huecos. ....	70
Ilustración 40: Espectro de potencia del patrón de huecos Ilustración 39 .....	71
Ilustración 41: Espectro de la velocidad del rotor del patrón de huecos	71
Ilustración 42: Valor efectivo de la potencia.....	72
Ilustración 43 Comparación de modelos sobre la respuesta a un hueco de tensión a velocidad 5m/s: .....	76
Ilustración 44: Modelo Hammerstein - Wiener [93] .....	78
Ilustración 45: Modelo Wiener - Hammerstein .....	80
Ilustración 46: Respuesta en la potencia activa al hueco de tensión .....	83
Ilustración 47: No linealidad entre dos regresores consecutivos (14 y 15)	84
Ilustración 48: Conceptos básicos del conjunto difuso evaluado por intervalos [115] .....	90
Ilustración 49: Variación en el valor efectivo de la potencia activa .....	96
Ilustración 50: Comparación del modelo con los datos reales.....	99
Ilustración 51: Variación en el valor efectivo de la velocidad del rotor ..	99
Ilustración 52: Variable Variación en Potencia Activa. Comparación del modelo con los datos reales.....	100
Ilustración 53: Comparación del modelo inteligente con modelo clásico. ....	101
Ilustración 54: Comportamiento de la función de pertenecía A11 .....	102

## Prólogo

El presente libro trata sobre modelado e identificación para la detección de dinámicas de comportamiento en generadores eólicos de inducción doblemente alimentados. En el modelado de este sistema se incluye y analiza el efecto de la saturación magnética en el generador, como un ejemplo de alinealidad, lográndose obtener y validar el comportamiento dinámico del sistema en presencia de la saturación, mediante técnicas de simulación en Simulink/MatLab. El modelo que incluye la saturación es utilizado para obtener los datos necesarios para el desarrollo de métodos de identificación adecuados para este tipo de sistema de generación, en presencia de disturbios como huecos de tensión, con el objetivo de obtener los mejores modelos que puedan representar este sistema en estas condiciones especiales de operación.

Las técnicas de identificación analizadas son tanto las lineales como las no lineales, además se utilizaron herramientas clásicas y otras basadas en inteligencia artificial. La investigación proporciona un procedimiento efectivo basado en un tipo de modelo neuro difuso para detectar las dinámicas de comportamiento en este tipo de sistemas, demostrando la efectividad de este.

## Introducción

Entre los grandes campos del accionar científico técnico que caracterizan actualmente la constante revolución industrial se encuentra la introducción de las más modernas tecnologías de la información y comunicaciones, concretamente la automática, mediante programas computacionales de alto nivel basados en modernos paradigmas de las ciencias matemáticas e informáticas aplicadas en las técnicas de identificación y control.

En particular en el campo de la automatización de procesos tecnológicos existe una creciente demanda de experimentación en la determinación del comportamiento dinámico de los mismos, lo cual ha motivado desde años recientes el desarrollo y aplicación de métodos de modelado matemático y herramientas computacionales para la implementación de nuevos algoritmos que permitan determinar estas dinámicas mediante procedimientos de identificación en una forma más eficiente y ajustada a este objetivo.

Concretamente el modelado e identificación de sistemas ha transitado por varias etapas de desarrollo, siendo la complejidad de los procesos a estudiar factor de desarrollo de métodos y algoritmos en este campo. Esta complejidad es determinada fundamentalmente por las características de incertidumbre, alinealidades y carácter variante con el tiempo que pueden presentarse independientes o combinadas, en los procesos.

Los métodos de la inteligencia artificial se han venido trabajando intensamente en su aplicación en los procedimientos de identificación, en lo que ya se empieza a denominar "identificación inteligente". Principalmente los métodos basados en sistemas difusos y en el paradigma de las redes neuronales constituyen el núcleo de los principales procedimientos de identificación de sistemas no lineales. Esto se

fundamenta por la correspondencia natural entre la naturaleza no lineal de estos sistemas con el carácter no lineal de estos procesos tecnológicos.

Por su parte el estudio del modelado de las alinealidades ha evolucionado con celeridad desde mediados del siglo pasado, aplicándose en el presente técnicas avanzadas basadas en herramientas de la inteligencia computacional. Las principales alinealidades tratadas en estos estudios han sido, entre otras, histéresis, saturación, zona muerta, fricción. Por ejemplo, la presencia de alinealidades es muy común en los sistemas de generación de energía eléctrica basados en máquinas eléctricas, debido a los procesos físicos que se presentan en estas máquinas, como en el resto de la tecnología instalada en estos sistemas de generación.

El considerar estas complejidades en los procesos parte de la necesidad de obtener los correspondientes modelos dinámicos no lineales más exactos, para lo cual hay que determinar los algoritmos de identificación más adecuados. Relacionados con estos procedimientos se incluye la determinación de los criterios de identificación y exactitud de los parámetros de los modelos a obtener, contando con herramientas computacionales que permitan hacer los experimentos de identificación con rapidez, precisión y eficiencia.

A la luz tema tratado en este trabajo de investigación se debe considerar que internacionalmente se desarrollan y aplican modernas tecnologías más eficientes en el aspecto energético, contando precisamente con las actuales tecnologías de la automatización e informatización. Ejemplo de ello son los intensos trabajos en sistemas de generación de energía eléctrica basados en fuentes renovables de energía (FRE), destacándose dentro de ellas la energía eólica, abundante en muchas regiones del mundo, por su contribución, entre otros factores, a la seguridad energética y los indicadores medio ambientales. Uno de los aspectos que se consideran

impulsores de este tipo de fuente renovable de energía es precisamente el propio desarrollo de esta tecnología, mediante la modernización de sus instalaciones.

Correspondiente a estos sistemas eólicos, los aerogeneradores se han convertido en el equipamiento para la generación de energía eléctrica con mayor tasa de crecimiento en número y potencia. Estos equipos se instalan en formación de grupos, constituyendo los denominados Parques Eólicos. Particularmente en el caso de Cuba el tema del aprovechamiento de la energía eólica es un aspecto plasmado en los documentos rectores del desarrollo socio económico. Cuba, aunque todavía con bajos niveles de generación, tiene un programa de desarrollo para alcanzar más de 600 MW por medio de 14 parques eólicos para el año 2030, [1].

Las anteriores direcciones de trabajo confluyen en el objetivo de lograr, por medio del desarrollo y aplicación de procedimientos de modelado e identificación, sistemas capaces de determinar dinámicas de comportamiento de estos generadores en los sistemas eólicos.

Los sistemas de generación eólica basados en Generadores de Inducción Doblemente Alimentados (DFIG, por sus siglas en inglés, como es común denominarlos), presentan como característica importante y necesaria de su funcionamiento el trabajar en lazo cerrado para la recuperación del sistema cuando presente problemas o fallas eléctricas, siendo la velocidad del rotor y la potencia entregada las variables tecnológicas fundamentales a considerar en el sistema. En este proceso existen varios sistemas de control en lazos cerrados, por lo que cualquier procedimiento de identificación a aplicar (sea experimental o ya algún sistema en explotación previamente desarrollado), tendrá que ejecutarse considerando esta condición.

La presencia de las alinealidades en estos sistemas de generación ha sido objeto de atención. Estas alinealidades se presentan tanto en el propio DFIG, como en otros elementos que forman parte del sistema, tales como la turbina, convertidores, etc., significando esto que este sistema debe ser considerado de carácter fuertemente no lineal. En particular la saturación magnética, aunque no es la única alinealidad presente en la máquina e incluso no es la fundamental en el sistema en su conjunto, constituye un elemento importante por el efecto que tiene en el comportamiento dinámico de la máquina propiamente dicha. Específicamente su efecto en los DFIG, ha sido objeto de estudio lográndose resultados en su modelado [2-8], comprobándose en todos los casos la necesidad de tener en cuenta estos efectos para lograr obtener modelos que reflejen adecuadamente el comportamiento del DFIG. Estos trabajos de modelado presentan varios enfoques que contribuyen a lograr mejorar el funcionamiento de los sistemas de generación eólica. Sin embargo, sobre la aplicación de procedimientos de identificación muy pocos trabajos se han realizado sobre DFIG con presencia de saturación, buscando nuevos métodos para proporcionar modelos más exactos. Esto significa la necesidad de continuar buscando alternativas de procedimientos de identificación que proporcionen mejores resultados en la identificación de estos sistemas, considerando las alinealidades que pueden estar presentes.

En lo relacionado con la generación eólica en sí, los vientos estables en Cuba tienen como principal característica que no son altos, determinando con ello los tipos de generadores eólicos a emplear. El problema está en cómo utilizar más eficientemente estos generadores en función del tipo de viento. Esto es un aspecto que hoy es tema que se trabaja intensamente en el campo internacional. Esto implica en primer lugar que es de suma importancia conocer cómo se comportan los generadores eólicos empleados en los sistemas eólicos que se instalan en Cuba, dada las

condiciones de estos sistemas trabajando en un sistema eléctrico aislado y con problemas de regulación primaria y secundaria y con una gran variabilidad del viento, entre otros factores adversos.

Los suministradores de estas tecnologías de generación eólica normalmente ofrecen sistemas de una potencia de generación específica. Cuando se les suministra los datos de viento y otros parámetros del lugar donde se instalará, entonces proporcionan un valor promedio de potencia, mientras que en el proceso de adaptación se obtiene una potencia generada específica. Esta situación implica que, normalmente las potencias generadas difieren de los valores proporcionados por el suministrador, significando con ello la imperiosa necesidad de investigar métodos y modelos de determinar el comportamiento dinámico específico en los sistemas eólicos instalados.

Por otra parte, el comportamiento de estos generadores en una instalación real está determinada por las condiciones de operación del sistema eléctrico al cual está generando. Estas condiciones pueden ser afectadas por las condiciones de variabilidad del viento y por fallos en el sistema eléctrico, entre ellos huecos de tensión y sobretensiones. Considerando que los sistemas eólicos se fundamentan en la generación de potencia en función del viento, entonces a los efectos de la presente investigación se considera la ocurrencia de huecos o sobretensiones condiciones especiales de operación. El determinar el comportamiento en estas situaciones en particular es un aspecto también de intenso trabajo actualmente, siendo el tema del modelado uno de estos temas de trabajo.

Las consideraciones anteriormente planteadas llevan a la situación que no se cuenta actualmente con procedimientos de identificación de aplicación general en sistemas de generación eólica (WECS, por sus siglas en inglés) basados en DFIG, que proporcionen modelos que describan el

comportamiento dinámico de estos sistemas en condiciones especiales de operación que pueden presentarse.

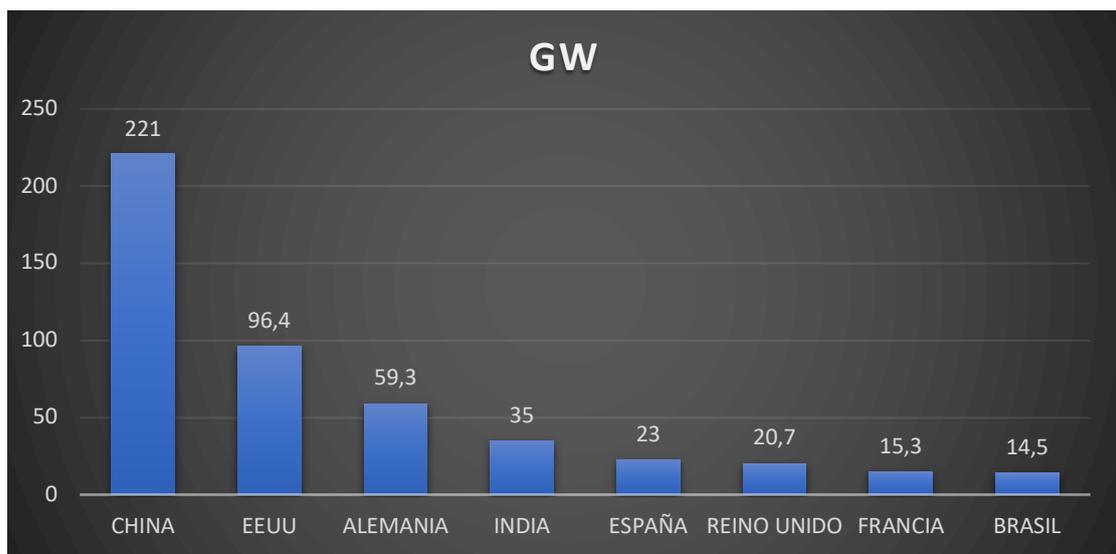
De las anteriores consideraciones en resumen se destacan los siguientes aspectos que caracterizan la situación respecto al modelado e identificación en un sistema de generación eólica basado en DFIG:

- Para una instalación real se necesita la aplicación de procedimientos de identificación capaces de determinar modelos que proporcionen información sobre el comportamiento real del sistema en determinadas condiciones de operación.
- Estos sistemas son marcadamente de característica no lineal, implicando con ello la importancia de considerar la presencia de alinealidades, siendo la saturación magnética una de las alinealidades más característica y necesaria a considerar.
- Las condiciones de variación del viento determinan los principales puntos o zonas de operación del sistema de generación.
- Ocurren fallos en los sistemas de generación (huecos de tensión y sobretensiones, entre otros) que causan variaciones en los principales indicadores de operación, principalmente en la potencia generada.

En resumen se presenta una problemática bien definida dada la presencia de condiciones especiales de operación provocados por huecos de tensión y sobretensiones en sistemas eólicos basados en DFIG, que presentan características no lineales en su comportamiento debido a la presencia de alinealidades, no se dispone de un procedimiento para la determinación de modelos dinámicos de estos sistemas que permita proporcionar información sobre el comportamiento dinámico de los mismos en esas condiciones especiales en un caso particular de un sistema real instalado.

## Capítulo 1. Caracterización del DFIG/WECS (Generador de Inducción Doblemente Alimentado y Componentes del Sistema).

La energía eólica es, sin duda, una de las fuentes de energía renovable muy utilizada en el mundo, junto con la solar que está teniendo un fuerte auge principalmente debido a la reducción de los costes y en los avances tecnológicos en paneles solares. La capacidad de potencia eólica instalada en todo el mundo crece año tras año. [3]



*Ilustración 1: Países con más capacidad de potencia eólica instalada en GW*

En la Ilustración 1 se aprecia como China es el líder mundial en energía eólica, con más de un tercio de la capacidad mundial, superando de largo los casi 97 GW de EE.UU., y muy por encima de Alemania, España e India. El crecimiento de China ha tenido lugar de forma espectacular, especialmente, en los últimos 10 años. [9].

Bajo este principio es importante hacer un análisis del funcionamiento y comportamiento de los sistemas de generación eólicos, este capítulo

pretende caracterizar el DFIG, como un elemento fundamental del sistema DFIG/WECS.

Los parámetros del sistema DFIG/WECS que se van a utilizar en esta investigación son datos reales del sistema instalado en Gibara 1, en Holguín, Cuba. Las condiciones del viento también son las de esta localización, con vientos desde 3 a 6 m/s. Esto se refleja en el mapa que se muestra a continuación.

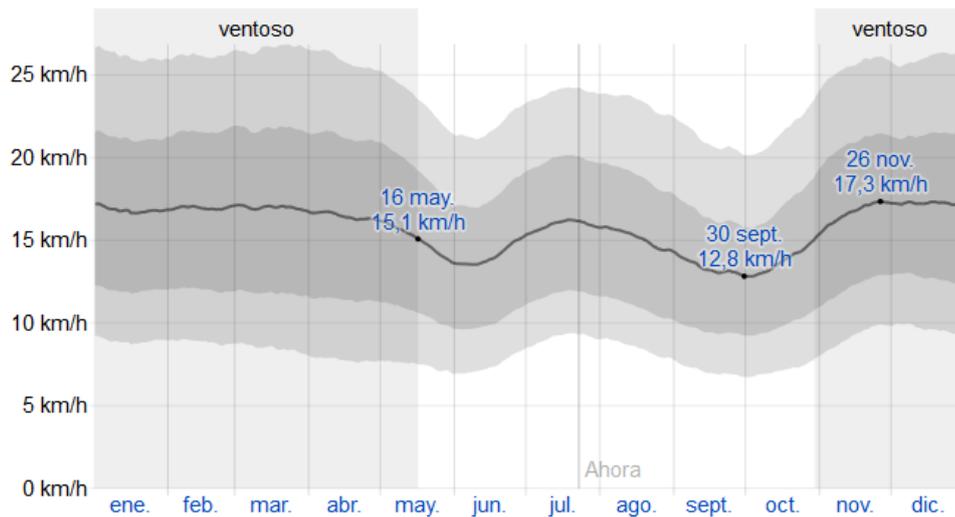


Ilustración 2: Velocidad promedio del viento en Holguín-Cuba

Fuente: El clima promedio en Holguín Cuba [10]

La línea negra de la Ilustración 2 muestra el promedio de la velocidad del viento en Holguín Cuba, según [10], lo que evidencia que no sobrepasa los 6 m/s

## Modelado

El Generador de Inducción Doblemente Alimentado (DFIG) es una máquina de inducción de rotor bobinado, con su circuito de rotor conectado a la red a través del sistema de convertidores de electrónica de potencia, mientras

que el estator es conectado directamente a la red según se observa en la Ilustración 3.

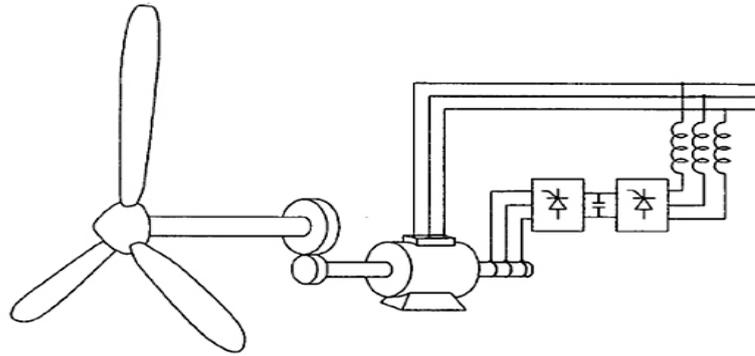


Ilustración 3: Esquema básico de un DFIG aplicado en generación eólica.

Muchos sistemas de generación eólica presentan como base fundamental de su estructura el generador de inducción doblemente alimentado, y sobre esta base se han realizado varias investigaciones tratando de mejorar principalmente los sistemas de control necesarios para obtener estabilidad en el sistema de generación, en años recientes muchas investigaciones han sido propuestas para proteger los convertidores de electrónica de potencia de los DFIG, y mejorar la estabilidad, a continuación, se hace un análisis de los diferentes estudios sobre el modelado del **DFIG**.

Existen algunos autores que han modelado el DFIG, para poder simular su comportamiento a diferentes condiciones, entre ellos están; [11], que utiliza un DFIG de control robusto para aplicaciones autónomas, descritas en [12], con un conjunto de ecuaciones matemáticas y proponen un modelo del DFIG estructurado en un modelo de espacios de estados para hacer identificación utilizando el filtro de Kalman.

En su trabajo [13], utiliza un modelo de estado estable del DFIG y un algoritmo de control de seguimiento del punto de máxima potencia (con

sus siglas en ingles MPPT) para capturar la máxima energía del viento, aumentando al máximo el poder mecánico de la turbina de viento y minimizando las pérdidas de cobre del DFIG, utilizando un algoritmo de control de corriente del rotor.

En su investigación [14], presenta un esquema de control del DFIG. El convertidor de potencia del lado de la red es modelado y controlado usando el vector de tensión orientado a los ejes dq, lo que garantiza que con la componente del eje d de la corriente se pueda controlar la potencia activa y, por consiguiente, la tensión del bus DC. La componente del eje q es forzada a cero para mantener un factor de potencia unitario. En el convertidor del lado del rotor se utiliza un control orientado al flujo del estator. Para la sincronización con la red utiliza un método novedoso basado en el método GDSC-PLL (Generalized delayed signal cancellation). Además, presenta un análisis del comportamiento del DFIG, ante huecos de tensión.

Los autores [15-16], utilizan el modelado del DFIG en el eje dq y simulan y analizan las oscilaciones de frecuencia, el ruido y la tensión de CC generados en la red de CA causados por la conmutación del convertidor back-to-back del generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) de una unidad eólica conectada a la red de distribución en MATLAB, en tiempo real, basado en el estándar IEC61000-4-30.

Así mismo en [16], se explica que hoy en día los DFIG, son mucho más eficientes y que son capaces de capturar más energía en comparación a los generadores de viento basados en velocidad fija. Consideran la flexibilidad en la operación, la producción a gran escala el esfuerzo mecánico de la turbina, capacidad de recuperarse de las fallas con pequeñas pérdidas en la conversión, haciendo a los DFIG más populares que todos en la generación variable, en su investigación propone la inclusión de un limitador de corriente de falla de estado sólido de tipo R

(SSFCL-R), lo compara con otros sistemas como el de una serie de resistencias de frenado dinámico (SDBR) y un limitador de corriente de falla de estado sólido de tipo LR (SSFCL-LR), concluyendo de la simulación en MatLAB/Simulink que el sistema propuesto presenta alta eficiencia en la estabilidad de los transientes del DFIG.

Investigadores como [15], trabajan sobre el diseño y análisis de un esquema de control de recorrido de fallas (FRTC) para un aerogenerador basado en DFIG, y utilizan un nuevo control de modo deslizante de terminal integral de segundo orden difuso (FSOITSMC) para el rotor y los convertidores del lado de la red y este diseño se complementa con un convertidor lateral de cuadrícula en serie (SGSC) para evitar la desconexión del DFIG de la red en condiciones defectuosas. El desempeño del control fue evaluado utilizando los modos de operación realistas del DFIG, como los modos normales, sub y súper-síncrono, considerando las fallas simétricas y asimétricas para evaluar aún más el desempeño del enfoque propuesto. Los resultados de la simulación demostraron la capacidad del esquema FRTC propuesto para controlar eficazmente las turbinas eólicas basadas en DFIG en diversas condiciones de operación.

Para este trabajo se va a utilizar el modelo del DFIG descrito por [18], en él explica que el rotor del generador de inducción de rotor bobinado es alimentado por el convertidor trifásico del lado de la máquina, que aplica un sistema trifásico de tensiones de frecuencia variable. La modificación de la amplitud y frecuencia de las corrientes del rotor, resulta en una modificación del par y, consecuentemente, de la velocidad de giro del rotor, cuyo objetivo es que la turbina eólica trabaje en el punto de máximo rendimiento cuando cambia la velocidad del viento [19].

El modelado descrito por [18, 2019], simplifica el sistema, referenciando todas las variables al estator y a un sistema de referencia en ejes  $dq$  girando

a la velocidad de sincronismo y orientado al fasor de tensión mediante la transformación de Park. Para obtener el ángulo  $\theta$  del sistema giratorio bastará con integrar la velocidad de sincronismo, descrita a continuación:

$$\theta = \int \omega_s dt = \int 2 \cdot \pi \cdot f_s dt \quad (1.1)$$

donde  $f_s$  es la frecuencia de la tensión de la red, 60 Hz. Por otra parte, existe una relación entre la tensión y la corriente de trabajo con el flujo magnético, tanto en el estator como en el rotor. Referido al estator, la tensión vendrá dada por

$$v_s^{\alpha\beta} = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (1.2)$$

donde:  $R_s$  es la resistencia del estator,  $i_s$  es la corriente del estator y  $\psi_s$  el flujo del estator, y expresado en referencias a los ejes dq girando a la velocidad sincrónica, resulta:

$$V_s^{dq} = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_s \psi_s \quad (1.3)$$

donde  $\omega_s$  es la velocidad de giro del sistema de referencia sincrónico. Análogamente para el rotor se obtiene:

$$v_r^{dq} = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_s - \omega_r) \psi_r \quad (1.4)$$

donde:  $R_r$  es la resistencia del rotor,  $i_r$  es la corriente del rotor,  $\psi_r$  el flujo del rotor,  $\omega_r$  representa la velocidad del rotor de la máquina y  $(\omega_s - \omega_r)$  la diferencia entre la velocidad del sistema de referencia sincrónico y la del rotor.

El flujo del estator será la suma del flujo producido por la corriente circulante por él mismo, más una parte del producido por las corrientes del rotor. Lo mismo se cumple con el flujo del rotor. Esto queda reflejado en las siguientes ecuaciones:

$$\psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (1.5)$$

$$\psi_r = L_r i_r + L_m i_s \quad (1.6)$$

Donde  $L$  representa la inductancia, el subíndice  $s$  indica que son parámetros del estator, el subíndice  $r$  que son parámetros del rotor y  $m$  parámetros mutuos.

A partir de esto se definen las ecuaciones que ligan el momento mecánico desarrollado por la máquina con las variables y la relación entre el momento de la carga  $T_l$  y el momento electromagnético  $T_{em}$  [21]:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_m \cdot I_m (i_s \cdot i_r^*) \quad (1.7)$$

$$T_{em} - T_l = J \cdot \frac{d}{dt} \Omega \quad (1.8)$$

donde:  $p$  es el número de pares de polos,  $L_m$  es la inductancia de magnetización,  $J$  es el momento de inercia del generador y  $\Omega = \frac{\omega_r}{p}$ .  $I_m$  indica la parte imaginaria de un número complejo, y  $*$  representa el complejo conjugado. Con las ecuaciones de la (1.2) a la (1.8) es posible implementar el modelo dinámico del generador de inducción, donde  $V_r$  tomará el valor que el sistema de control imponga.

El DFIG es una máquina de inducción de rotor bobinado con su circuito de rotor conectado a la red a través del sistema de convertidores de electrónica de potencia, mientras que el estator es conectado directamente a la red como se describió en la Fig.1.3.

El rotor del generador de inducción de rotor bobinado es alimentado por el convertidor trifásico del lado de la máquina, que emplea un sistema trifásico de tensiones de frecuencia variable. La modificación de la amplitud y frecuencia de las corrientes del rotor, resulta en una modificación del par y, consecuentemente, de la velocidad de giro del rotor, cuyo objetivo es que la turbina eólica trabaje en el punto de máximo rendimiento cuando cambia la velocidad del viento [22]

La principal ventaja del esquema de conversión de energía basado en el generador asincrónico doblemente alimentado es que la potencia que debe ser tratada por los convertidores electrónicos es solo una pequeña parte de la potencia total de la máquina. [23,24]

Si se considera que  $v_a$ ,  $v_b$  y  $v_c$  son las tensiones de fase del sistema trifásico y que  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  son las corrientes de fase de entrada, la potencia desarrollada por el generador es:

$$P = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (1.9)$$

Considerando la componente de secuencia cero como nula, las potencias activa y reactiva instantáneas descritas en las ecuaciones (1.9 y 1.10) [25,26], pueden ser escritas usando la tensión y la corriente en los ejes de referencia dq como:

$$P = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (1.10)$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q) \quad (1.11)$$

Y a partir de la expresión para las potencias instantáneas desarrolladas en los circuitos del rotor y el estator de la máquina de inducción, y considerando las ecuaciones anteriores del modelado de la máquina, se obtiene la expresión general para P (1.12).

$$P = \frac{3}{2} \{R_s |i_s|^2 + R_r |i_r|^2\} + \frac{3}{2} \frac{d}{dt} \left\{ \frac{L_{ls}}{2} |i_s|^2 + \frac{L_{lr}}{2} |i_r|^2 + L_m |i_s + i_r|^2 \right\} + \frac{3}{2} W_r \frac{L_m}{L_e} \text{Im}\{\psi_s i_r^*\} \quad (1.12)$$

donde  $L_{ls}$  y  $L_{lr}$  son las inductancias del estator y el rotor respectivamente.

El primer término de esta expresión (1.12) tiene en cuentas las pérdidas de cobre, el segundo término la variación de la energía magnética almacenada en las inductancias de la máquina y el tercer término corresponde a la conversión de energía eléctrica a partir de la forma mecánica.

Nótese el efecto de las inductancias, sea la inductancia propia del estator ( $L_s$ ) o del rotor ( $L_r$ ), como de la de magnetización ( $L_m$ ), que tiene en la potencia instantánea desarrollada.

La inductancia de magnetización  $L_m$ , tiene particular interés y su variación viene determinada por la zona de operación. Su valor depende en forma no lineal del valor de la corriente de magnetización  $i_m$ , lo cual se puede describir mediante

$$\psi_m(i_m) = L_m(i_m) * i_m \quad (1.13)$$

donde  $\psi_m$  es el flujo de magnetización y la corriente de magnetización se calcula por:

$$i_m = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} \quad ( 1.14 )$$

Siendo

$$i_{md} = i_{sd} + i_{rd} \quad ( 1.15 )$$

$$i_{mq} = i_{sq} + i_{rq} \quad ( 1.16 )$$

Representado los subíndices d y q, las corrientes en los correspondientes ejes de coordenadas.

Teniendo modelada de alguna forma la variación de  $L_m$  en función de la corriente de magnetización entonces es posible introducir este efecto en la simulación de la saturación, lo cual se expone en los epígrafes siguientes.

## El sistema de control en el DFIG

Para este trabajo [20] elige el controlador lineal vectorial sincrónico, basado en dos PIs que trabajan en los ejes de referencia rotatorios  $dq$ , es uno de los controladores de corriente mostrados por Kazmierkowski y Malesani [27], como se muestra en la Ilustración 4.

Las tres ecuaciones escalares que describen el comportamiento de la figura

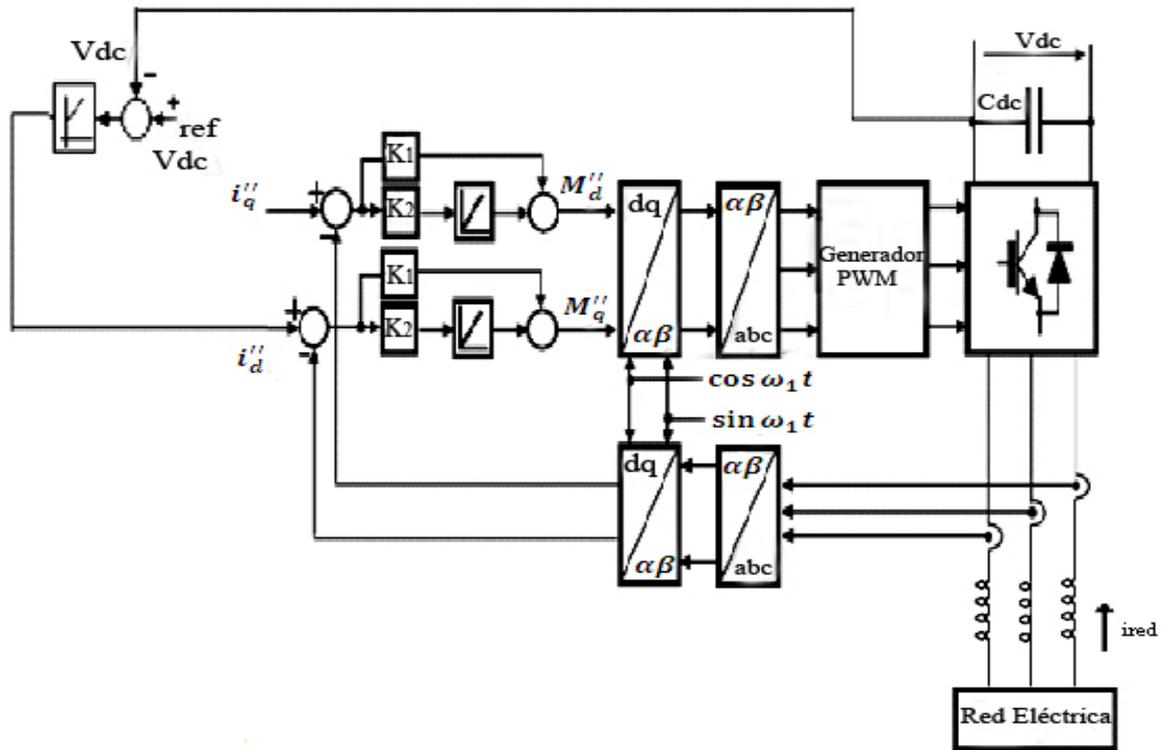


Ilustración 4: Diagrama de bloques general del esquema de control propuesto. anterior son:

$$v_a(t) = R_1 i_a(t) + L_1 \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad (1.17)$$

$$v_b(t) = R_1 i_b(t) + L_1 \frac{di_b(t)}{dt} + e_b(t) \quad (1.18)$$

$$v_c(t) = R_1 i_c(t) + L_1 \frac{di_c(t)}{dt} + e_c(t) \quad (1.19)$$

donde:  $v_a(t), v_b(t)$  y  $v_c(t)$  son las tensiones de salida de cada rama del convertidor,  $L_1$  es el valor de la inductancia del filtro de salida del convertidor,  $R_1$  es la resistencia del filtro de salida,  $i_a(t), i_b(t)$  e  $i_c(t)$  son las corrientes de cada fase del convertidor y  $e_a, e_b$  y  $e_c$  son las tensiones de cada fase de la red eléctrica.

Las expresiones (1.17), (1.18) y (1.19) se pueden expresar en forma vectorial en los ejes  $\alpha\beta$  como:

$$v_{\alpha\beta}(t) = R_1 i_{\alpha\beta}(t) + L_1 \frac{di_{g\alpha\beta}(t)}{dt} + e_{\alpha\beta}(t) \quad (1.20)$$

$$v_{\alpha}(t) = R_1 i_{\alpha}(t) + L_1 \frac{di_{\alpha}(t)}{dt} + e_{\alpha}(t) \quad (1.21)$$

$$v_{\beta}(t) = R_1 i_{\beta}(t) + L_1 \frac{di_{\beta}(t)}{dt} + e_{\beta}(t) \quad (1.22)$$

Las expresiones (1.20), (1.21) y (1.22) se transforman a los ejes de referencias  $dq$ :

$$v(t) = R_1 i_g(t) + L_1 \frac{di_g(t)}{dt} + jw_1 L_1 i_1(t) + e_g(t) \quad (1.23)$$

$$v_q(t) = R_1 i_q(t) + L_1 \frac{di_q(t)}{dt} + w_1 L_1 i_d(t) + e_q(t) \quad (1.24)$$

$$v_d(t) = R_1 i_d(t) + L_1 \frac{di_d(t)}{dt} - w_1 L_1 i_q(t) + e_d(t) \quad (1.25)$$

Como se muestra en los epígrafes anteriores, las potencias: activa y reactiva fluyen del sistema al convertidor y pueden ser escritas como:

$$P = \frac{3}{2} \operatorname{Re}\{\vec{v}\vec{i}^*\} = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \quad ( 1.26 )$$

$$Q = \frac{3}{2} \operatorname{Im}\{\vec{v}\vec{i}^*\} = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q) \quad ( 1.27 )$$

Si el vector tensión del sistema de potencia se usa orientado de acuerdo a la posición del sistema  $dq$ , entonces el vector tensión puede ser alineado con el eje  $d$ . Entonces las potencias: activa y reactiva se convierten en:

$$P = \frac{3}{2} v_d i_d \quad ( 1.28 )$$

$$Q = -\frac{3}{2} v_d i_q \quad ( 1.29 )$$

Además, despreciando las pérdidas del convertidor, la diferencia entre la potencia activa entregada al convertidor del lado de red, por el sistema de potencia, y la potencia activa absorbida por el rotor de la máquina de inducción desde el convertidor, del lado de la máquina, debe ser absorbida por el capacitor intermedio. Si en el bus de DC la tensión se mantiene constante, toda la potencia activa que está fluyendo a través de los terminales del rotor de la máquina va o viene del sistema de potencia. El convertidor del lado de la red es el que controla y mantiene constante la tensión de continua. Como se puede observar en [28], esto se puede hacer mediante la imposición de la componente de corriente de eje  $d$  de entrada al convertidor. Para el control de la corriente, se implementa un lazo de control interno. Sin embargo, durante el proceso de inicialización, mientras que la tensión del bus de corriente directa (DC) es todavía bajo, la magnitud del vector tensión del lado del convertidor es menor que la magnitud del vector tensión del sistema de potencia. Por lo tanto, la corriente a través de

los inductores de entrada no puede ser forzada por la tensión del convertidor. Sólo cuando la tensión del bus de corriente directa se hace más grande que la magnitud de la tensión del estator, se garantiza el control de la corriente. Esto no resulta un inconveniente ya que el propio vector de tensión del sistema tiende a elevar la tensión del circuito intermedio de corriente directa.

El control de la tensión del bus (DC) en el convertidor del lado de red se presenta en el diagrama de bloques mostrado en la Fig. 1.4.

Con el fin de obligar a toda la potencia reactiva generada a fluir sólo a través del estator de la máquina de inducción, la componente de corriente de eje  $q$  de entrada al convertidor debe ser igual a cero. Este control de potencia reactiva también se representa en el diagrama de bloques de la Fig. 1.6.

Debe señalarse que, si se usa la estrategia de máxima generación de potencia, pueden ocurrir fluctuaciones de la tensión o problemas de estabilidad debido a las variaciones típicas de la velocidad del viento. Es recomendable que la referencia de potencia activa tenga esto en cuenta.

Para el diseño de los controladores de corrientes es necesario eliminar el acoplamiento cruzado entre los ejes  $d$  y  $q$ , debido al término  $j\omega_1 L_1$ . Un método que utiliza [20] para eliminar este acoplamiento consiste en añadir un lazo de realimentación negativa interno con una ganancia  $-j\omega_1 L_1$ . Además, es necesario cancelar el efecto de la tensión de red  $e_g$  sobre el controlador, lo que se logra mediante una compensación “feedforward”. Esto puede realizarse porque la dinámica de  $e_g$  es muy lenta comparada con la corriente de red y, por tanto, puede ser tratada como una perturbación en el sistema de control.

Para realizar el control vectorial del convertidor del lado del rotor se ha elegido una orientación de los ejes  $dq$  con el eje  $d$  siguiendo el flujo del estator.

La potencia mecánica que se convierte en eléctrica en la turbina eólica responde a la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p V^3 \quad (1.30)$$

donde:  $\rho$  es la densidad del aire,  $V$  es la velocidad del viento,  $A$  es el área de la turbina del rotor,  $C_p$  es el coeficiente de potencia, este último es una función compleja de la distribución del flujo de aire sobre la superficie de las palas y, a su vez, se relaciona con el ángulo de inclinación de la pala ( $\beta$ ) y con la razón de velocidad de la punta de la pala ( $\lambda$ ). Esta última responde a la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{w_r R}{V} \quad (1.31)$$

siendo  $w_r R$  la velocidad lineal de la punta de la pala.

Para cada velocidad del viento existe una velocidad angular del rotor que consigue extraer la máxima potencia. Teniendo esto en cuenta se utilizan las curvas de  $C_p$  vs  $\lambda$  para determinar el valor óptimo de  $\lambda$  para la velocidad del viento medida y de esta forma calcular la velocidad óptima del rotor [29].

$$W_r^{OPT} = \frac{\lambda^{OPT} V}{R} \quad (1.27)$$

El control de velocidad debe ser usado para imponer la velocidad óptima del rotor para extraer la máxima potencia.

Orientando el eje  $d$  según el flujo del estator, su componente  $\psi_{sq}$  es nula, y [30]:

$$\psi_{sd} = |\vec{\psi}_s| = \psi_s.$$

Al escribir la ecuación (1.16) en un sistema de referencia orientado al flujo del estator, la potencia reactiva absorbida por el generador es:

$$Q_s = \frac{3}{2} \frac{w}{L_s} [\psi_s^2 - L_m \psi_s i_{rd}] \quad (1.33)$$

Teniendo en cuenta la expresión anterior se puede controlar la potencia reactiva absorbida con la componente  $d$  de la corriente del rotor.

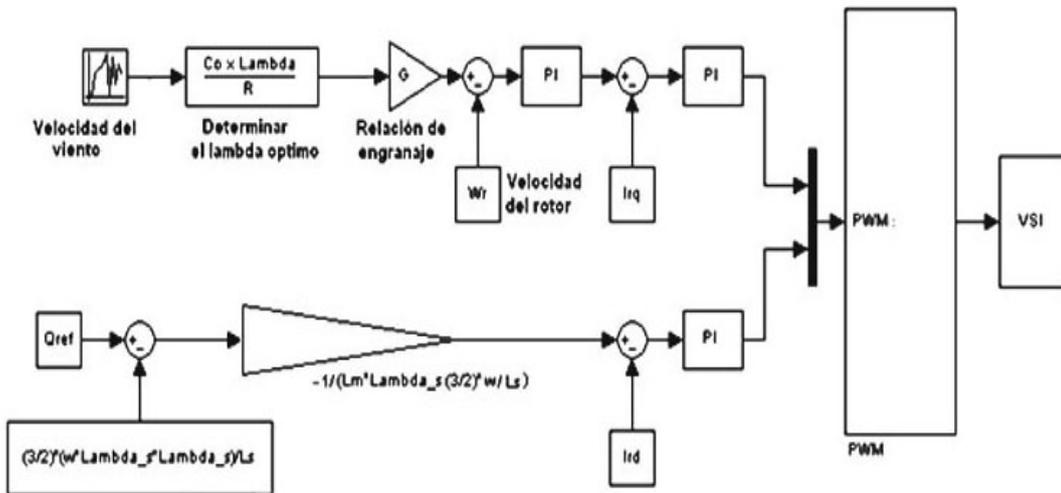


Ilustración 5: Diagrama de bloques del control del convertidor del lado de la máquina.

En la Ilustración 5 se observa el diagrama de bloques del esquema de control utilizado en el convertidor del lado de la máquina. La ecuación del rotor de la máquina separada en sus dos componentes  $d$  y  $q$  es [31]:

$$V_{rd} = R_r i_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} + \frac{d}{dt} \psi_{rd} \quad (1.28)$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} + \frac{d}{dt} \psi_{rq} \quad (1.35)$$

A la diferencia entre la velocidad de sincronismo y la velocidad del rotor de la máquina  $(\omega_s - \omega_r)$  se la denomina de ahora en adelante  $\omega_{slip}$ .

Al suponer que la máquina trabaje sin saturarse, el flujo del estator será la suma del flujo producido por la corriente circulante por él mismo, más una parte del producido por las corrientes del rotor [32]. Lo mismo se cumple con el flujo del rotor. Esto queda reflejado en las ecuaciones (1.5) y (1.6).

Al despejar  $i_s$  en (1.5) y (1.6), igualando y operando, se obtiene la relación entre  $\psi_s$  y  $\psi_r$ :

$$\psi_r = \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_r + \psi_s \frac{L_m}{L_s} \quad (1.36)$$

que puede fácilmente ser separada en sus dos componentes  $d$  y  $q$ , teniendo en cuenta que el flujo del estator en el eje  $q$  es nulo por la orientación utilizada.

Definiendo  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$  se puede simplificar la ecuación anterior y obtener:

$$\left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) = \sigma L_r \quad (1.29)$$

Al introducir la ecuación (1.37) en (1.34) y (1.35) se obtiene:

$$V_{rd} = R_r i_{rd} - w_{slip} \sigma L_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \psi_{sd} \quad (1.30)$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + w_{slip} \sigma L_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rq} + w_{slip} \frac{L_m}{L_s} \psi_{sd} \quad (1.39)$$

En la ecuación de la tensión del rotor en el eje  $d$ , existen dos sumandos que dependen directamente de  $i_{rd}$ . Lo mismo ocurre en la segunda ecuación en el eje  $q$ . La misión del regulador PI será ajustar la salida para que estos dos sumandos obtengan el valor que corresponda a la tensión de rotor en el dq de acuerdo con las características establecidas de viento y tensión de entrada. El resto de los sumandos, a excepción de la derivada del flujo en la primera ecuación que es nula en régimen permanente, se denominan

términos de compensación, o términos cruzados, pues dependen cada uno de la corriente obtenida en la otra ecuación.

En la Ilustración 6 se representa el diagrama de bloques de los controles implementados en los dos convertidores que forman parte del DFIG.

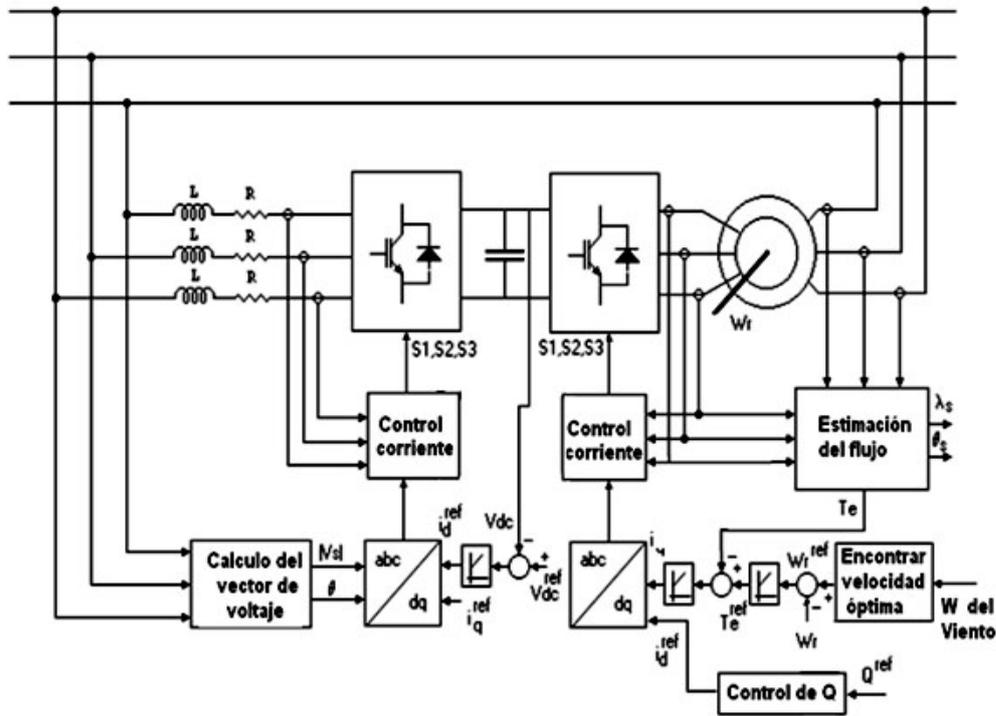


Ilustración 6: Diagrama de bloques general del esquema de control propuesto.

### Turbina eólica

La parte aerodinámica está compuesta por la turbina eólica, que es una parte integral de un sistema de generación eólica por las palas que aprovechan la energía cinética del viento y el sistema de orientación de las palas o mecanismo de pitch para regular la cantidad de energía absorbida por las palas. En un aerogenerador real también sería posible cambiar la orientación o “yaw” utilizando la información recibida mediante los aparatos de medida como la veleta, pero en ocasiones no se considera,

suponiendo que la turbina está perfectamente orientada hacia el viento de manera constante. El diseño de la turbina tiene una influencia significativa en la cantidad de energía que es captada del viento. [33]

La turbina es un dispositivo cuyo funcionamiento está basado en los principios de generar la fuerza de sustentación por perfiles aerodinámicos. La energía cinética captada es convertida en un torque mecánico que mueve al generador con la mayor eficiencia posible.

Los principios de conservación dictan que será imposible extraer toda la energía del viento interceptado y la eficiencia con que una turbina de diseño específico lo hace depende del coeficiente de potencia,  $C_p$ . Este coeficiente tiene un valor máximo teórico de 0.593 y se conoce como el límite de Betz-Lancaster [34-36],  $C_p$  es una función compleja de la distribución del flujo de aire sobre la superficie de las palas, y a su vez se relaciona con el ángulo de inclinación de la pala y la relación conocida como razón de velocidad del punto de pala y cuyo símbolo es  $\lambda$ . La función que describe el coeficiente de potencia es una superficie bicúbica y se muestra en la Ilustración 7.

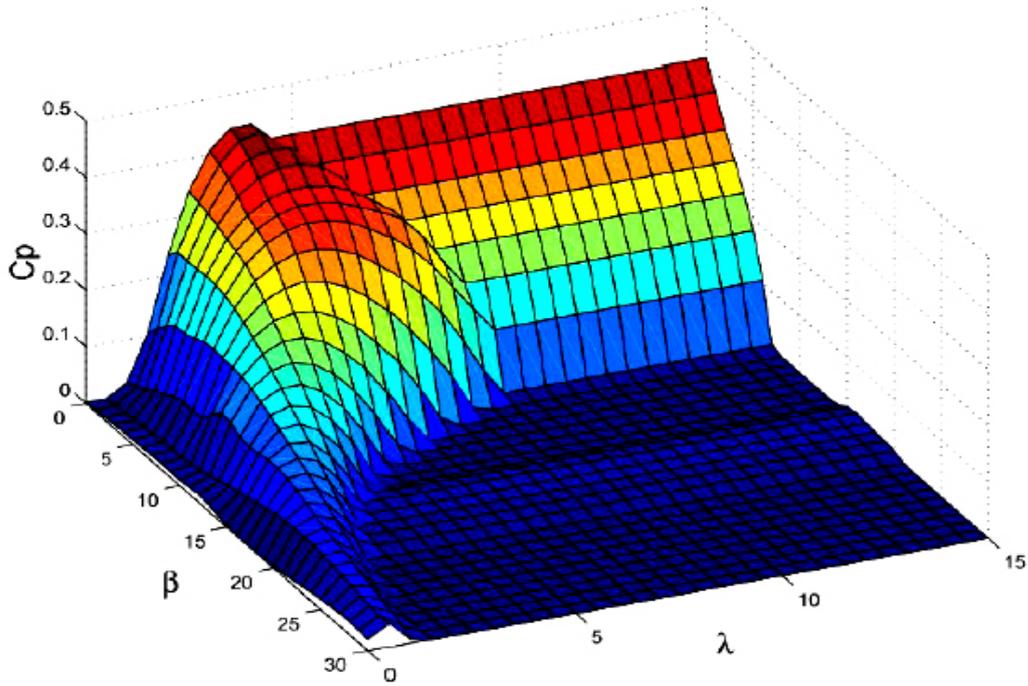


Ilustración 7: Superficie bicúbica que representa al coeficiente de potencia  $C_p$ .

Según [35, 37],  $C_p$  puede representarse empíricamente por:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left[ \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right] e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (1.40)$$

donde  $\beta$  es el ángulo de paso (pitch). El coeficiente  $\lambda_i$  se determina por la ecuación:

$$\lambda_i = \left( \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)^{-1} \quad (1.41)$$

y  $\lambda$  se establece mediante:

$$\lambda = \frac{R_{tur} W_{tur}}{V_w} \quad (1.42)$$

donde:  $R_{tur}$  es el radio de la turbina,  $V_w$  es la velocidad del viento y  $W_{tur}$  es la velocidad de la turbina.

De esta forma, la potencia que se extrae por la turbina del viento está dada por el coeficiente de potencia,  $C_p$ , la velocidad del viento, el radio del rotor y la densidad del aire, lo que es esencialmente una ley cúbica representado en la ecuación (1.43):

$$P_m = \frac{1}{2} \rho R^2 V^3 C_p \quad (1.43)$$

El torque desarrollado se expresa como:

$$T_m = \frac{P_m}{W_{tur}} \quad (1.44)$$

Cuando una turbina es de paso variable significa que es capaz de variar su ángulo de inclinación en función de la velocidad del viento para conseguir el máximo valor del coeficiente de potencia. En una turbina de paso variable este ajuste se realiza por el sistema de control para velocidades de viento por debajo de la nominal y, se dice que el rotor funciona a máxima eficiencia. Al superar el umbral de velocidad nominal, el ángulo de inclinación se ajusta adquiriendo valores positivos cada vez mayores según aumenta la velocidad del viento, hasta llegar al valor máximo de paso (pitch), correspondiendo a la velocidad de salida, cuando las palas se habrían puesto en la posición de bandera.

### **No linealidades. Saturación**

El concepto de no-linealidad en el contexto de las matemáticas ha aparecido con significativa frecuencia a mediados del siglo XX, con el auge de los temas de la Teoría de la Complejidad, el Caos, el Fractal y otros

equivalentes, hasta ese momento lo que se trataba es de aproximar las funciones manejadas en física y otras disciplinas afines, mediante simple supresión de términos de grado superior al primero, a expresiones lineales mucho más fáciles de manipular, aunque el resultado a veces se apartaba significativamente de la realidad física, es así que se implementan nuevos y eficaces procedimientos de linealización que conducen a mayor aproximación a los valores verdaderos, a la vez que los sistemas no lineales se hacen cada vez más presentes en la ciencia moderna. [38].

La presencia de no linealidades es común en una amplia variedad de procesos tecnológicos e implica una determinada complejidad en lo relacionado con el modelado, análisis y procedimientos de identificación que sean necesarios aplicar. En las máquinas eléctricas de inducción una de estas no linealidades es la saturación magnética que puede estar presente en determinadas condiciones de operación. Específicamente en motores y generadores de inducción, se han desarrollado varias investigaciones sobre el modelado considerando la presencia de la saturación, demostrándose la necesidad de incluir los efectos de esta no linealidad en el modelado de máquinas de inducción en general, como se resume en [39].

Los Generadores de Inducción Doblemente Alimentados, continúan siendo objeto de estudio en lo relativo al modelado, identificación y control recibiendo una creciente atención [19,40-53]. Por otra parte, varios trabajos analizan el comportamiento de estas máquinas en diferentes condiciones relacionadas principalmente con la tensión de operación (disturbios, fallos, etc.) [54-57], y diferentes estructuras de control en estas condiciones de operación [58-61]. Prácticamente todos estos estudios son realizados considerando que los motores trabajan en la parte lineal de la característica de saturación y sin tener en cuenta la presencia de esta no linealidad en el

sistema. Esta saturación magnética se caracterizará en el modelado por la Inductancia de magnetización,  $L_m$ . Si este parámetro es considerado constante, resulta por tanto un modelo lineal, mientras que considerar el mismo como variante con la corriente implica considerarlo como un elemento no lineal.

En la situación de  $L_m$  variando, que corresponde a considerar diferentes zonas de operación, se presenta entonces la necesidad del cálculo permanentemente del valor de  $L_m$ . Esto introduce una complejidad adicional en los modelos a considerar. El procedimiento de cálculo de  $L_m$  está bien fundamentado en la literatura técnica revisada [62,63]. Particularmente también se reportan varios modelos que especialmente consideran el efecto no lineal provocado por la saturación magnética [6, 7, 64-66], representada en estos casos por una  $L_m$  variable no lineal. En este trabajo se presenta una novedosa forma de introducir el cambio en  $L_m$  en forma simplificada en el modelado. El efecto de la saturación, como fenómeno no lineal, en DFIG es por tanto el objeto de estudio en esta investigación, siendo el objetivo general determinar, mediante modelado y simulación, el efecto de esta no linealidad en los sistemas de generación eólica cuando estos están sometidos a régimen especiales de operación, tales como subidas o huecos de tensión.

Los sistemas de conversión de energía del viento basados en generadores de inducción doblemente alimentado incorporan varios elementos que determinan el comportamiento de la generación, entre ellos los correspondientes sistemas de control, siendo el fundamental el subsistema de control de velocidad del rotor, el cual incluye elementos de aseguramiento de la integridad y estabilidad del sistema. Estos limitadores de velocidad también significan la introducción de un efecto no lineal, de saturación, en el comportamiento general del sistema, lo cual se suma, en

puntos de operación extremos, a las otras características no lineales. Esto se interpreta entonces como una saturación rotacional, la que es función directa la velocidad y potencia del viento. El otro objetivo general del artículo es demostrar, mediante técnicas de identificación, la posibilidad de determinar modelos generales del sistema DFIG en las condiciones especiales de operación antes mencionadas.

### *Sincronización con la red eléctrica*

En muchos casos, la red de distribución exhibe tensiones distorsionadas y desequilibradas, en estos casos, el método de sincronización con la red influye fuertemente en el rendimiento de la totalidad del esquema de control del convertidor de potencia conectado a la red. Determinar el valor correcto de la componente de secuencia positiva de la frecuencia fundamental del vector tensión de la red (FFPS, por sus siglas en inglés), es esencial para un buen control de estos sistemas. Esta información es usada en los PLL (phase locked loop), por lo que en la actualidad existen muchas investigaciones encaminadas a lograr PLLs más rápidos y con comportamientos adecuados ante distorsiones en la red.

En un marco de referencia sincrónico (SRF, por sus siglas en inglés) solo la componente del vector de secuencia positiva de la frecuencia fundamental de la señal trifásica (FFPS), tiene componentes constantes en los ejes directo ( $d$ ) y en cuadratura ( $q$ ), por tanto, en principio un controlador proporcional-integral (PI) de bajo ancho de banda puede ser utilizado en un sistema de referencia sincrónico para implementar el PLL (SRF-PLL). En algunas investigaciones [66-68], se utilizan controladores PI para determinar la FFPS de una señal trifásica. Sin embargo, para separar el vector componente FFPS de la secuencia negativa de la frecuencia fundamental (FFNS, por sus siglas en inglés) u otros componentes, este método de detectar la FFPS sería muy lento.

Otro método conocido para determinar la FFPS, basado en sistemas de referencias sincrónicas dobles, es propuesto por Rodríguez [69], se trata de un detector de secuencia positiva basado en un nuevo bucle de bloqueo de fase de trama de referencia sincrónica doble desacoplada (DDSRF-PLL), que elimina completamente los errores de detección de las TPL (SRF-PLL) de trama de referencia síncrona convencional, El DDSRF-PLL resultante conduce entonces a una detección de tensión de secuencia positiva rápida, precisa y robusta, incluso en condiciones de red desequilibradas y distorsionadas.

En otros trabajos [70, 71] se proponen métodos basados en integrador generalizado, mientras que en otras investigaciones [39, 72-75] se proponen métodos basados en retraso en la cancelación de la señal (DSC, Delayed signal cancellation), y retraso en la cancelación de la señal generalizado (GDSC, Generalized delayed signal cancellation). El método está basado en un esquema GDSC, visto como un caso particular de la SVFT, y se presenta un nuevo procedimiento para cada transformación GDSC.

Algunos autores [76, 77] proponen métodos usando filtro de Kalman y en otros [78-82] proponen métodos basados en la transformada de Fourier.

Otros autores [83] muestran un análisis de diferentes algoritmos utilizados en PLL y proponen una técnica novedosa basada en GDSC, que presenta resultados relevantes ante distorsiones de la tensión en la red. Al tener en cuenta que el DFIG es muy sensible a huecos de tensión consideran importante implementar este tipo de PLL para la sincronización del DFIG con la red eléctrica, por lo que es utilizado en este trabajo.

#### *Modelado de los huecos de tensión*

Los huecos, denominados también como depresiones (Sag o Dip), consisten en una reducción entre 0,1 y 0,9 p.u. en el valor R.M.S. de la tensión o

corriente con una duración de 0,5 ciclo a un minuto, según las normas IEEE Estándar 1159 de 1995 [84]. Las depresiones de tensión son normalmente asociadas a fallas del sistema, a la energización de grandes cargas, al arranque de motores de elevada potencia y a la energización de transformadores de potencia, una gran corriente que circule de manera imprevista puede ocasionar que la tensión caiga debajo de estos márgenes establecidos, para considerarlos huecos de tensión. Conceptualmente pueden apreciarse dos causas que provocan huecos de tensión:

- Incrementos en la impedancia de la red
- Grandes consumos de corriente

Los efectos nocivos de las depresiones de tensión dependen de su duración y de su profundidad, estando relacionados con cortocircuitos en la red, conexión de grandes transformadores, fallos de los reguladores de tensión, la desconexión de equipos de cómputo, PLC y contactores, entre otros dispositivos. También presenta efectos sobre la velocidad de los motores, estudiados en [85].

Los huecos de tensión pueden ser simétricos o asimétricos, en los primeros se considera que estas depresiones de tensión se presentan en las tres líneas por igual y con desfase de  $120^\circ$ , el tipo de falla que presenta esta característica es trifásica o trifásica a tierra provocado en la red de alta tensión y asimétricos porque puede ocurrir en una línea o en dos de ellas, y además que la profundidad del hueco sea variable en cada línea, provocados en la red en los distintos niveles de transformación de tensión, en esta investigación se trabajará con la primera, con huecos simétricos.

Estos huecos de tensión fueron programados para que ocurran en el instante de tiempo que se consideren adecuados.

## ***Fundamentos de los métodos de identificación***

En este el objetivo está dirigido a establecer y fundamentar la metodología a seguir para realizar la investigación sobre la aplicación de procedimientos de identificación en el sistema de generación eólica basado en DFIG. Primero se establecerán los tipos de métodos de identificación a aplicar y en un segundo momento la argumentación de los principales pasos.

### *Desarrollo de la investigación para la identificación del proceso*

El procedimiento de identificación aplicable en un determinado caso está determinado por el tipo de modelo que se quiere obtener, relacionado con el objetivo de uso de este. Esto significa la selección del tipo y estructura del modelo. De los objetivos posibles de uso de modelos están: simulación, diagnósticos, predicción, controladores, etc. En esta investigación se dirigirán a diagnóstico y predicción.

Como bien establecido en la literatura técnica, una investigación completa para encontrar el mejor modelo que cumpla el anterior principio implica la aplicación de diferentes métodos de identificación, comparando los resultados. Cada método, paramétrico o no paramétrico, tiene diferentes requisitos de aplicación, pero todos tienen como característica común que requieren una comparación de los resultados del modelo con el comportamiento real del proceso que se identifica en aquellas variables que se hayan determinado como objeto de la identificación.

Cumpliendo con lo anterior se realizará la investigación sobre la identificación del proceso de generación eólica aplicando y comparando los siguientes métodos paramétricos:

- Métodos lineales convencionales
- Métodos no lineales convencionales

- Métodos no lineales basados en inteligencia artificial

### *Procedimiento general para la identificación*

Para la aplicación de cualquiera de los métodos de identificación se establecen los siguientes tres pasos generales:

1. Establecer variables de entrada y salida, así como los correspondientes juegos de datos a obtener, principalmente vía experimental. Este juego de N datos expresado por el conjunto.

$$\{y(t), u(t)\}_{t=1\dots N}. \quad (1.44)$$

Donde  $u(t)$  es la variable de entrada y  $y(t)$  la de salida del proceso.

2. Establecer las estructuras del modelo más convenientes a estimar.

Cada una de estas estructuras estará representada por un modelo

$$y(t + 1) = f_i(\bar{y}(t), \bar{u}(t), \theta_i) + \xi(\theta, t) \quad (1.45)$$

Donde  $\theta_i$  representa los parámetros a estimar, y  $\bar{y}(t), \bar{u}(t)$  corresponde a los conjuntos de valores de la entrada y salida en instantes de tiempo pasados, comprendidos en (1.x).  $\xi(\theta)$  es el error de modelación que depende de los parámetros estimados.

3. Aplicar los procedimientos de identificación correspondientes a las estructuras seleccionada, determinando los mejores modelos que cumplan los criterios de validación que se establezcan, minimizando el error de estimación  $\xi(\theta)$ .

En la Ilustración 8, se representa el principio de identificación a usar en esta investigación.

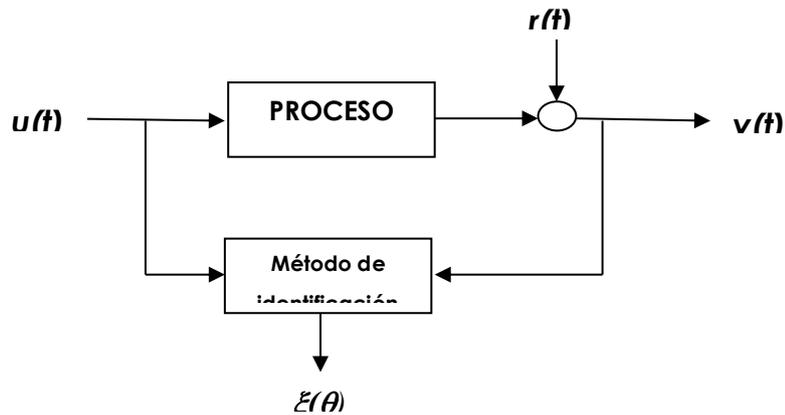


Ilustración 8: Principio de funcionamiento de la identificación aplicada

De lo anterior se deriva que se presentan dos alternativas para la interpretación de los modelos a estimar. Una variante es considerar que el modelo representa la relación de los datos de salida / entrada,  $[y(t), u(t)]$  y el error de identificación  $\xi(t)$ . La segunda variante es considerar que representa la relación entre la entrada y disturbio  $[u(t), r(t)]$  y la salida real del proceso,  $y(t)$ . Si consideramos que el objetivo de esta investigación es el comportamiento dinámico del sistema de generación ante disturbios, entonces es seleccionada esta segunda variante, la cual es representada en la Ilustración 9.

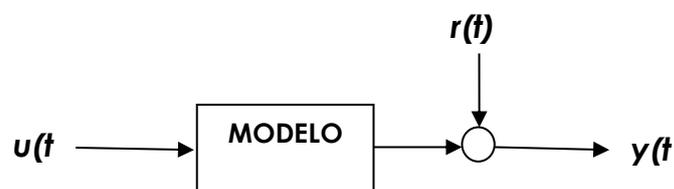


Ilustración 9: Modelo identificado como relación de salida a entradas

La expresión matemática dinámica con la cual se representará lo mostrado en la Ilustración 2 es:

$$y(t) = G(q) * u(t) + r(t) \quad (1.46)$$

Sobre la base de los anteriores principios y condiciones para la identificación el procedimiento a seguir en esta investigación es el clásico planteado por varios autores descritos en [86-92], que es representado en la Ilustración 10.

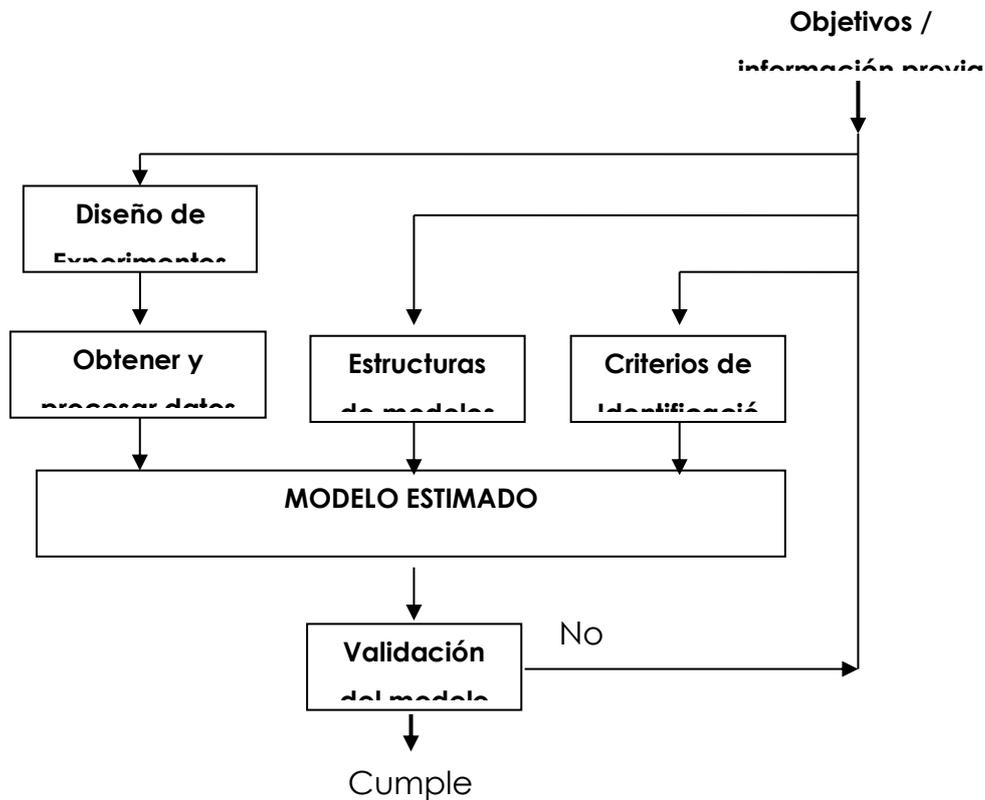


Ilustración 10: Procedimiento general de identificación [87]

*Estructura de modelos lineales*

Las estructuras de modelos paramétricos pueden ser lineales y no lineales. En referencia a los lineales el modelo predictivo denominado Autoregresivo con entrada externa, ARX (por sus siglas en inglés) es el básico y es representado por

$$y(t) = \frac{B(q,\theta)}{A(q,\theta)} * u(t) + \frac{1}{A(q,\theta)} e(t) \quad (1.47)$$

Donde  $e(t)$ , bajo determinadas condiciones, representa el componente de la estimación de  $y(t)$  que no puede ser determinado por el modelo predictivo.  $A(q, \theta)$  y  $B(q, \theta)$  son polinomios en el operador de desplazamiento  $q$  y en el conjunto de parámetros  $\theta$ . A partir de la estructura representada por (1.47) se han desarrollado otro conjunto de modelos, utilizando otros polinomios  $D$  y  $F$ , como componentes de función de transferencia de  $u(t)$  y  $e(t)$ , como se muestra a continuación:

**Modelo ARMAX (Autoregresivo con promedio cambiante y entrada externa)**

$$y(t) = \frac{B(q, \theta)}{A(q, \theta)} * u(t) + \frac{C(q, \theta)}{A(q, \theta)} * e(t) \quad (1.48)$$

**Modelo Box-Jenkins, BJ**

$$y(t) = \frac{B(q, \theta)}{F(q, \theta)} * u(t) + \frac{C(q, \theta)}{D(q, \theta)} * e(t) \quad (1.49)$$

**Modelo Error en Salida, OE**

$$y(t) = \frac{B(q, \theta)}{F(q, \theta)} * u(t) + e(t) \quad (1.50)$$

**Modelo Respuesta Impulso Finita, FIR**

$$y(t) = B(q, \theta) * u(t) + e(t) \quad (1.51)$$

En este trabajo se obtendrán los resultados de la aplicación de estos modelos lineales como un primer paso en el desarrollo de la investigación.

En la revisión bibliográfica de algunos trabajos realizados, se encontraron varios modelos del DFIG, en coordenadas  $\alpha\beta$  y en el eje  $dq$ . De los analizados se eligió el modelo del DFIG, realizado por [20], ya que el mismo representa todas las características necesarias para poder incluir el módulo de saturación. Además, se caracterizaron algunas fallas transitorias y se expusieron los fundamentos teóricos necesarios para la identificación.

## **Capítulo 2.- Modelado Del Dfig-Weecs**

El este capítulo se implementan módulos de saturación y de generación de disturbios al modelo del DFIG utilizado [20] para analizar el comportamiento del sistema bajo condiciones especiales en la tensión de línea.

### **Modelado de los Sistemas de Conversión de Energía del Viento basados en el Generador de Inducción Doblemente Alimentado DFIG-WECS**

En este epígrafe se plantea un modelo general del DFIG-WECS, incorporando la saturación magnética y los disturbios al modelo descrito en [20], que permitieron realizar la simulación bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

#### ***Modelado del general del sistema DFIG-WECS***

El modelo del DFIG sin incluir la saturación magnética fue descrito en el epígrafe 1.1. En el modelo saturado, se incorpora un módulo de saturación, además de un módulo de generación de disturbios, experimentando en él, diferentes condiciones de operación, basadas fundamentalmente en la

tensión de trabajo, que comúnmente ocurre en este tipo de sistemas. El modelo general en Simulink de MatLaB, se especifica en la Ilustración 11:

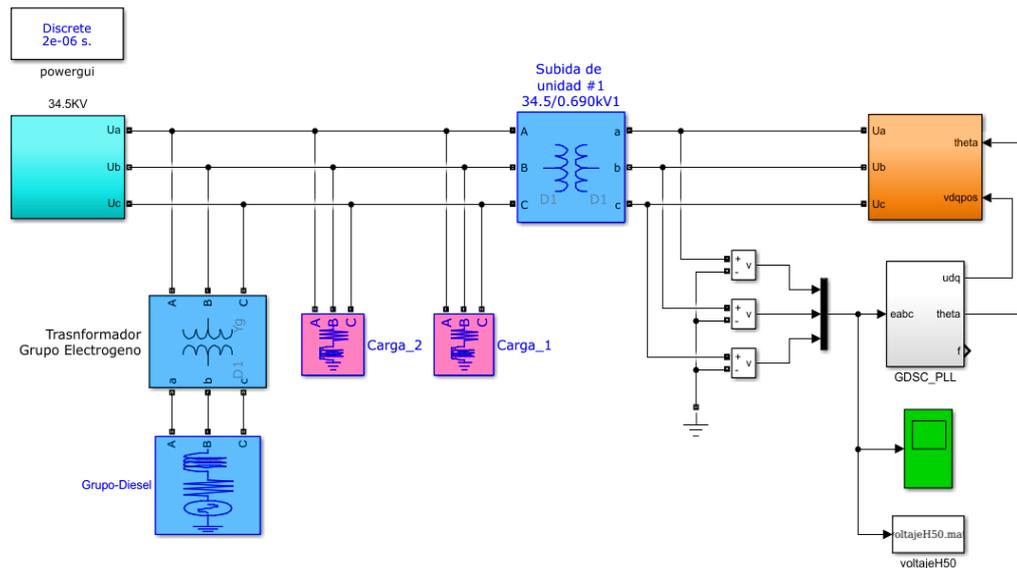


Ilustración 11: Modelo en Simulink DFIG-WECS

Este modelo que contiene el DFIG, es un escenario real en Gibara 1, en Holguín, Cuba. El DFIG se conecta a 690 V (tensión nominal) mediante un transformador de 34,5 kV a 0,690 kV. Las cargas del sistema son las que existen realmente en esa localidad. Se representa también el bloque GDSC PLL, cuyo funcionamiento fue explicado en el capítulo anterior. Los parámetros del DFIG G52-850 implementados en el modelo son:

Tabla 1: Características del DFIG [17]

Tensión $V = 690$ voltios	Frecuencia nominal $f_{nom} = 60$ Hz
Resistencia de estator $R_s = 0.0035$ $\Omega$	Número de polos = 4
Resistencia del Rotor $R_r = 0.0031 \Omega$	Inductancia de magnetización $L_{m0} = 0,00621$ H
Inductancia de estator $L_{ls} = 8.84801e-5$ H	Inductancia del rotor $L_{lr} = 1.289e-4$ H

En este modelo se ha incrementado dos bloques, el uno para generar la Inductancia de magnetización  $L_m$  al sistema y el otro para generar los huecos de tensión y las sobretensiones, los mismos que se detallan más adelante.

### **Modelado de la saturación**

Se ha realizado algunos estudios sobre saturación magnética en generadores de inducción, entre ellos esta [92]

Para obtener la curva de magnetización del DFIG se procedió a buscar las características de magnetización entregada por el fabricante, para el generador G52 850 kW, y que son descritas a continuación:

*Tabla 2: Valores de tensión y corriente del estator para hallar la curva de magnetización.*

<b>Tensión (v)</b>	172.5	345	517.5	621	690	759
<b>Intensidad</b>	36	70	107	130	150	175

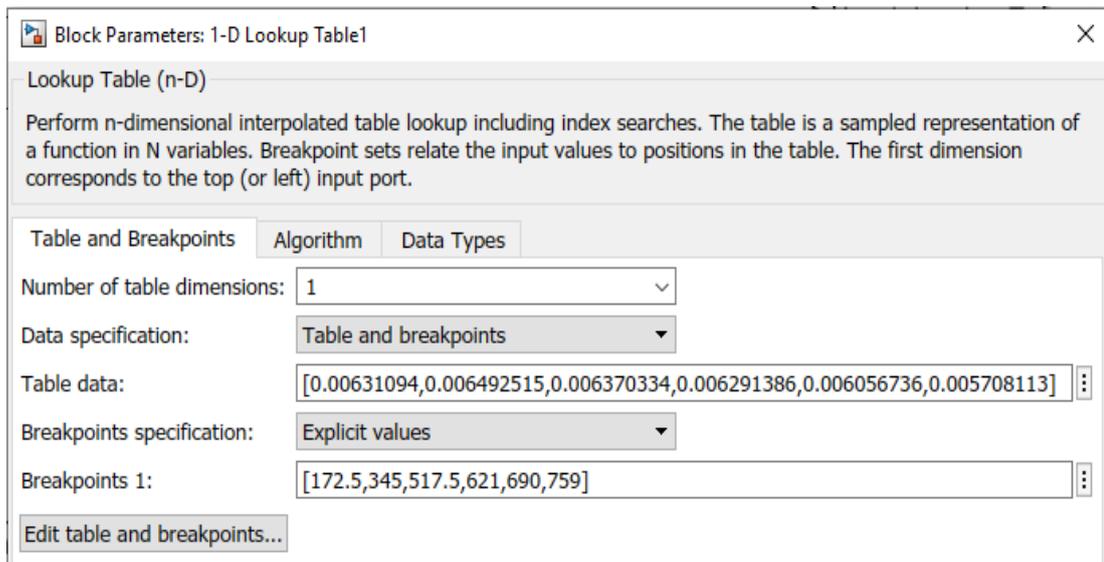
Con estos valores de tensión y corriente trabajando en vacío se encontró la Inductancia de magnetización  $L_m$ , variable, la Tabla 1Tabla 3 muestra los valores calculados de Inductancia de magnetización  $L_m$ .

*Tabla 3: Valores de tensión y  $L_m$  calculado para cada punto de tensión aplicado*

<b>Tensión</b>	172.5	345	517.5	621	690	759
<b><math>L_m</math> (H)</b>	0.006311	0.006492	0.006370	0.006291	0.006056	0.005708

Una vez obtenidos los puntos con los valores de  $L_m$  en función de la tensión se utilizó el bloque de Simulink de MatLab denominado 1-D Lookup Table, para calcular el valor de  $L_m$  en función de la Tensión.

Los parámetros del bloque 1-D Lookup Table son los mostrados en la Ilustración 12, donde se ingresan los puntos de  $L_m$  en Table data y en Breakpoints 1 los valores de Tensión.



*Ilustración 12: Configuración de los parámetros de Lookup Table*

Con este bloque se genera  $L_m$  a una tensión de alimentación de 690 voltios y obtener además cambios en las entradas para huecos de tensión o sobretensiones con la llamada HoStensión donde se puede cambiar los valores de la tensión, o también trabajar a otros valores de alimentación.

El cambio más importante está en el bloque denominado Eqs. 7 a 10, este bloque utilizaba una matriz 4X4 inversa  $L_{inv}$ , obtenida con  $L_m$  constante y colocada en el bloque InitFcn de Callbacks en las propiedades del modelo para que sea inicializado cuando se ejecute y la multiplicaba con las entradas que representa una matriz 4X1 con las entradas  $L_{mda\_sd}$ ,  $L_{mda\_sq}$ ,  $L_{mda\_rd}$  y  $L_{mda\_rq}$ , para obtener las corrientes  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ ,  $i_{rd}$  e  $i_{rq}$ , así como se muestra en la Ilustración 13.

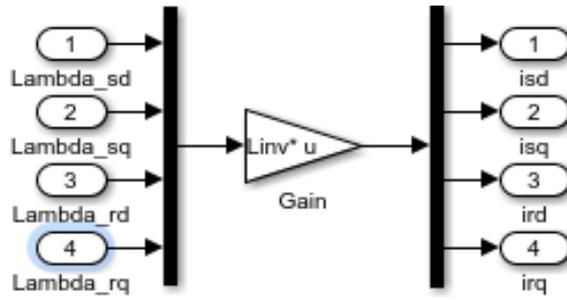


Ilustración 13: Bloque Eq.7 a 10 para el cálculo de las corrientes

El bloque Gain de la Ilustración 14 fue cambiado tomando en consideración el nuevo valor de  $L_m$ , por lo que se diseñó un bloque de matriz inversa 4X4 necesario para la multiplicación de matrices y que se muestra en el espacio señalado.

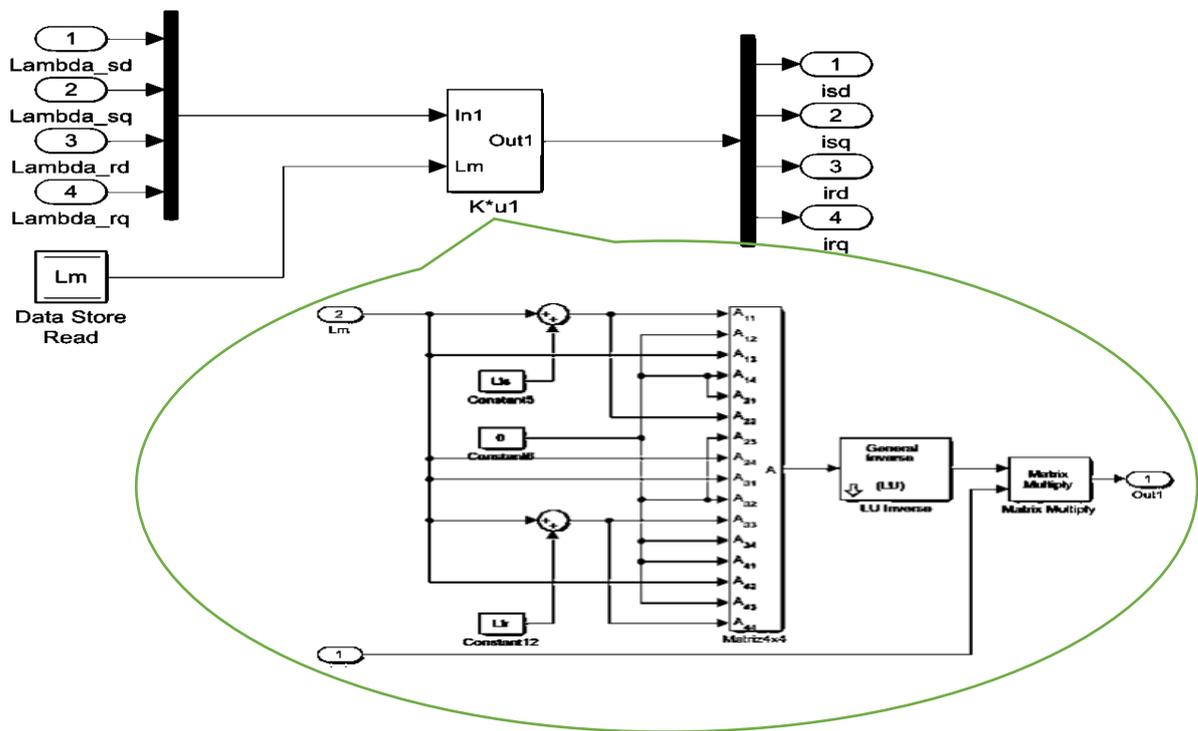
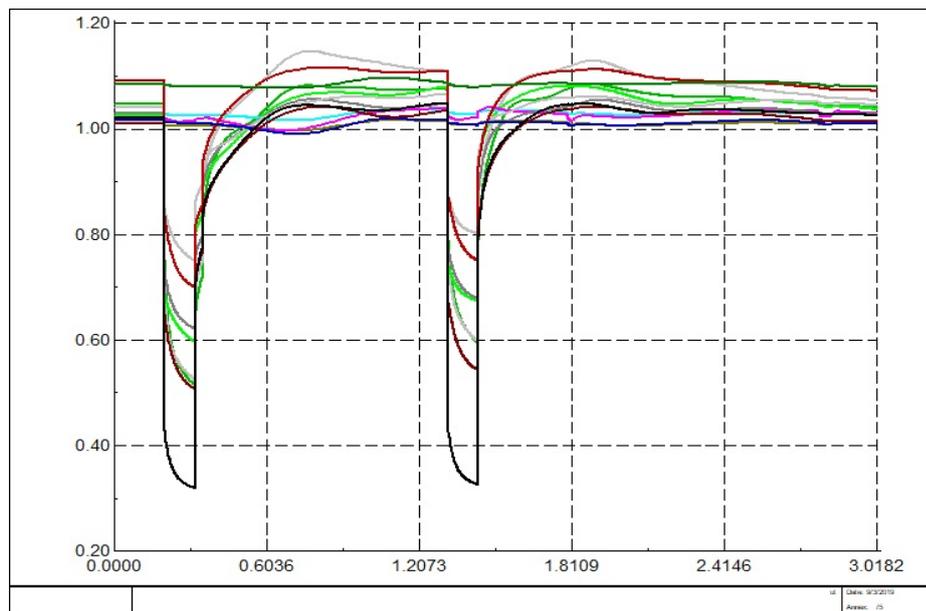


Ilustración 14: Bloque Eq. 7 a 10 con cambios en el sub-bloque Gain

## Generación de huecos de tensión

Los huecos de tensión, que se producen en la red y que afectan al sistema de generación eólica bajo estudio están definidos en la Ilustración 15. Este patrón de huecos de tensión se corresponde con datos reales obtenidos del sistema electroenergético cubano para la zona de Gibara, donde está ubicado el generador eólico.



*Ilustración 15: Huecos de tensión tomados de una simulación del sistema electroenergético cubano.*

En la Ilustración 16, se muestra un bloque Signal Builder 1 que es un generador de señales. En este bloque se genera la señal que modifica la tensión de alimentación en el porcentaje que sea necesario, configurando

sus características para obtener huecos de tensión o sobrecorrientes según sea el caso de estudio.

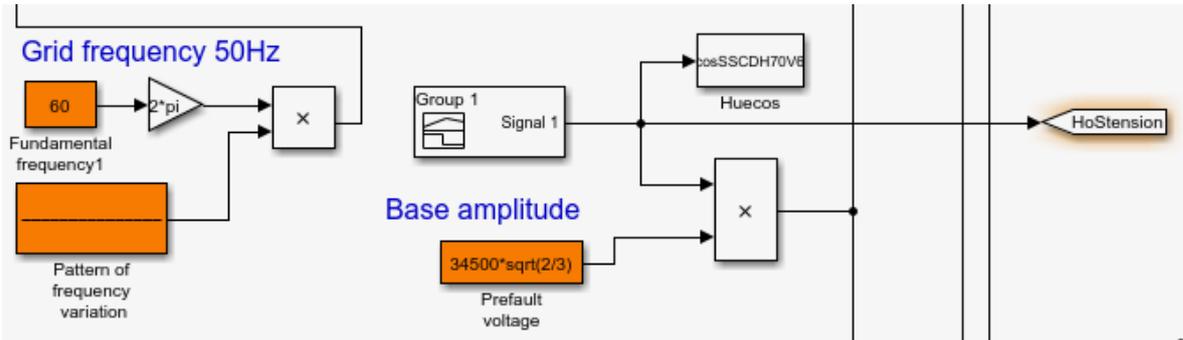


Ilustración 16: Bloque para generar huecos y sobretensiones

En la Ilustración 17, una señal de huecos de tensión generados con 70% de profundidad, y un hueco de recierre producido después del hueco de tensión si este no es solucionado, por lo que se puede observar dos huecos con una duración de 110 ms cada uno.

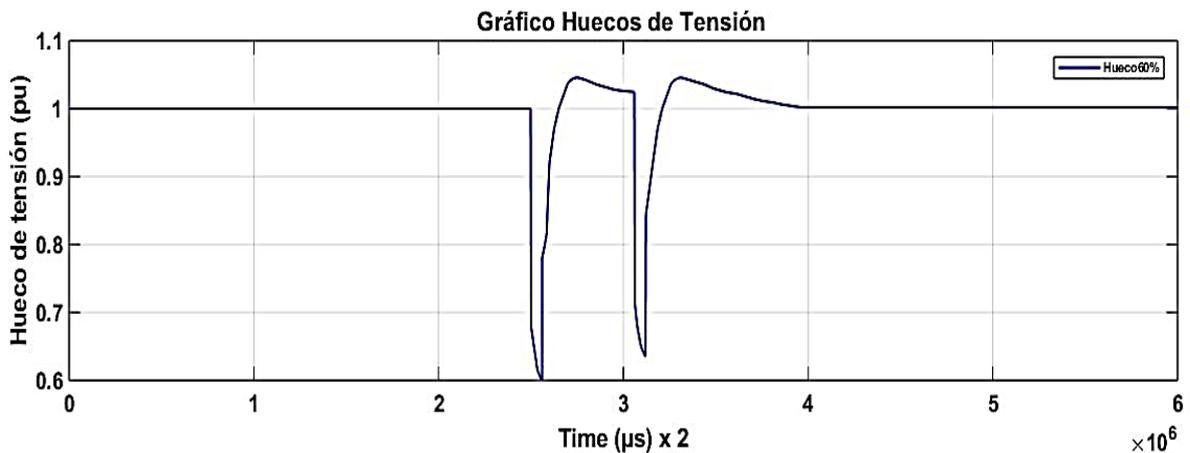


Ilustración 17: Huecos de tensión de 70% de la tensión nominal de 110 milisegundos de duración

Con esta y otras señales, se realizaron las simulaciones, sometiendo al modelo a diferentes condiciones, sin saturación y con disturbios tanto con

huecos como con sobretensiones, con saturación y con disturbios, así mismo, bajo diferentes condiciones de huecos y sobretensiones, estos resultados se muestran a continuación en un resumen de todas las simulaciones que se realizaron.

Las condiciones de operación que permitan determinar el comportamiento del sistema DFIG/WECS, con y sin saturación y con distintos niveles de disturbios, son

- El sistema está trabajando en lazo cerrado en relación al control de la velocidad del rotor.
- Entrada de referencia: Velocidad del viento, valor constante en 4 m/s, 5 m/s y 6 m/s y tensión de 690 voltios pico.
- Disturbios, huecos de tensión de 32%, 60% y 70% del valor de la tensión nominal, con una duración de 110 ms, con una separación de 1 segundo entre hueco y hueco de tensión.

Las variables por analizar fueron: potencia activa, potencia reactiva, velocidad del rotor y torque electromagnético.

### **Resultados del Modelo DFIG en condiciones estables**

De la simulación se encontraron datos para varias variables como son: potencia activa, potencia reactiva, velocidad del rotor, torque electromagnético, corriente del estator fase A, corriente del rotor fase A, tensión del estator fase A y tensión del rotor fase A, Sin embargo en este capítulo solo mostraré los gráficos de potencia y velocidad del rotor a velocidades de viento de 4 m/s, 5 m/s y 6 m/s. trabajando en estado estable esto es con tensión nominal de 0,690 kV y sin disturbios, tanto para el modelo con saturación, como para el modelo sin saturación, los mismos que se detallan a continuación en las Ilustración 19 y Ilustración 18.

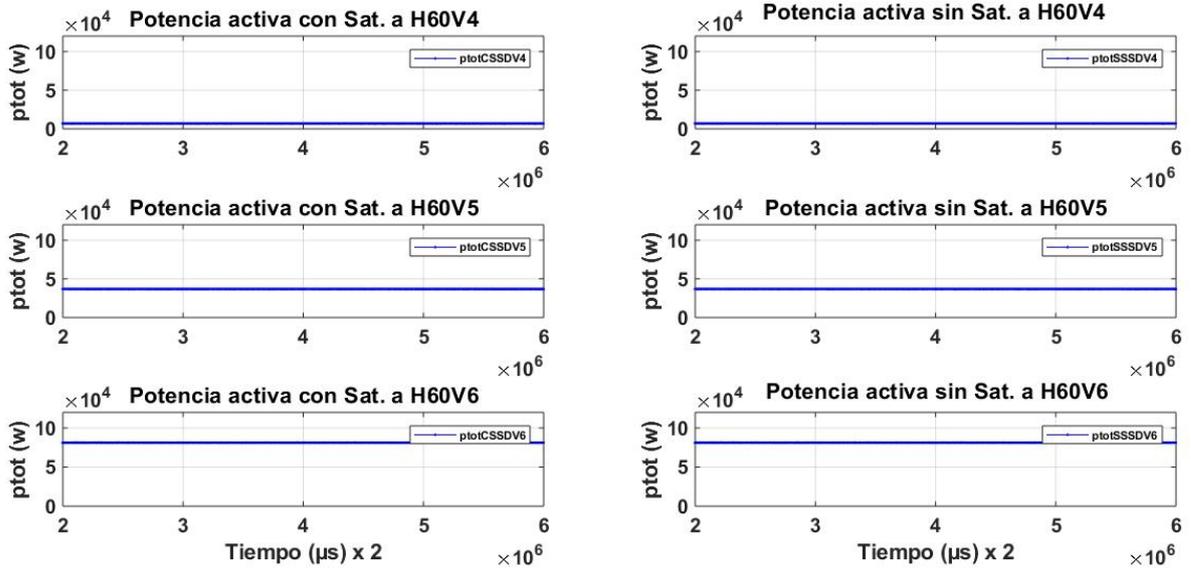


Ilustración 19: Curvas de potencia activa, a velocidades de viento de 4, 5 y 6 m/s con y sin saturación

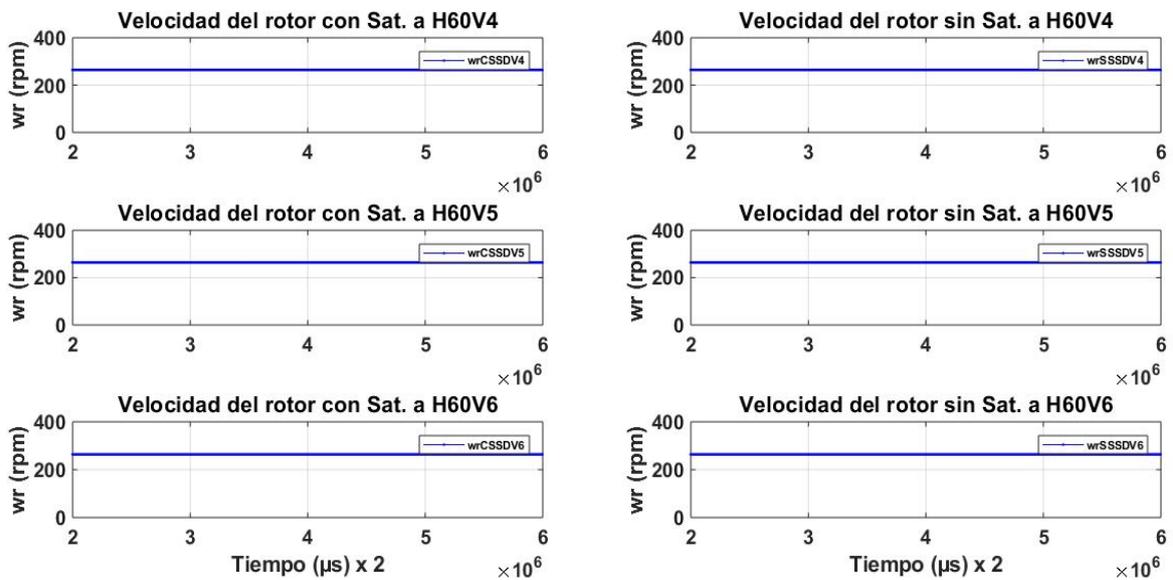


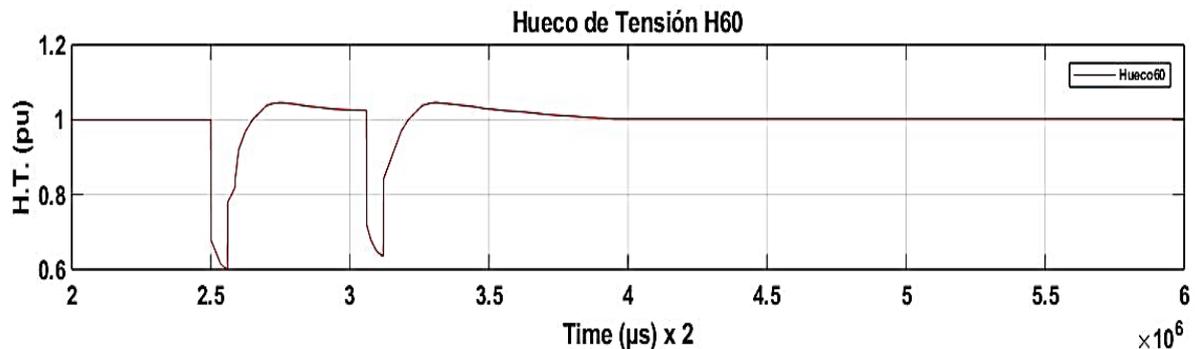
Ilustración 18: Curvas de velocidad del rotor, a velocidades de viento de 4, 5 y 6 m/s

Haciendo un analisis de las señales a velocidades de viento de 4m/s, por observación simple en el gráfico de la potencia activa no se puede apreciar las diferencias por simple observación, sin embargo determinando el valor máximo de estas señales, existe un incremento del valor de la potencia con

la saturación cambiando de un valor máximo de 7036,9 w con saturación a un valor máximo de 7044,6 w sin saturación, en estado estable. Lo mismo sucede con la variable velocidad del rotor, tampoco se puede apreciar las diferencias por simple observación, sin embargo determinando el valor máximo a que llegan estas señales existe un pequeño incremento con la saturación cambiando de un valor máximo de 263,9016 rpm con saturación a un valor máximo 263,9017 rpm sin saturación, en estado estable.

### **Resultados con el Modelo DFIG con saturación y sin saturación, simulados con huecos de tensión a diferentes velocidades de viento.**

De los datos obtenidos de la simulación para diferentes velocidades de viento y con huecos de tensión de 60% de la tensión nominal seguido por un recierre de 63,5% de la tensión nominal, el mismo que se muestra en la Ilustración 20 y que será utilizado para hacer la simulación y encontrar los datos de las variables a utilizar en esta investigación.



*Ilustración 20: Huecos de tensión para la simulación a diferentes velocidades*

Con estos huecos de tensión se obtuvo los gráficos, tanto con el modelo con saturación como con el modelo sin saturación.

La Ilustración 21, muestran las curvas obtenidas para la potencia a diferentes velocidades de viento.

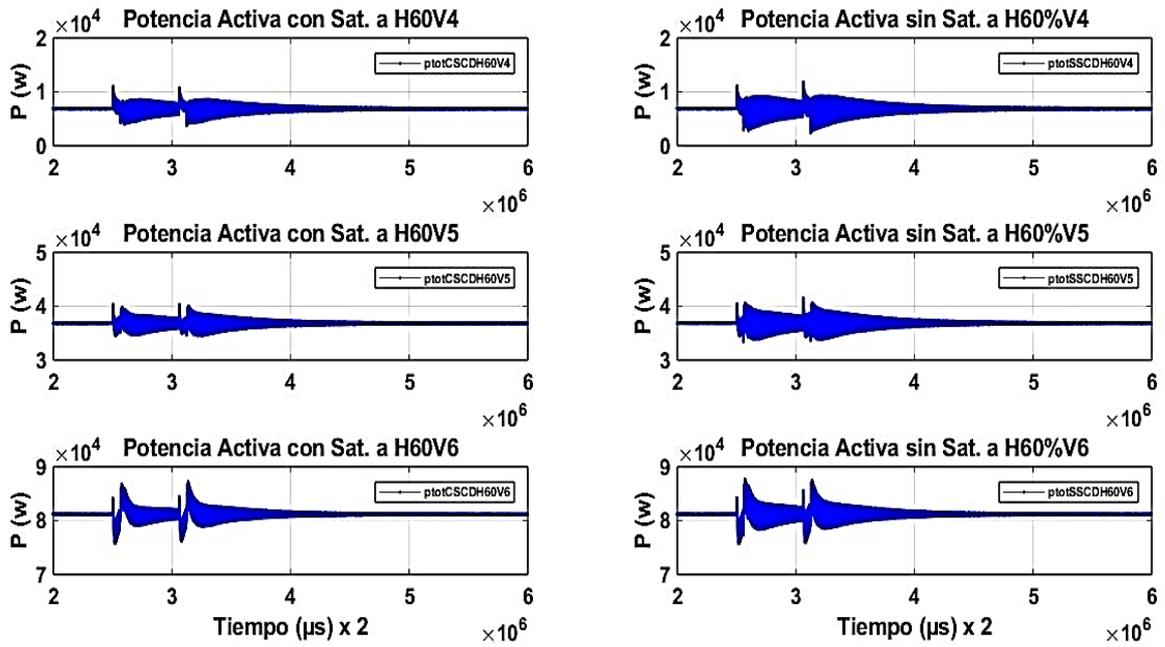


Ilustración 21: Potencia activa, con y sin saturación a huecos de tensión de 60% y Velocidad de viento 4, 5 y 6 m/s

Si se realiza un análisis visual, se pueden observar que se presentan pequeños cambios principalmente en los huecos de mayor profundidad, debido precisamente al efecto de la saturación incorporado al generador.

Analizando las curvas de potencia reactiva mostradas en la Ilustración 22,

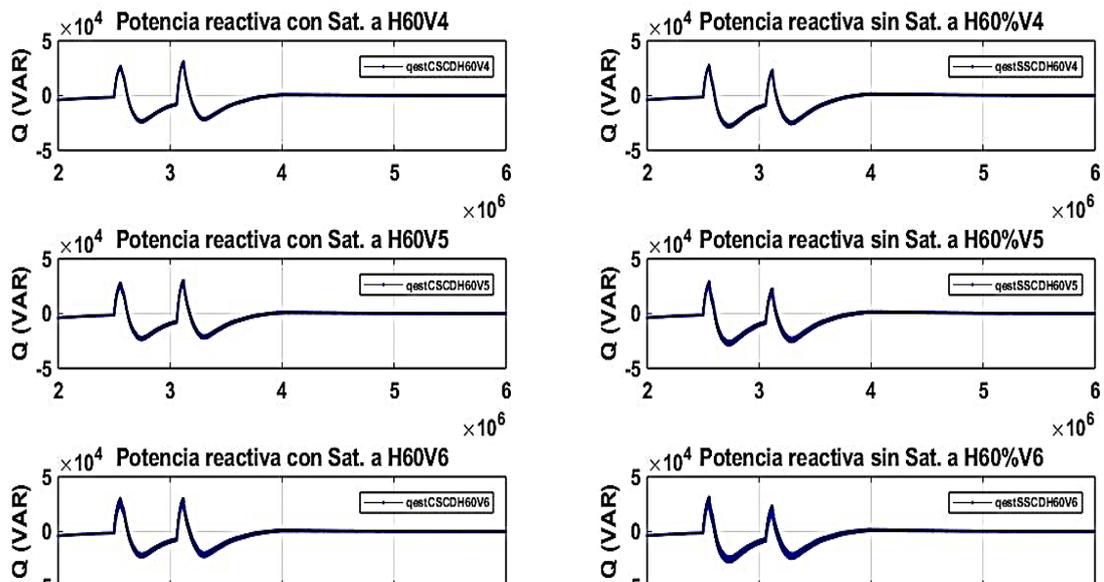


Ilustración 22: Potencia reactiva, con y sin saturación a huecos de tensión de 60% y Velocidades de viento de 4, 5 y 6 m/s.

puede visualizar claramente pocas diferencias existentes, con una pequeña variación en huecos de mayor profundidad, y que se debe a proceso de recuperación del sistema, cuando esta potencia reactiva está siendo entregada al sistema en un hueco de tensión y la relación entre ambas con y sin saturación es visible con huecos de tensión del 60% y velocidades de viento de 6 m/s.

En la gráfica de la Ilustración 23, se observa la velocidad del rotor, que con huecos de tensión se aprecia diferencias en cuanto a que con saturación se observa mayor estabilidad.

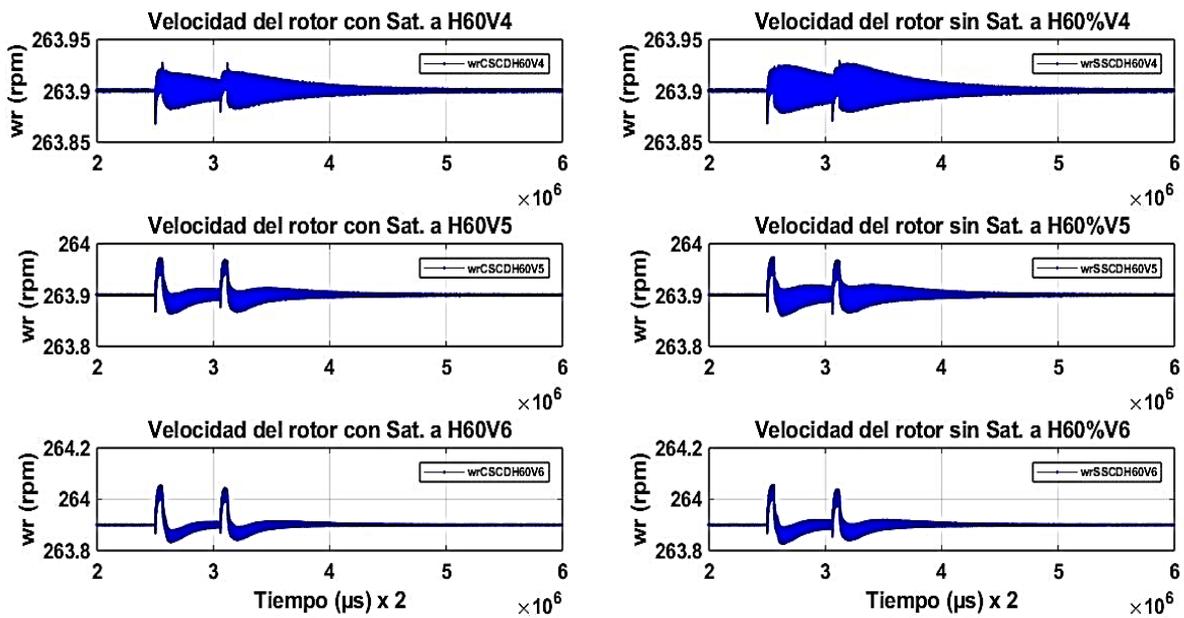


Ilustración 23: Velocidad del rotor, con y sin saturación a huecos de tensión de 60% y Velocidad de viento 4, 5 y 6 m/s.

Existe muy poca diferencia entre el sistema con saturación con el sistema sin saturación principalmente en la estabilidad de la velocidad, el primero se mantiene más estable incluso con las sobretensiones elevadas, igual sucede con el torque mostrado en la Ilustración 25, donde se puede observar diferencias mínimas principalmente en los huecos con mayor profundidad, pero se puede observar que las curvas presentan mejor estabilidad.

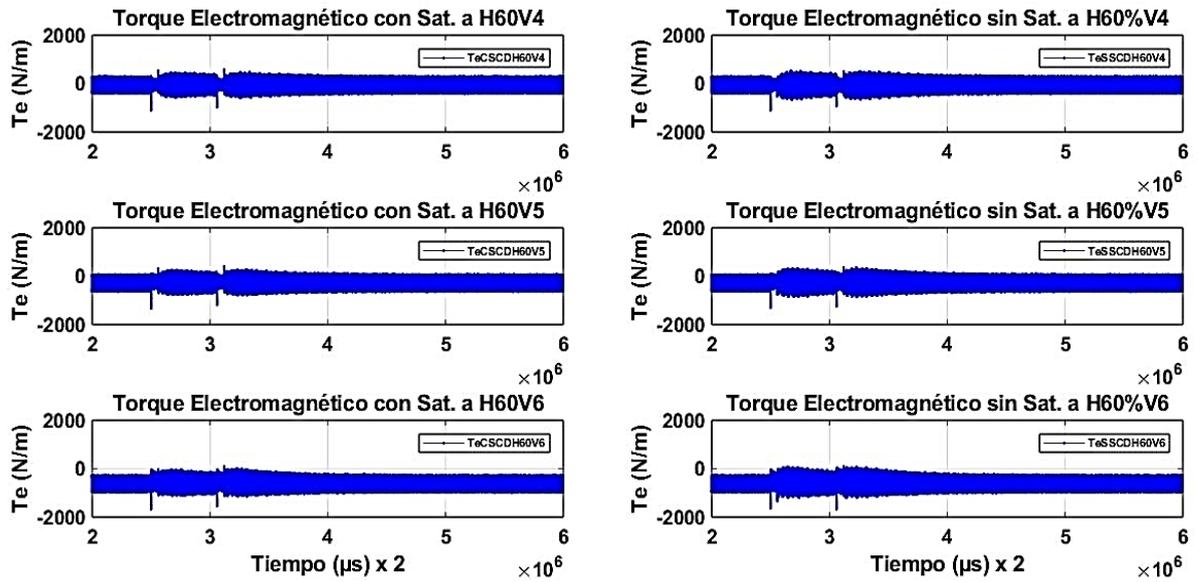


Ilustración 24: Torque electromagnético, con y sin saturación a huecos de tensión de 60% y Velocidad de viento 4, 5 y 6 m/s

Se puede apreciar pequeñas diferencias por simple observación en las curvas de la Ilustración 24, para las diferentes entre las señales con saturación y sin saturación a diferentes velocidades del viento, se considera más estable con la utilización del modelo con saturación.

En se puede observar otras figuras y el comportamiento ante huecos de tensión, de las corrientes del estator y del rotor, de las tensiones del estator y del rotor, para las velocidades de viento de 4, 5 y 6 m/s.

## Resultados con el Modelo DFIG con saturación y sin saturación, simulados con disturbios, y varios huecos de tensión.

La simulación se realiza con un patrón de huecos de tensión mostrados en la Ilustración 25, los mismos fueron elaborados en base a huecos reales que se producen en el sistema electro energético cubano.



Ilustración 25: Pares de huecos de tensión 60%, 32%, 60%, 70%, 32% y 70% de la tensión nominal

Con este patrón de huecos encontramos simulamos en Simulink y encontramos las curvas de potencia activa y velocidad del rotor mostradas en la Ilustración 26, la misma que esta simulada a una velocidad del viento de 6 m/s:

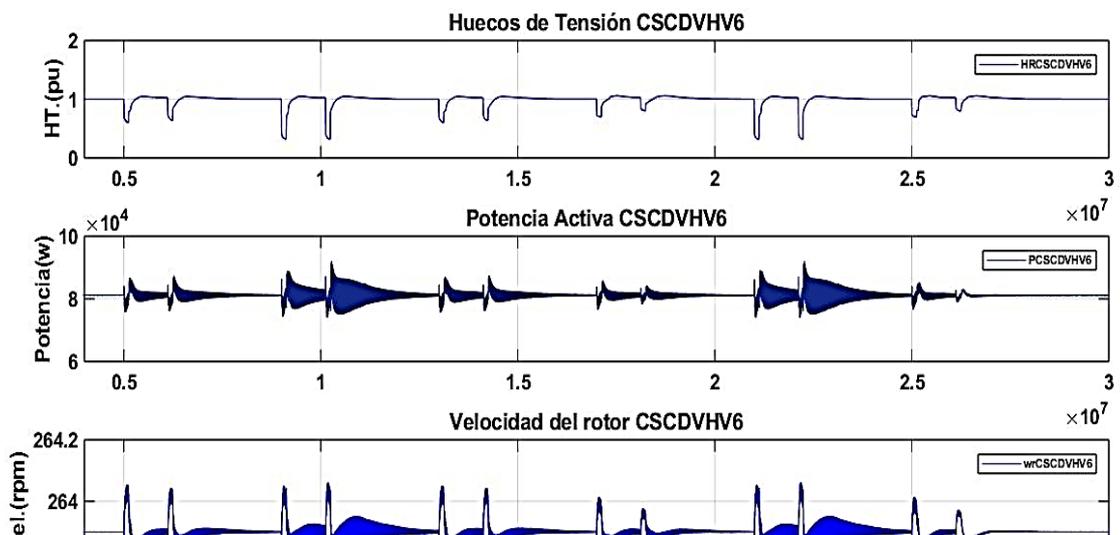


Ilustración 26: Curvas de potencia y velocidad del rotor para la velocidad del viento 6 m/s.

Se puede observar que cuando los huecos son más profundos el sistema no se recupera tan fácilmente, sin embargo, cuando los huecos de tensión son menos profundos el sistema se recupera más rápidamente. Esta es la desventaja fundamental que presenta el DFIG. Un hueco de tensión provoca que las corrientes se eleven y oscilen y si el hueco de tensión es muy profundo se puede perder el control del DFIG.

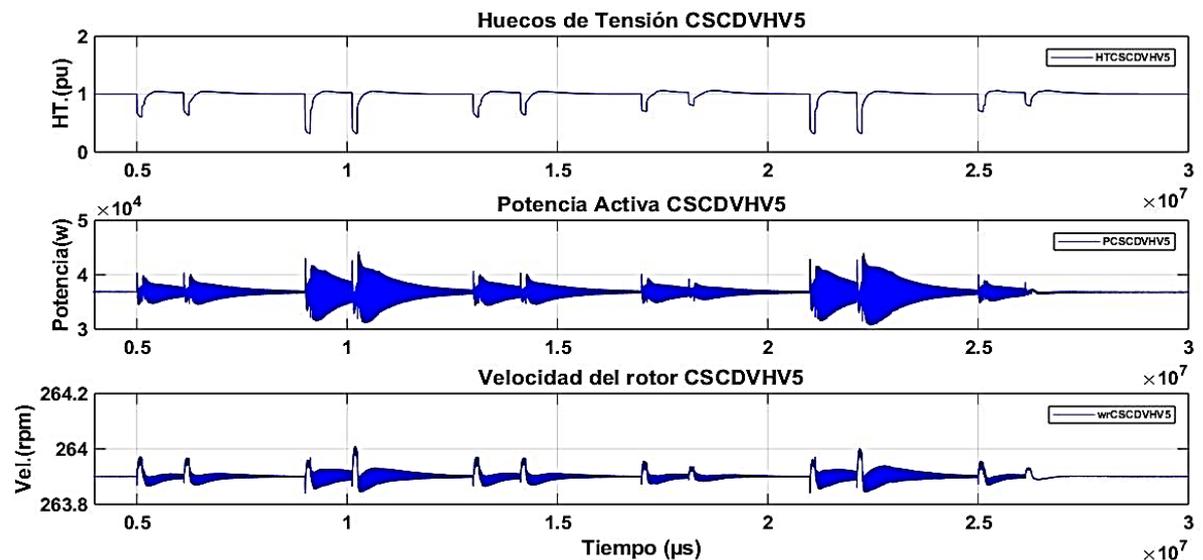


Ilustración 27: Curvas de potencia y velocidad del rotor para la velocidad del viento 5 m/s

En la Ilustración 27 se observan las curvas de la potencia activa y velocidad de la máquina para una velocidad de 5 m/s, partiendo del patrón de huecos definidos en la Ilustración 25, mientras que en la Ilustración 28 están representadas para 4 m/s.

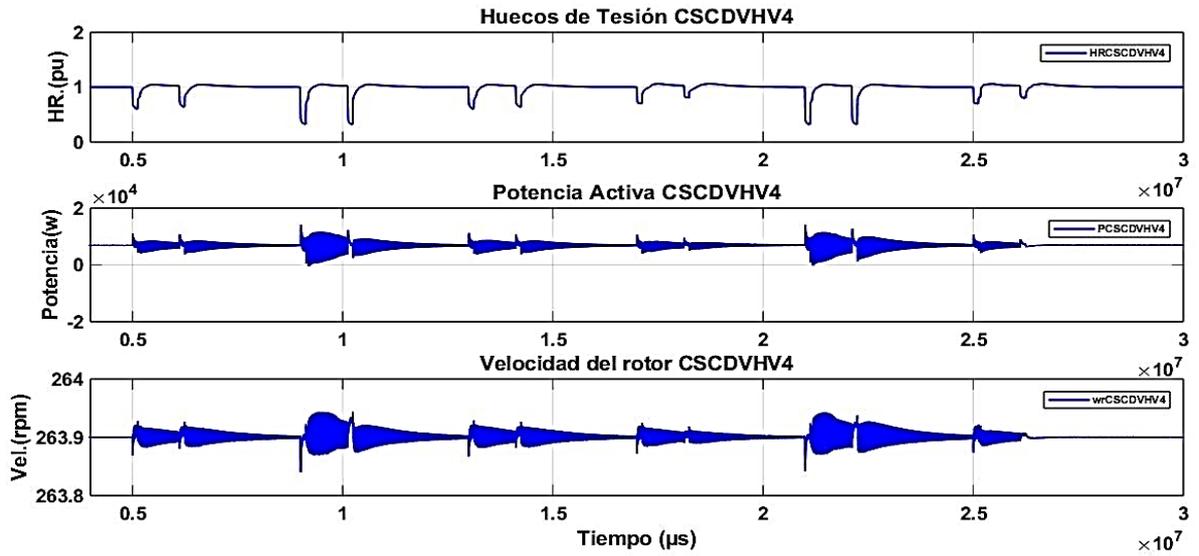


Ilustración 28: Curvas de potencia y velocidad del rotor para la velocidad del viento 4 m/s

En la Ilustración 29 se observan las curvas de la potencia activa y velocidad de la máquina para una velocidad del viento variando de 5 m/s a 6 m/s m/s utilizando el mismo patrón de huecos.

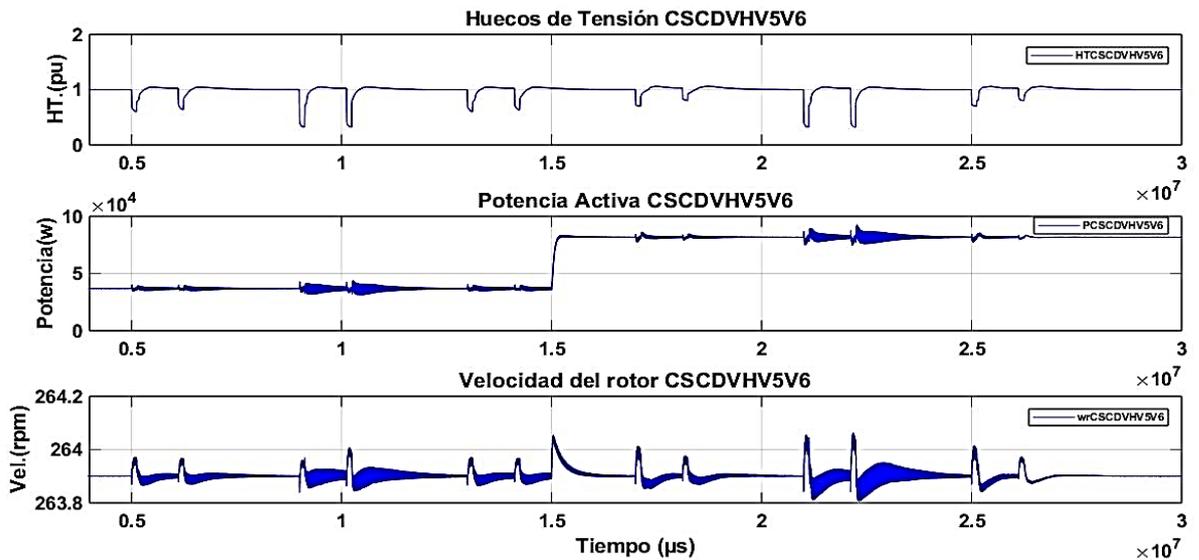


Ilustración 29: Curvas de potencia y velocidad para la velocidad del viento 5 m/s y 6 m/s

En la Ilustración 29, se observa como el sistema responde a los cambios de la velocidad del viento que pasa de 5 m/s a 6 m/s, estabilizándose rápidamente.

Las diferentes curvas que se han obtenido para la potencia activa demuestran que el modelo saturado reacciona ante cualquier cambio, sea este, de tensión o de la velocidad del viento. Además, se observa que los cambios en la tensión de entrada producen cambios en la inductancia de magnetización, lo que puede observarse en la Ilustración 30.

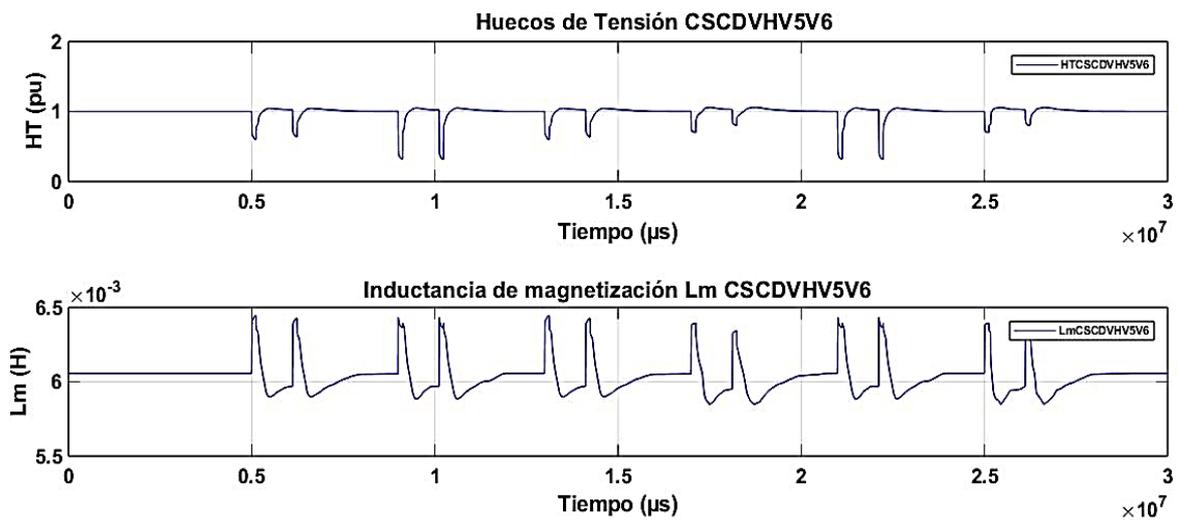


Ilustración 30: Curva de inductancia de magnetización  $L_m$ , en función del patrón de huecos de tensión a velocidad del viento 6 m/s

En la Ilustración 30, se ejemplifica el comportamiento proporcionado por el modelo desarrollado de la Inductancia de magnetización en el sistema, debido precisamente a la presencia de la saturación cuando existe una caída o hueco de tensión. Esto se corresponde con el comportamiento lógico esperado en esta variable, evidenciando con esto la influencia de esta no linealidad en el comportamiento general del proceso.

## **Comparación entre los modelos saturados y no saturados**

Como resultados de la simulación se puede decir, que cuando se trabaja sin considerar el efecto de la saturación en el modelado, el sistema trabaja en la zona lineal con una inductancia de magnetización constante que en este caso es igual a  $L_{m0}$ , que tiene un valor de 0,00621 H, sin importar si sobrepasa las características de linealidad, afectando la calidad de los datos para poder hacer un estudio más adecuado del comportamiento del generador y del sistema en sí.

Con pequeños cambios en la tensión de entrada, se producen cambios inmediatamente en la inductancia de magnetización.

Para facilitar la comparación del comportamiento de las variables de estudio con y sin saturación ante iguales disturbios en la tensión se realizan simulaciones específicas para huecos de tensión del 65% y si el proceso no se recupera se produce otro hueco de 63,5% del valor de la tensión nominal, descrito en la Ilustración 20.

En la simulación se analizaron las potencias tanto activas como reactivas, la velocidad del rotor y el torque electromagnético.

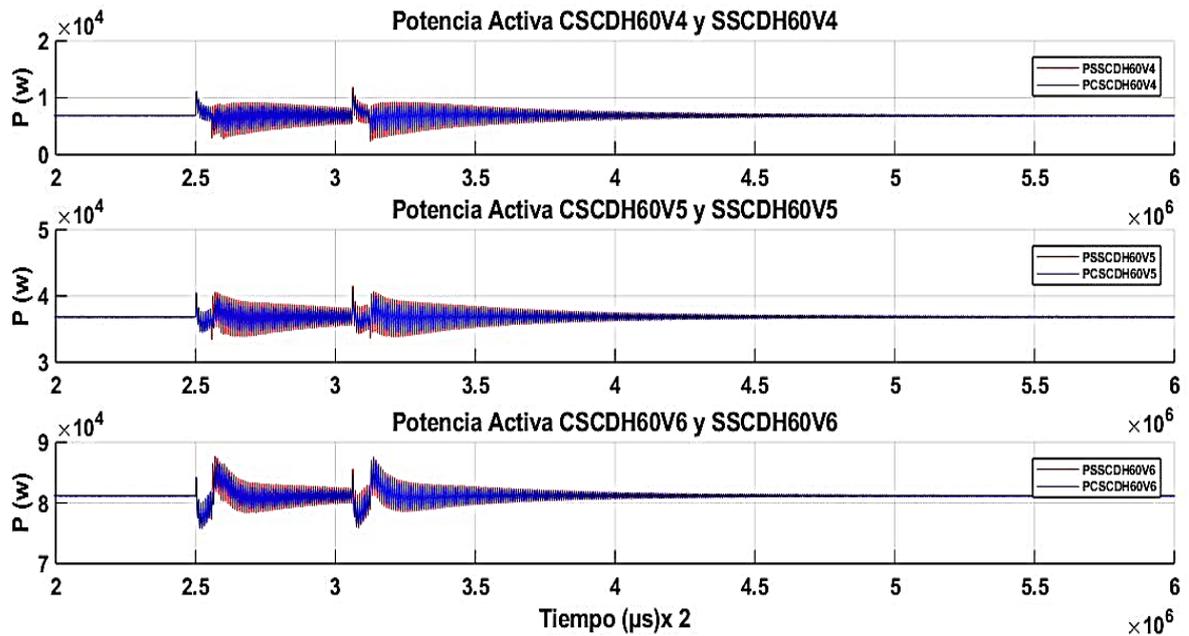


Ilustración 31: Curvas de Potencia activa con disturbios, huecos de 60% del valor nominal con y sin saturación.

Las curvas de la Ilustración 31, está identificadas por colores azul y rojo para poder distinguir fácilmente las pequeñas diferencias en los dos modelos que permiten por observación ver las diferenciar fácilmente. La curva en azul representa la potencia activa con saturación y con disturbio, huecos de tensión del 60% del valor nominal, mientras que la curva en rojo representa la potencia activa sin saturación y con las mismas condiciones de disturbio indicadas anteriormente. Se puede observar también, que la potencia activa con saturación varía en menor proporción que la potencia activa sin saturación y llega a valores pico más pequeños que sin saturación, lo que significa que el bloque está actuando sobre el sistema, reflejando mejor las condiciones reales del generador con el efecto de la saturación.

Igual comportamiento ocurre con la potencia reactiva, en el caso de los huecos de tensión

Es importante resaltar que en la Ilustración 32 la potencia reactiva llega a valores pico más bajos, eso se debe a que almacena el exceso de potencia en el DFIG y no la transfiere al sistema global.

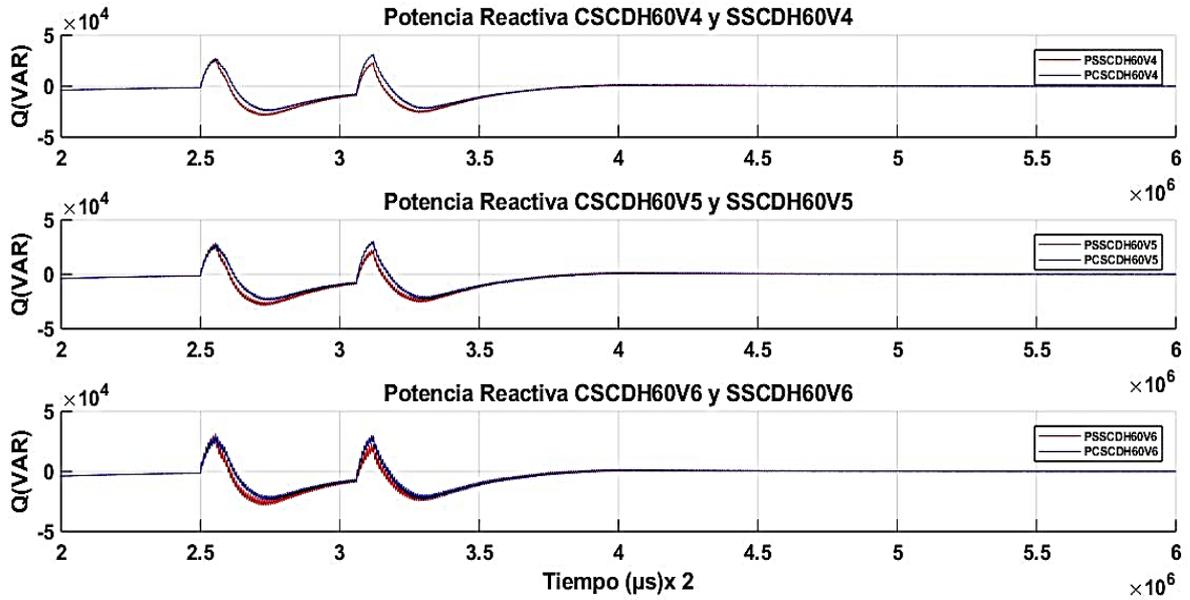


Ilustración 32: Curvas de Potencia reactiva con disturbios, huecos de 60% del valor nominal con y sin saturación.

Es la Ilustración 32 se puede apreciar las diferencias existentes en la velocidad del rotor, con y sin saturación, la velocidad llega a valores pico más bajos

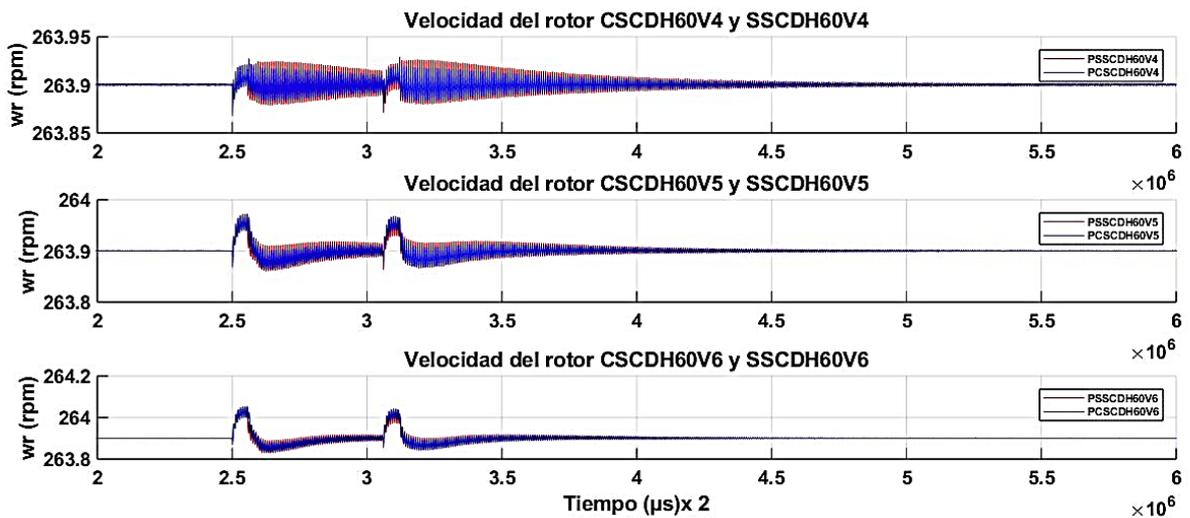


Ilustración 33: Curvas de la velocidad del rotor con disturbios, huecos de 60% del valor nominal con y sin saturación.

Observando las gráficas de la Ilustración 34, del torque electromagnético, bajo las mismas condiciones con y sin saturación, el comportamiento es mucho más estable cuando los huecos de tensión inician que cuando ya tienden a estabilizarse, haciendo que el generador produzca más torque mecánico cuando más huecos están llegando al sistema, pero el sistema se estabiliza en aproximadamente 1 segundo.

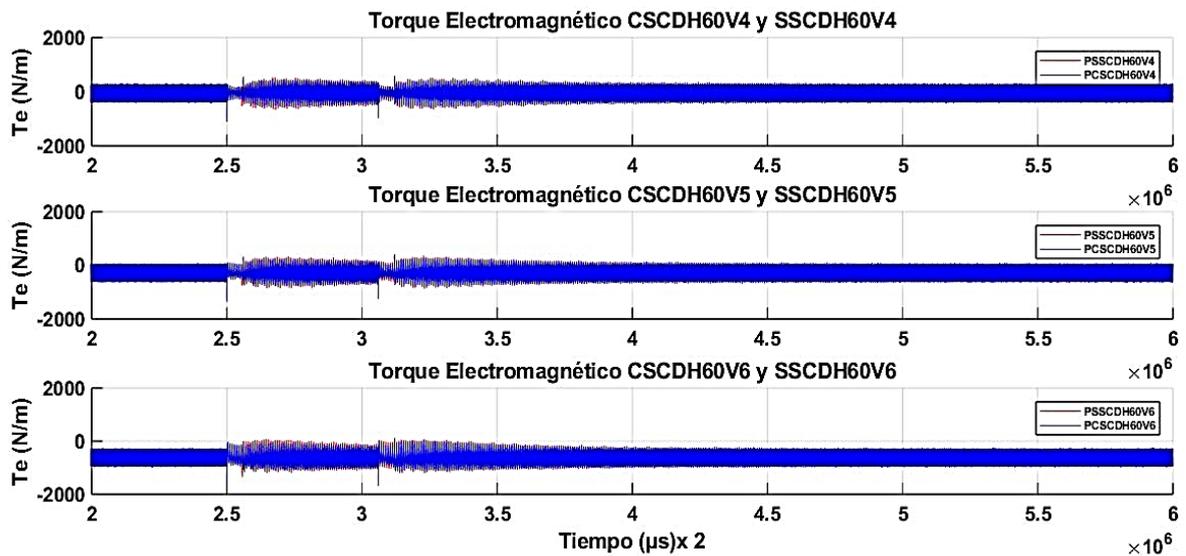


Ilustración 34: Curvas de torque electromagnético con disturbios, huecos de 60% del valor nominal con y sin saturación.

Una vez hecho un análisis del comportamiento del sistema con y sin saturación y con varios valores de huecos de tensión, se puede decir que, el modelo realizado es factible de utilizar, ya que refleja de forma más real el comportamiento del sistema DFIG-WECS trabajando en estas condiciones especiales.

### **Capítulo 3.- identificación en los DFIG.**

En esta sección se aplican los procedimientos estándares de sistemas de identificación, que denominamos identificación básica, para la determinación de las principales dinámicas de comportamiento en el sistema de generación. Esencialmente en primer lugar, se debe establecer los modelos que deben ser identificados, relacionando las variables que caracterizan estas principales dinámicas y a continuación aplicar los procedimientos estándares tanto basados en los métodos de identificación lineal como de identificación no lineal, con vistas a concluir sobre las capacidades de cada uno en este sistema.

#### **Consideraciones para la identificación**

Las condiciones para identificación parten de que los datos obtenidos corresponden al sistema trabajando con el subsistema de control de velocidad, implicando con ello el concepto de lazo cerrado para realizar la identificación. Como condiciones del sistema se consideraron:

- C1. El sistema está trabajando en lazo cerrado en relación con el control de la velocidad del rotor.
- C2. Entrada de referencia: Velocidades del viento en el rango de 4 a 6 m/s.
- C3. Disturbios:
  - o Huecos de tensión. Pulsos aperiódicos, con duración de 120 ms, con profundidades entre 10% y 30%
- C4. Como principales variables dinámicas de salida caracterizando al sistema: potencia activa y velocidad del rotor.
- C5. Generación de datos para la identificación

A continuación, una descripción de cada una de las condiciones anteriores

Se consideraron estos disturbios porque son los que más frecuentemente se producen debido a cambios en las líneas de alta tensión por varios aspectos.

Los experimentos básicos realizados son para la obtención del comportamiento de la potencia y de la velocidad del rotor respecto tanto a presencia de huecos de tensión, como elevación de tensión.

Las condiciones para identificación parten de que los datos obtenidos corresponden al sistema trabajando con el subsistema de control de velocidad, implicando con ello el concepto de lazo cerrado para realizar la identificación. Como condiciones del sistema se consideraron:

- C6. El sistema está trabajando en lazo cerrado en relación con el control de la velocidad del rotor.
- C7. Entrada de referencia: Velocidades del viento en el rango de 4 a 6 m/s.
- C8. Disturbios:
  - o Huecos de tensión. Pulsos aperiódicos, con duración de 120 ms, con profundidades entre 10% y 30%
- C9. Como principales variables dinámicas de salida caracterizando al sistema: potencia activa y velocidad del rotor.
- C10. Generación de datos para la identificación

A continuación, una descripción de cada una de las condiciones anteriores

### ***Sobre el lazo cerrado***

El lazo cerrado en el sistema es el de control de la velocidad del rotor  $W_r$  que se representa en la Ilustración 35, donde, además:

$RW_r(s)$ : Valor de referencia o valor deseado calculado para esa velocidad.

$U(s)$ : Señal de comando al sistema de accionamiento de la velocidad del rotor.

$E(s)$ : Señales independientes que influyen en la velocidad del rotor (Ruido)

$R(s)$ : Ruido en la salida de controlador.

$H(s)$ : Representa la dinámica de la influencia del ruido en la salida

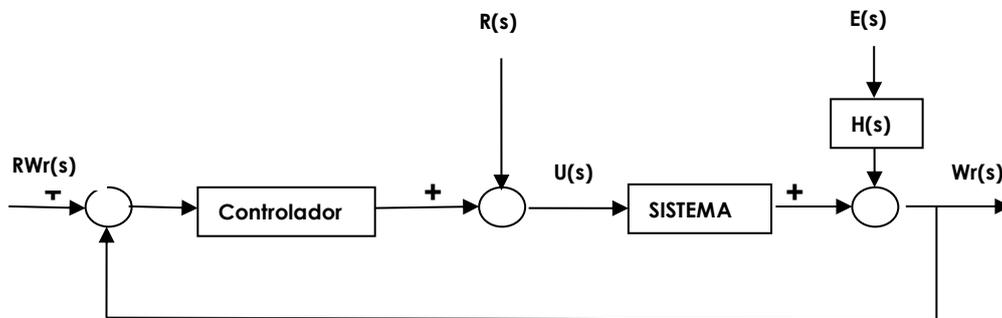


Ilustración 35: lazo cerrado de velocidad del rotor

La situación experimental que refleja la estructura representada en esta figura implica las siguientes expresiones en el dominio del tiempo, con  $q$  representando el operador desplazamiento:

$$w_r(t) = G(q) * u(t) + H(q) * e(t) \quad (3.1)$$

$$u(t) = C(q) * [Rw_r(t) - w_r(t)] + r(t) \quad (3.2)$$

Donde  $G(q)$  y  $C(q)$  corresponden a las funciones de transferencia de los bloques denominados Sistema y Controlador, respectivamente.

Siendo  $u(t)$  la señal de interés a considerar como entrada para la aplicación de los procedimientos de identificación, esta puede ser expresada como

$$u(t) = r(t) + C(q) * Rw_r(t) - C(q) * w_r(t) \quad (3.3)$$

Las variables  $w_r(t)$  y  $u(t)$ , representadas en las expresiones 3.1 y 3.3 serán entonces las utilizadas para los procedimientos de identificación. En esta última expresión denominaremos entrada total equivalente la combinación

de  $r(t)$  y  $w_r(t)$  en los dos primeros términos en el lado derecho, la que se denominará  $x(t)$

$$x(t) = r(t) + C(q) * R w_r(t) \quad (3.4)$$

Se aprecia de las anteriores expresiones que la entrada al sistema de accionamiento a la velocidad del rotor  $u(t)$  y el ruido  $e(t)$  quedan como variables correlacionadas por la presencia de la retroalimentación vía el controlador.

Finalmente, respecto a este sistema de lazo cerrado para la velocidad del rotor se considera:

- Es un sistema estable
- La señal  $r(t)$  es una variable determinada acotada (en el modelo puede introducirse directamente)
- $e(t)$  es una variable aleatoria independiente con media cero.

Sin considerar el lazo de retroalimentación es posible aplicar un método de identificación para sistemas en lazo abierto, denominado entonces Método Directo, tomando las variables de entrada y salida como las obtenidas directamente del sistema a identificar. En este caso obtenidas por simulación del modelo general del sistema de generación. Pero esta consideración implicaría asumir determinadas restricciones en la entrada general  $x(t)$  en cuanto a su grado de excitación y orden, lo cual no se garantiza para los patrones de huecos de tensión a utilizar y considerar además que no está correlacionada con  $e(t)$ .

Para resolver esta situación, existen varios métodos, entre ellos el método de identificación en dos pasos, en el cual se introduce la función matriz de sensibilidad en la entrada,  $M(s)$ , resultando en

$$u(t) = M(q) * x(t) - M(q) * C(q) * H(q) * e(t) \quad (3.5)$$

Siendo

$$M(q) = (I + C(q) * G(q))^{-1} \quad (3.6)$$

Esta función de sensibilidad debe entonces ser identificada, en un primer paso, manteniendo la condición de no correlación entre  $x(t)$  y  $e(t)$ , y necesitando tener los valores de  $u(t)$ . Como un segundo paso se reconstruye una señal equivalente a la entrada  $u_e(t)$  transformando la entrada general  $x(t)$  por medio de la función de sensibilidad:

$$u_e(t) = M(q) * x(t) \quad (3.7)$$

Y entonces aplicar un método de identificación del error de predicción  $\xi(t)$  en una estructura de modelo acorde a:

$$w_r(t) = G(q, \alpha) * u_e(t) + N(q, \beta) * \xi(t) \quad (3.8)$$

Independientemente de exitosas aplicaciones que ha tenido este método en la identificación de diversos procesos industriales, las fuertes restricciones que impone este método en las condiciones dinámicas en la entrada (excitabilidad y persistencia) limita su aplicación en el caso del análisis de la respuesta de los sistemas de generación que se estudian en este trabajo frente a huecos de tensión, los cuales no presentan la variabilidad necesaria en cuanto a magnitud y normalmente tienen una duración aproximadamente igual en cada caso, ha sido aplicado con éxitos en algunos procesos industriales, incluso incluyendo sistemas no lineales, este método constituye uno de los candidatos a experimentar.

### ***Sobre la velocidad del viento.***

La velocidad del viento en la zona donde se encuentra el sistema de generación eólica tomado como referencia se encuentra generalmente entre 4 y 6 m/s. El comportamiento de esta variable se considera totalmente

independiente respecto al sistema. Como fue efectuado en el capítulo anterior, solo se considerarán los valores constantes de 4, 5 y 6 m/s. No se pierde generalidad porque en las simulaciones experimentales para generar datos para la identificación se pasa aleatoriamente de un valor a otro.

### ***Sobre los disturbios***

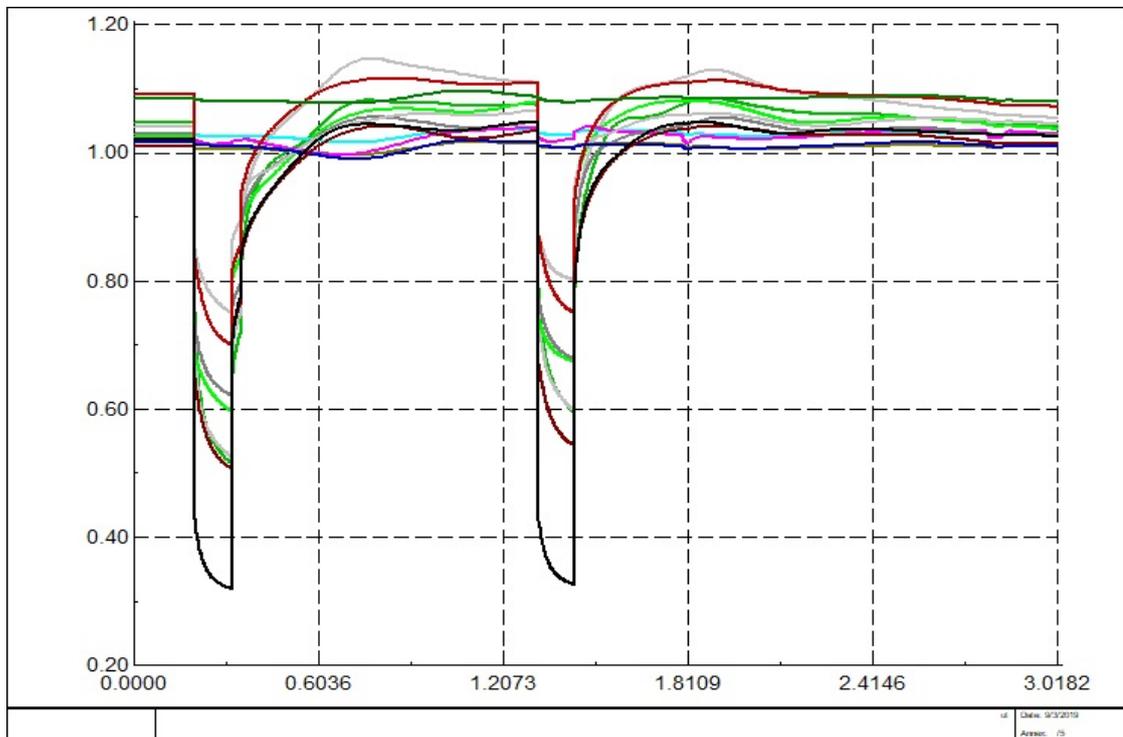
Como expuesto en el capítulo anterior son varios los tipos de disturbios que pueden afectar la operación en estos tipos de sistemas de generación, a saber, cortocircuitos, subidas o huecos de tensión, etc. Los huecos de tensión son considerados de importancia y en este trabajo se considera como la variable fundamental para la identificación dado que de esta forma se cumple con uno de los objetivos fundamentales de la investigación.

En el capítulo anterior se explicó el comportamiento básico de estos huecos, así como las causas de estos. Básicamente este comportamiento es con un patrón consistiendo en máximo dos huecos consecutivos, como se muestra en las figuras Ilustración 28.

Desde el punto de vista de la aplicación de los procedimientos de identificación se establecerán una serie de patrones consecutivos, cada uno de dos huecos, a fin de lograr generalidad en los modelos paramétricos resultantes de los diferentes procedimientos.

En la Ilustración 36 se muestra la cadena de diferentes patrones de huecos de tensión usada. Estos patrones corresponden a patrones reales de huecos que ocurren en el sistema real que se toma como estudio, Gibara 1. Se observa que la misma está conformada por una secuencia de patrones de huecos, con el objetivo de lograr cumplir con el requisito de excitabilidad de la entrada para sacar la mayor cantidad de dinámicas del sistema. En la misma se observa que cumple con las características fundamentales que contienen estos huecos de tensión, como medidos en el Sistema

Electroenergético Nacional, expuestas en el capítulo anterior, a saber, forma de onda no cuadrada, cada patrón compuesto por dos huecos y duración promedio de cada hueco de 120 ms. Los patrones se toman distanciados 4 s, tiempo suficiente para lograr alcanzar un relativo estado estable después de cada patrón.



*Ilustración 36: Huecos de tensión tomados de una simulación del sistema electroenergético cubano.*

A fin de lograr la generalidad deseada en los modelos a estimar se consideran diferentes profundidades de huecos, en este caso del primero al último patrón con profundidades de 0.60, 0.32, 0.60, 0.07, 0.32 y 0.7 medido por unidad ( $pu$ ) respecto a la tensión nominal. El segundo hueco del patrón con profundidad ligeramente inferior a la del primer hueco, siendo esta diferencia proporcional en alguna forma a la magnitud de la profundidad. A mayor profundidad, la diferencia es menor, este patrón de huecos se muestra en la Ilustración 37.

En resumen, los valores de las variables que se considerarán como entrada, viento y patrones de los huecos (duración y profundidad) son tomados de los valores reales en el sistema estudiado, Gibara 1, garantizando con ello poder realizar una mejor evaluación de los resultados obtenidos con los modelos estimados por los procedimientos de identificación aplicados.

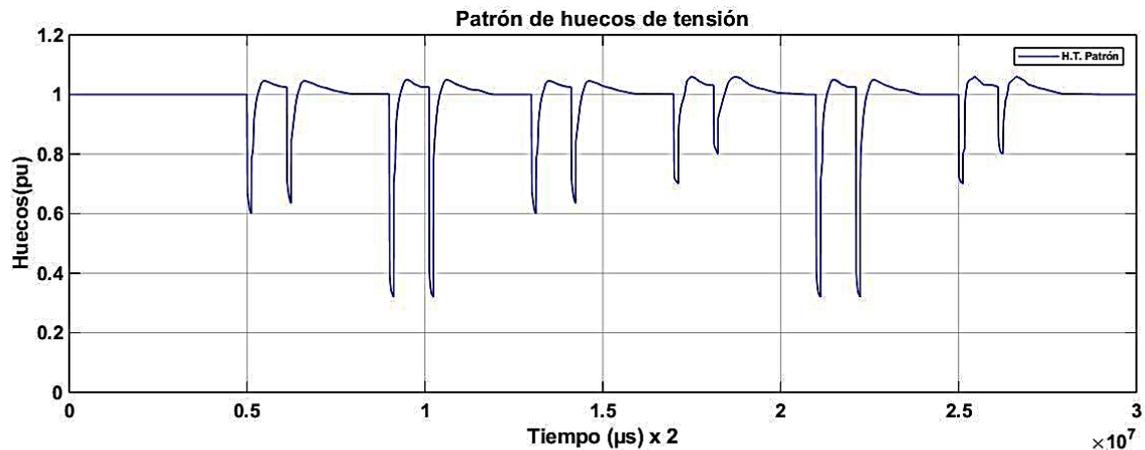


Ilustración 37: Patrón de huecos de tensión

### **Sobre las variables de salida**

Varias variables tecnológicas en estos sistemas de generación pueden ser consideradas para representar los principales objetivos de operación en estos tipos de sistemas: Potencia, activa y reactiva, velocidad del rotor, intensidad de corriente y tensión en estator y rotor, torque desarrollado, entre otras. Para la investigación sobre la identificación en este sistema se selecciona la potencia activa y la velocidad del rotor. La primera, por su implicación en el objetivo fundamental del sistema de generación, la entrega de potencia al sistema eléctrico, mientras que la velocidad del rotor por su implicación en la seguridad de operación del sistema y ser objeto del sistema en lazo cerrado. El comportamiento normal y frente a disturbios de ambas variables, fue mostrado en el anterior capítulo.

### ***Sobre los datos para la identificación***

A los efectos de obtener los datos necesarios para la experimentación con los diferentes procedimientos de identificación se usará el modelo dinámico general para el sistema de generación eólica expuesto en el capítulo anterior, el que contiene el modelado desarrollado para la inclusión de la saturación magnética como alinealidad fundamental.

Dada la demostrada validez del modelo para representar los principales comportamientos dinámicos de una planta en particular frente a los disturbios de interés, se tomarán los datos obtenidos por simulación como los datos reales, dada la evidente imposibilidad de realizar experimentos en la instalación real, provocando estos disturbios. Esto es una práctica que se aplica para desarrollar experimentos relacionados con tareas de investigación en estos tipos de sistemas [85].

En la Ilustración 38 se muestra el comportamiento de la potencia activa y de la velocidad del rotor para el juego de datos de patrones de huecos mostrado en la Ilustración 37 y para una velocidad constante de viento igual a 4 m/s. Se usó este patrón para los siguientes 4 experimentos de identificación con las siguientes combinaciones de velocidad de viento:

- Experimento # 1 :      4 m/s
- Experimento # 2 :      5 m/s
- Experimento # 3 :      6 m/s
- Experimento # 4 :      5 y 6 m/s

El volumen de cada juego de datos de estas variables es grande, dado que los resultados de la simulación son en microsegundos, por lo que se precisa un preprocesamiento de estos datos, lo cual constituye objeto de la siguiente sección.

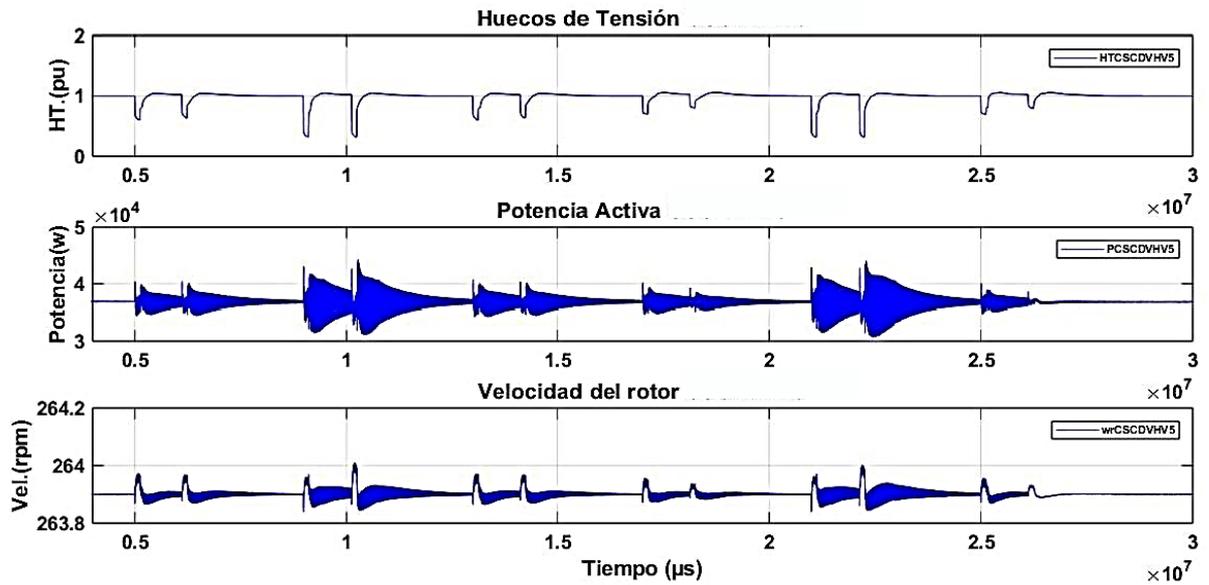


Ilustración 38: Respuesta temporal de Potencia activa y velocidad del rotor para juegos de patrones de huecos.

### Preparación de los datos para la identificación

Tanto los datos de entrada, los patrones de huecos de tensión, como los datos de potencia y velocidad del rotor, deben ser adecuadamente preparados para lograr calidad en la estimación a realizar por los procedimientos de identificación.

Una vez hecho un análisis del comportamiento del sistema con y sin saturación y con varios valores de huecos de tensión y sobretensiones, se puede decir que, el modelo realizado es factible de utilizar, ya que refleja de forma más real el comportamiento del sistema DFIG-WECS trabajando en estas condiciones especiales.

### **Entrada: Patrón de huecos**

En la Ilustración 39 se representa aisladamente un ejemplo de patrón de huecos. Este patrón es el primero de la secuencia de patrones mostrado en la Ilustración 36. En la Ilustración 40 se muestra el espectro de potencia de este patrón en la zona de frecuencias donde se obtienen varios valores distintos de cero y positivos, indicando con ello un elevado orden de persistencia de este patrón, en este caso superior a 14. Esto implica que se cumpla la condición de persistencia de la excitación provocada por este tipo de patrón y con ello la posibilidad de encontrar modelos con igual cantidad de parámetros.

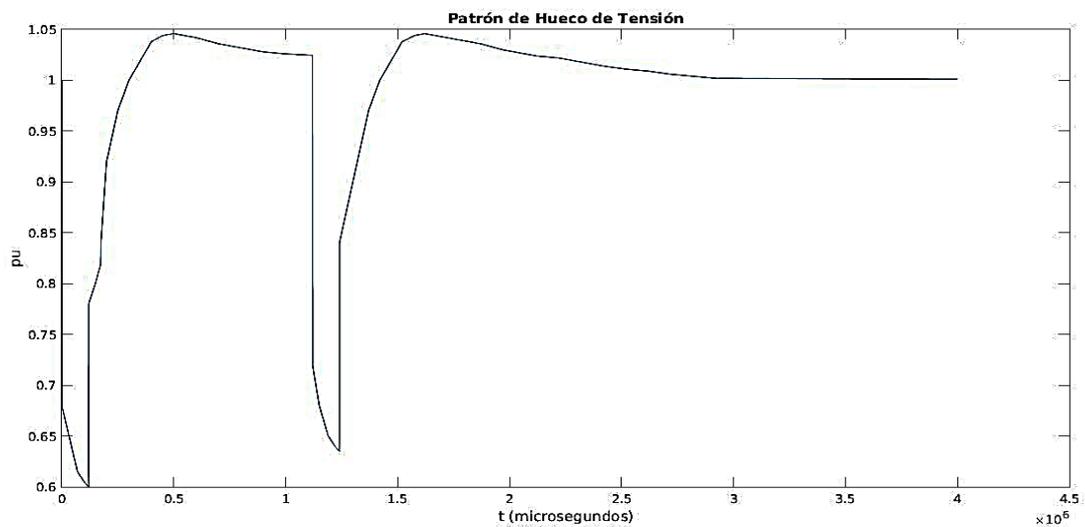


Ilustración 39: Ejemplo de patrón de huecos.

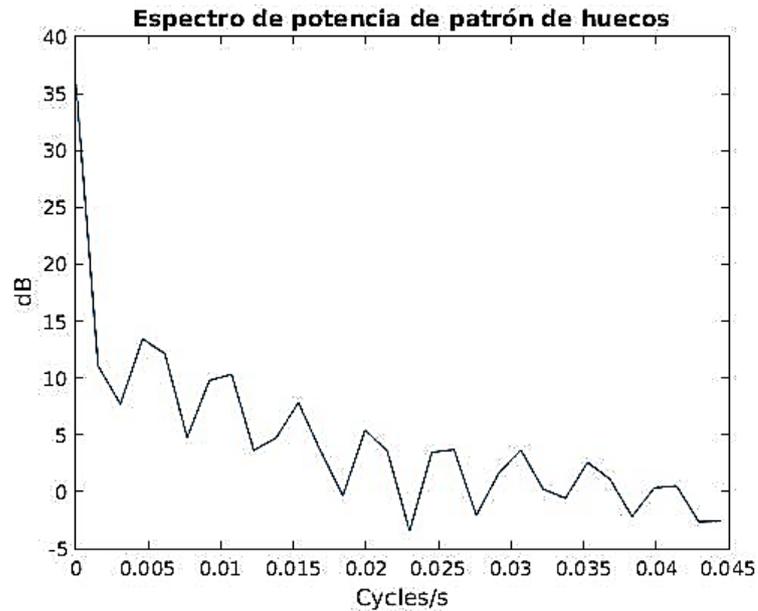


Ilustración 40: Espectro de potencia del patrón de huecos Ilustración 39

### 3.2.2 Salidas: Potencia activa y velocidad del rotor

Los datos tanto de potencia activa como de la velocidad del rotor son obtenidos del modelo del sistema cada 1 microsegundo, lo cual implica una gran cantidad de datos y con ello la necesidad de remuestrear para obtener una señal con base de tiempo en milisegundos. Como ejemplo de este remuestreo en la Ilustración 41 y Ilustración 42 se muestra el resultado para la respuesta de ambas variables al primer patrón de huecos.

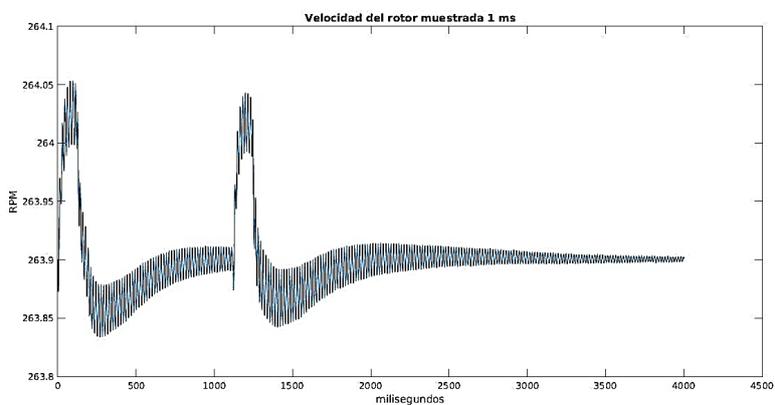
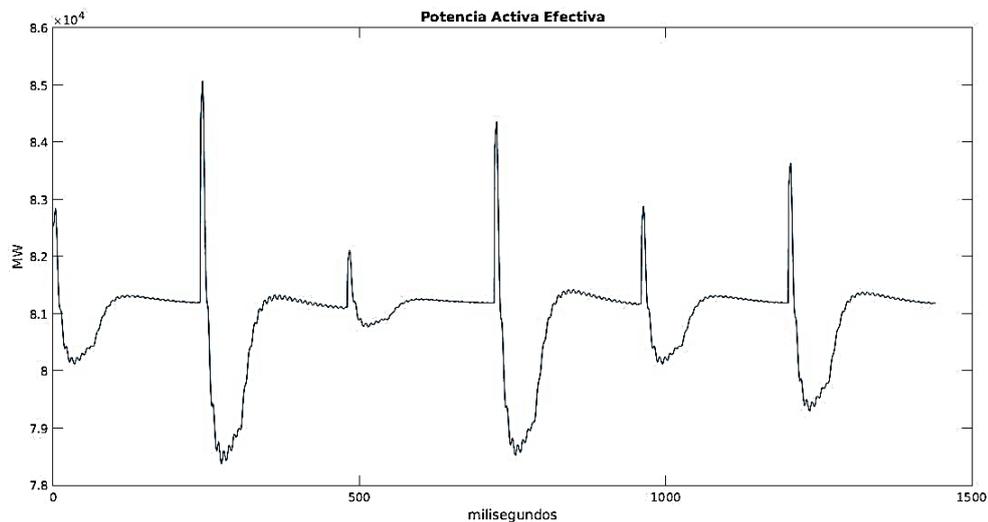


Ilustración 41: Espectro de la velocidad del rotor del patrón de huecos

Sigue observándose, según esta figura, que la señal de potencia tiene una alta componente de oscilación, dado que se está manejando potencia instantánea. Una variable alternativa y relacionada con la potencia instantánea es la potencia efectiva, calculada en tiempo real. Esta variable, denominada comúnmente valor efectivo o rms (root mean square, en sus siglas en inglés) es calculada y mostrada en la ilustración 42, resultando en una señal más suave a los efectos de los procedimientos de identificación.



*Ilustración 42: Valor efectivo de la potencia*

## **El sistema de Identificación**

Se trabajó en MathLab con el módulo ident (System Identification), que permite el ingreso de datos obtenidos mediante la simulación del modelo del sistema DFIG-WECS en la plataforma Simulink MatILab, con valores de huecos de tensión y sobretensiones descritos anteriormente.

En los siguientes epígrafes se desarrollan los sistemas de identificación lineal y no lineal respectivamente.

## Identificación Lineal

Se utilizan los datos mostrados en la Ilustración 36 como secuencia de los patrones de huecos de tensión, y los correspondientes datos de potencia y velocidad del rotor para cada uno de los cuatros experimentos antes mencionados.

Para todos los experimentos se aplicaron los métodos de identificación lineal polinomial expuestos en el capítulo 1: ARX, ARMAX, OE y BJ.

En estos modelos los polinomios vienen expresados como:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{na}q^{-na}$$

$$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{nb}q^{-nb}$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_{nc}q^{-nc}$$

$$D(q^{-1}) = 1 + d_1q^{-1} + d_2q^{-2} + \dots + d_{nd}q^{-nd}$$

$$F(q^{-1}) = 1 + f_1q^{-1} + f_2q^{-2} + \dots + f_{nf}q^{-nf}$$

Pasando a la transformada Z la ecuación se representa como:

$$y(z) = \frac{B(z)}{F(z)} * u(z) + \frac{C(z)}{D(z)} * e(z) \quad (3.9)$$

Cuando  $na=nc=nd=0$ , se obtiene la expresión del modelo OE, obteniendo el error como la diferencia de la salida medida y la salida del modelo, la expresión que queda es:

$$y(z) = \frac{B(z)}{F(z)} * u(z) + e(z) \quad (3.10)$$

Cuando  $nd=nf=0$ , se obtiene la expresión del modelo ARMAX:

$$y(z) = \frac{B(z)}{A(z)} * u(z) + \frac{C(z)}{A(z)} * e(z) \quad (3.11)$$

Cuando  $n_c=n_d=n_f=0$ , se obtiene la expresión del modelo ARX:

$$y(z) = \frac{B(z)}{A(z)} * u(z) + \frac{1}{A(z)} * e(z) \quad (3.12)$$

Cuando  $n_a=0$ , se obtiene la expresión del modelo Box Jenkins:

$$y(z) = \frac{B(z)}{F(z)} * u(z) + \frac{C(z)}{D(z)} * e(z) \quad (3.13)$$

Para la estimación de las funciones de transferencia del modelo y del error se especifican el orden de B y C ( $n_b, n_c$ , número de ceros más uno), el orden de F y D ( $n_f, n_d$ , número de polos) y el retardo, desde la entrada hasta la salida en términos del número de muestras ( $n_k$ ), dependiendo del modelo que se vaya a utilizar. Los modelos BJ obtenidos van desde segundo a octavo orden, pero en todos los casos con valores similares respecto a la calidad del ajuste del modelo, lo cual demuestra la correspondencia de las características del modelo con la complejidad de los datos a identificar.

Siguiendo los procedimientos estándar para la identificación, seleccionando los datos para estimación y datos para validación obtenidos de la simulación del modelo desarrollado para representar el sistema DFIG-WECS, se usó la herramienta "SystemIdentification" del software MATLAB. Se realizó el pre-procesamiento inicial de los datos de la simulación, considerados como datos reales, para obtener valores normalizados. En todos los casos se aplicaron los disturbios (huecos o subidas) ya con el sistema en estado estable, siendo la magnitud de estos disturbios lo suficientemente grandes para provocar el movimiento del punto de operación de la zona lineal a la zona no lineal de saturación.

En la Tabla 4 se muestra el promedio de los mejores índices de calidad de la identificación para los cuatro experimentos realizados. A continuación, un análisis de estos resultados.

Tabla 4: Índices de calidad promedio obtenidos en la identificación

<b>c</b>	<b>Método de Identificación</b> (Orden e Índice en %)		
	<b>Output Error</b> (OE)	<b>Box Jenkins</b> (BJ) o ARMAX	<b>AutoRegressive</b> <b>EXogenous</b> (ARX)
<b>Potencia a hueco</b> <b>tensión.</b>	Orden: 22 Índ: 68.58 %	Orden: 25 (BJ) Índ: 73.67 %	Orden: 25 Índ: 72.26 %
<b>Velocidad a</b> <b>hueco tensión</b>	Orden: 24 Índ: 60,03%	Orden: 25 (BJ) Índ: 68.54 %	Orden: 25 Índ: 67,75 %

No obstante, el relativo alto orden de los modelos resultantes, resultado previsto por el orden resultante del tipo de señal que tiene el patrón de huecos considerado entrada, en general los resultados son medianamente pobres, evidenciando una alta componente de dinámica de comportamiento que no queda modelada. Solo queda modelada aproximadamente la primera parte de la respuesta transitoria, así como la ley de variación de estas variables alrededor de un punto de operación, pero no las oscilaciones de mayor frecuencia. Esto se evidencia en la donde se compara la respuesta en la potencia activa a un hueco de tensión seleccionado arbitrariamente de profundidad 70% en un viento de operación de 5 m/s. Se observa que el mejor resultado se obtiene con el modelo BJ, situación que se repite en todos los experimentos, aunque la diferencia con los modelos ARX y OE no es significativa.

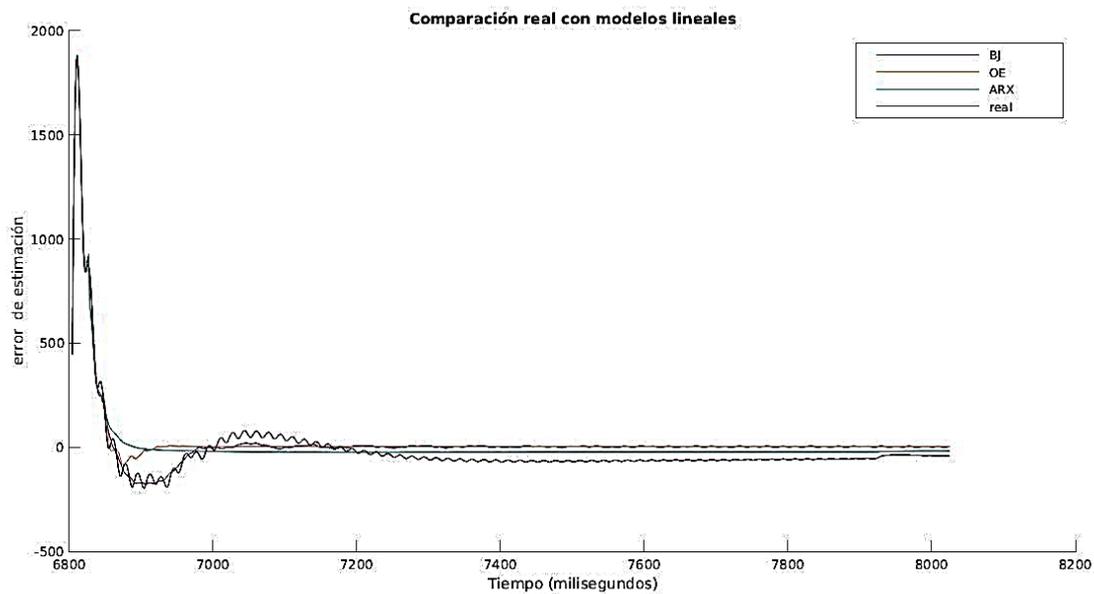


Ilustración 43 Comparación de modelos sobre la respuesta a un hueco de tensión a velocidad 5m/s:

### Identificación no lineal

De los resultados obtenidos en la identificación lineal anteriormente expuestos se observa que los mejores resultados según el índice de calidad o ajuste del modelo se observan cuando se aplican los modelos BJ y ARX. No obstante, son valores relativamente bajos, incluso hasta empleando estructuras de modelo de órdenes superiores. Esto justifica el empleo de métodos no lineales buscando mejorar estos índices de calidad en la identificación.

#### Modelos no lineales

La determinación de los modelos no lineales a considerar constituye un paso esencial en la aplicación de cualquier procedimiento de identificación no lineal. En este análisis se considera que la saturación magnética, que es la no linealidad presente está en una posición interna, o sea no en la variable considerada como entrada (tensión en la línea), y en la variable de salida (potencia), por esta razón se evidencia como estructura más adecuada las que puedan combinar con efectividad elementos lineales y no lineales.

Para todos los experimentos se aplicaron métodos de identificación no lineal, siguiendo lo bien establecido en teoría de identificación para lazo cerrado: aplicando los modelos NARX (Nonlinear Autoregressive Exogenous), y HW (Hammerstein-Wiener).

#### *Determinación de los modelos no lineales*

Como estructura de modelo no lineal NARX para relacionar la salida  $y(t)$  y la entrada  $u(t)$  se usará:

$$\bar{y}(t|\theta) = g(\varphi(t), \theta) \quad (3.14)$$

Donde  $g$  es una determinada función no lineal de los valores en el tiempo de las variables de entrada y salida, con el vector de parámetro  $\theta$ , como se describe a continuación:

$$\varphi(t) = \varphi(u^{t-1}, y^{t-1}) \quad (3.15)$$

Estas dos expresiones  $\varphi(t)$  representa la dependencia del valor actual de la salida  $y(t)$  de los valores pasados tanto de la variable de entrada  $u(t)$ , como de la propia salida.  $\varphi(t)$  por tanto es llamado vector de regresión, mientras que sus componentes se forman por las variables de regresión. Como el caso que se considera en este trabajo es de modelos de relación entrada salida, los dos primeros valores del pasado que se usan para la ecuación (3.15) corresponden a los valores reales medidos (obtenidos por simulación directa del modelo matemático original), mientras los restantes valores son basados precisamente en los valores calculados por el modelo paramétrico según (3.14), causando esto que en esta expresión el vector regresor  $\varphi(t)$  también dependa del vector de parámetros  $\theta$ . Por lo anterior la ecuación (3.14) en este caso sería de tipo ARX no lineal y obtenemos:

$$\bar{y}(t|\theta) = g(\varphi(t, \theta), \theta) \quad (3.16)$$

Se investigarán dos formas de función no lineal para implementar la función no lineal **g**:

- Sigmoides, expresado como:

$$g(x) = 1/(1 + e^{-x}) \quad (3.17)$$

- Wavelets, expresado como la expansión en funciones de (53), resultando:

$$g(\varphi(t), \theta) = \sum \alpha_k g_k(\varphi) \quad (3.18)$$

El otro experimento es con el modelo HW, el cual consiste en especificar un tipo de no linealidad en la relación entrada salida: tipo Wiener, cuando está solo en la entrada, tipo Hammerstein cuando está en la salida, o modelo combinado, cuando la no linealidad está en ambas variables. Este tipo de modelo consiste en una combinación serie de dos elementos no lineales y un elemento lineal entre ellos [93]. Este tipo de modelo, mostrado en la Ilustración 44, es usado frecuentemente para representar la dinámica de sistemas no lineales.

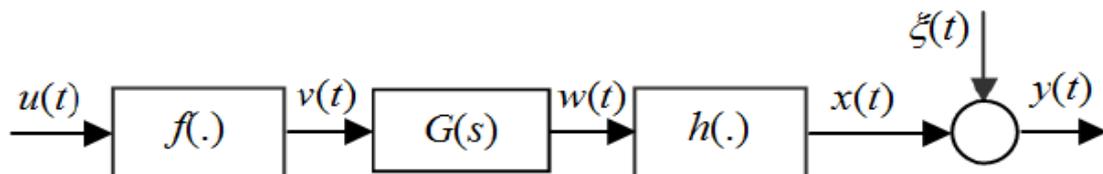


Ilustración 44: Modelo Hammerstein - Wiener [93]

Esta estructura es formada a partir de los conocidos modelos Hammerstein y Wiener, los que se basan en un elemento lineal y otro no lineal, diferenciándose en el orden en que se presentan. Este modelo se describe por

$$y(t) = x(t) + \mathbf{h}(g(t) * v(t)) + \xi(t) \quad (3.19)$$

donde

$$v(t) = \mathbf{f}(u(t)) \quad (3.20)$$

$$g(t) = L^{-1}\{G(s)\} \quad (3.21)$$

$\mathbf{h}(\cdot)$  y  $\mathbf{f}(\cdot)$  corresponden a no linealidades estáticas que no consideran valores pasados. El símbolo \* significa convolución y el símbolo  $L^{-1}$  significa operador de transformada inversa de Laplace. Por su parte la señal  $\xi(t)$  es independiente con valor medio igual cero. La parte lineal está representada por la función de transferencia  $G(s)$  que es asintóticamente estable. En este modelo las únicas señales que se miden son la entrada  $x(t)$  y la salida  $y(t)$ .

La formulación del problema implica entonces determinar por procedimientos de identificación estimar un modelo que comprenda las no linealidades y la parte lineal.

Sin embargo, en algunos sistemas tecnológicos puede darse la situación de presentarse una no linealidad bien diferenciada entre dos elementos lineales, como sucede en esta investigación, y siguiendo el mismo principio que para los modelos HW en este caso se representaría con un modelo con una estructura que puede denominarse Wiener-Hammerstein (HW), lo cual se representa en la Ilustración 45. En realidad, esta estructura puede considerarse como un caso particular de la estructura denominada Hammerstein-Wiener Generalizado (GHW, por sus siglas en inglés), descritos y utilizados en [91, 92], la cual consiste en un conjunto de modelos Hammerstein en serie, cada uno consistente en un elemento no lineal estático y un elemento lineal.

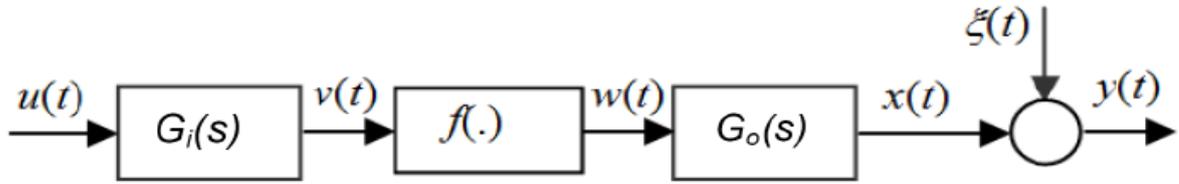


Ilustración 45: Modelo Wiener - Hammerstein

Este modelo WH ha sido relativamente menos trabajado que el HW, no obstante, se reportan importantes resultados [93-97]. Esta es la estructura que más se adecua a su aplicación en el sistema de generación eólica. Para este sistema el modelo toma la forma

$$y(t) = x(t) + \mathbf{h}(g_o(t) * w(t)) + \xi(t) \quad (3.22)$$

donde

$$w(t) = \mathbf{f}(u(t) * g_i(t)) \quad (3.23)$$

En forma similar  $g_i(t)$  y  $g_o(t)$  corresponden a las transformadas inversas de Laplace de  $G_i(s)$  y  $G_o(s)$ , respectivamente. Por otro lado,  $\mathbf{f}(\cdot)$  y  $\mathbf{h}(t)$  están significando transformaciones no lineales en el canal de entrada y canal de salida, respectivamente, representando ambas las no linealidades del sistema, las cuales también se considerarán las del tipo dado por las expresiones (3.17) y (3.18).

La parte lineal en el canal de salida es representada por la expresión de fracción de polinomios en el operador  $q$ :

$$x(t) = (B^s_{j,i}(q)/A^s_{j,i}(q)) w(t) \quad (3.24)$$

Similarmente la parte lineal en el canal de entrada es representada por:

$$u(t) = (B^e_{j,i}(q)/A^e_{j,i}(q)) v(t) \quad (3.25)$$

### ***Análisis de resultados***

Los resultados generales se muestran en la

Tabla 5, se experimentó para varias combinaciones. Para los modelos NARX se combinaron cantidad de datos de regresión con el tipo de no linealidad, mientras para modelos HW se combinó el orden del modelo lineal (ecuación (3.22)) con el tipo de no linealidad. En ambos casos se usaron diferentes cantidades de unidades en la no linealidad.

En ambos tipos de modelos, al hacer la simulación, se buscar una cantidad específica de unidades para la no linealidad, en el modelo HW de forma automática, para comparar con los experimentos realizados con cantidades predeterminadas de unidades, 5 y 10, en forma similar para las no linealidades de entrada, como como también de la salida.

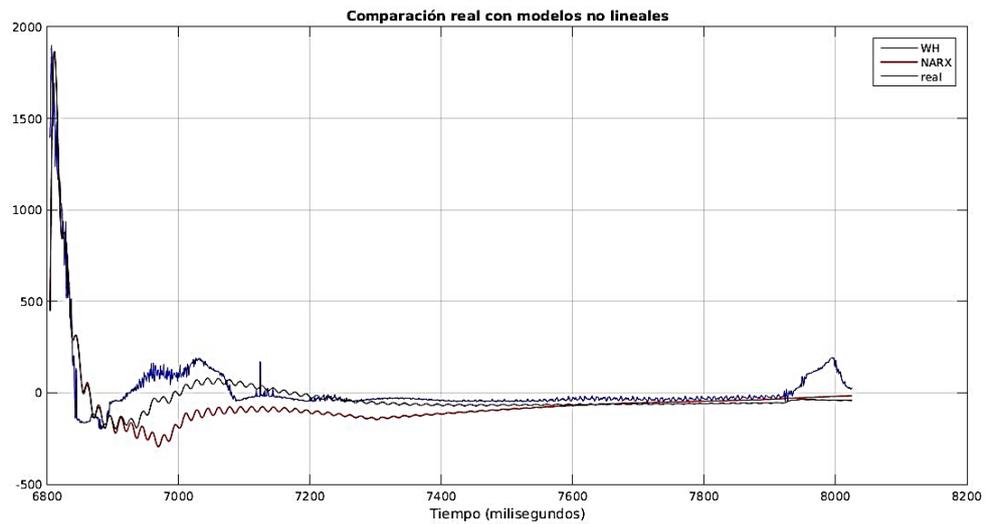
Para el modelo HW en todos los experimentos se trabajó con modelos lineales solo con polinomio  $A(q)$  en el denominador, de orden 15 u orden 20.

Además, sin atraso de transportación entrada salida.

Tabla 5: Índices de calidad obtenido en identificación no lineal

<b>Modelo NARX</b>						
<b>Experiencia</b>	<b>No linealidad</b>			<b>Índice calidad (%)</b>		
	<b>Términos de regresión</b>	<b>Tipo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Predicción total</b>	<b>Predicción a 50 ms</b>	<b>Predicción a 20 ms</b>
1	15	Sigmoide	5	82.56	85.75	91.38
2	15	Sigmoide	10	81.27	80.02	92.74
3	15	Wavelets	5	87.53	87.91	92.98
4	15	Wavelets	10	85.20	86.61	93.40
5	15	Wavelets	25	30.55	48.22	91.66
6	20	Sigmoide	5	70.28	77.69	93.50
7	20	Sigmoide	10	61.98	72.83	92.71
8	20	Wavelets	5	41.56	61.58	92.87
9	20	Wavelets	10	68.08	72.25	94.33
10	20	Wavelets	26	48.38	75.55	93.98
<b>Modelo HW</b>						
		<b>No linealidad</b>		<b>INDICE</b>		
	<b>Orden modelo lineal</b>	<b>Tipo</b>	<b>Unidades E-S</b>	<b>Predicción total</b>		
11	15	Sigmoide	5 - 5	83.85		
12	15	Sigmoide	10 - 10	86.24		
13	15	Wavelets	5 - 5	87.32		
14	15	Wavelets	10 - 10	84.65		
15	15	Wavelets	1 - 7	86.22		
16	20	Sigmoide	5 - 5	86.97		
17	20	Sigmoide	10 - 10	87.08		
18	20	Wavelets	5 - 5	87,66		
19	20	Wavelets	10 - 10	84.57		
20	20	Wavelets	1 - 8	86.91		

A modo de ejemplo en la Ilustración 45, se compara la respuesta en la potencia activa al hueco de tensión seleccionado como referencia de profundidad 70%, también con una velocidad de viento de operación de 5 m/s. Se observa que el mejor resultado se obtiene con un modelo NARX con orden 20 en la parte lineal y estructura de árbol en la parte no lineal, con 127 nodos. Por su parte en la Ilustración 47 se ejemplifica la no linealidad entre dos regresores consecutivos (14 y 15).



*Ilustración 46: Respuesta en la potencia activa al hueco de tensión*

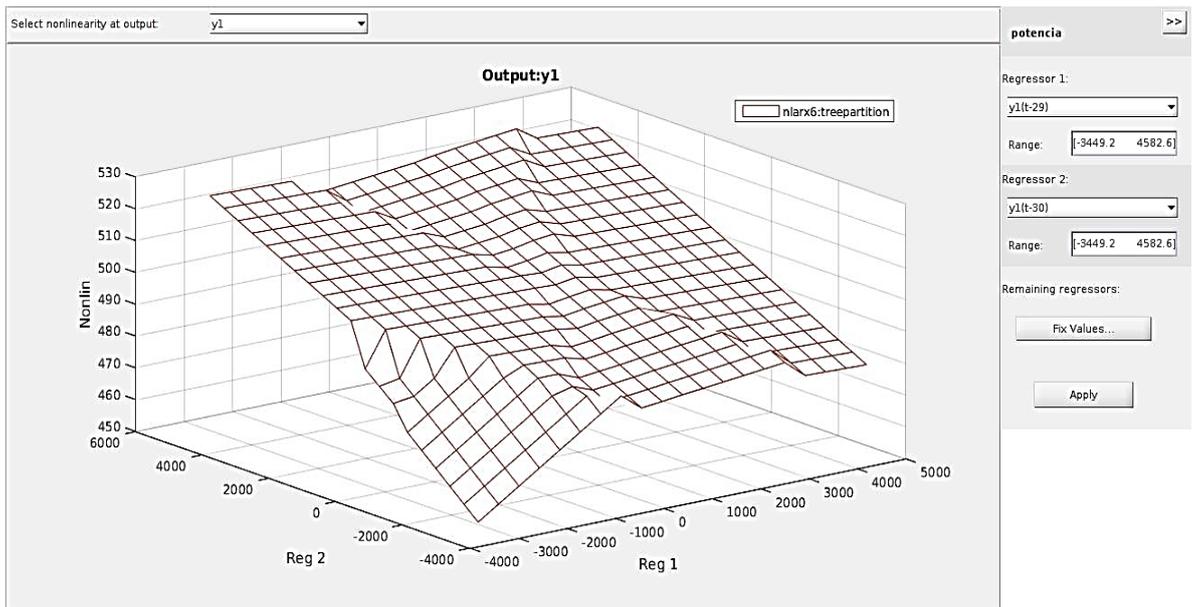


Ilustración 47: No linealidad entre dos regresores consecutivos (14 y 15)

Utilizando el modelo W-H, se puede observar en la Tabla 6 buenos resultados de índice de calidad en la identificación con porcentajes en el orden del 80%, con diferentes estructuras en la parte lineal del modelo (orden variando entre 15 y 20) para huecos de tensión de 60% y 70% de profundidad y vientos con valores de 4, 5 o 6 m/s.

Tabla 6: Índices de calidad obtenido en identificación no lineal utilizado WH

	Índice (%)
Modelo 1	81.15
Modelo 2	82.38
Modelo 3	81.95
Modelo 4	81.36
Modelo 5	80.04
Modelo 6	81.60

De todos estos resultados se concluye

- En primer lugar, se destaca que la identificación no lineal proporciona mejores resultados que la identificación lineal para estos sistemas que pueden incluir saturación en su operación. Comparar los resultados de las tablas 3.2 y 3.3 con la tabla 3.1.
- En general se obtienen mejores resultados con los modelos NARX
- Tanto en NARX como en HW el aumentar el número de unidades en el modelo no lineal no aumenta la calidad del modelo obtenido en cuanto al índice de ajuste con los datos reales, lo cual se induce que se debe a que no es una no linealidad severa la que se presenta en el sistema. Por lo tanto, no se justifica un aumento de la complejidad del modelo. Esto queda verificado con los experimentos 5 y 20.
- El aumentar el orden del modelo lineal, en el caso HW, no tiene efecto significativo en la calidad. Sin embargo, en el caso del modelo NARX el efecto es de una marcada disminución del índice. Comparar los experimentos 1 a 4 y 6 a 9.
- El modelo WH, mejora el índice de calidad en la identificación con respecto a los modelos lineales y se mantiene con pequeños cambios con respecto a HW y NARX.

Como conclusión más importante se resalta la significativa diferencia en calidad del modelo cuando este se destina solo a predecir hasta un determinado horizonte de predicción. Se experimentó en dos horizontes de predicción, hasta 20 y 50 milisegundos. Esto se justifica totalmente para el modelo matemático empleado dado que se está representando condiciones de operación que duran máximo 200 ms, por lo que en el caso de 20 ms significa un 10% del periodo total, lo cual normalmente se considera muy aceptable en los métodos de predicción. Los resultados para este horizonte de predicción siempre estarán por encima del 90%. Ya para 50 ms

se obtienen resultados de similar orden en la calidad. Esta predicción en un horizonte solo se aplica a modelos NARX, dado que en los modelos HW no trabajan con regresores sino con modelos estáticos en la parte no lineal.

Se comprueba la validez del modelo desarrollado para incluir el efecto de la saturación en el generador, lo cual permite realizar otros estudios del comportamiento de los sistemas DFIG considerando este efecto no lineal. Igualmente se demuestra que aplicando procedimientos de identificación en estos sistemas cuando están en condiciones especiales de operación es posible determinar modelos con adecuados grados de aproximación al comportamiento dinámico del sistema. Estos modelos pueden entonces ser usados para otros estudios sobre la operación de estos sistemas cuando la saturación está presente. Se concluye finalmente la validez de poder incluir la saturación en los modelos que representen este tipo de sistema, dado la evidente influencia de esta en el comportamiento dinámico de las principales variables de operación en el DFIG.

La efectividad de los modelos encontrados es validada por los resultados de los procedimientos de identificación. Estos modelos permiten aplicar cualquier procedimiento de análisis del comportamiento del sistema de generación eólica ante presencia de disturbios. Se evidencia así mismo de estos resultados que es posible perfeccionar los procedimientos de identificación aplicando técnicas de identificación no lineales que sean capaz de aportar el 10% de exactitud que todavía queda de reserva, cuando se aplican procedimientos puramente lineales.

Queda demostrado que en los Sistemas de Generación Eólicas que basen su funcionamiento en Generadores de Inducción Doblemente Alimentados es importante considerar el comportamiento dinámico en la respuesta a disturbios en el sistema, como lo constituyen los huecos de tensión. Este comportamiento dinámico puede modelarse con relativo grado de

exactitud tanto por modelos lineales, como por no lineales. Los resultados demuestran que es posible obtener modelos dinámicos para representar este comportamiento para cualquier valor de operación del viento comprendido entre los valores de 4 y 6 m/s, que son los valores prácticos que ocurren en el sistema real estudiado.

Sin embargo, esto solo es alcanzado con modelos de relativo alto grado de complejidad sobre todo por la cantidad de regresores que es necesario en cada caso, producto de las características temporales de los patrones de huecos de tensión.

Se concluye la necesidad de experimentar con técnicas de identificación basado en herramientas de la inteligencia artificial para lograr modelos más viables en relación con la implementación.

## **Capítulo 4. Modelado e identificación inteligente en el DFIG**

Muchos de los problemas del mundo real requieren un modelado que sea rápido de implementar y lo suficientemente flexible para ser capaz de adaptarse a la dinámica del problema concreto bajo análisis. Particularmente para los sistemas dinámicos no lineales, las técnicas convencionales de modelado e identificación son difíciles de implementar, siendo en ocasiones algo impráctico. Una solución a este problema lo constituye la concepción de sistemas basados en inteligencia artificial, capaces de modelar adecuadamente, bajo ciertas condiciones, al objeto de estudio. En este sentido se ha demostrado suficientemente que un sistema neuro-borroso puede cumplir este objetivo. Dentro de los sistemas borrosos, el modelo Takagi-Sugeno (TS) se ha convertido en una herramienta ingenieril práctica y potente para el modelado de sistemas complejos, debido a que es capaz de describir sistemas altamente no lineales utilizando un pequeño número de reglas. Por este motivo en este capítulo se trabaja la identificación del sistema DFIG-WECS, con el objetivo de complementar los resultados del capítulo anterior en referencia a la obtención de modelos adecuados para la predicción del comportamiento en condiciones especiales de operación, específicamente por la presencia de huecos de tensión en la línea.

### **Consideraciones para la identificación inteligente**

Recientemente, se han informado varios algoritmos para el aprendizaje en línea con estructura de autoconstrucción, que incluyen técnicas basadas en lógica difusa para modelar este tipo de procesos [98-111]. Especialmente el modelo Takagi-Sugeno (TS) [112] ha sido ampliamente utilizado. Este modelo consiste en reglas if-then con antecedentes difusos y funciones matemáticas en la parte correspondiente. La tarea de identificación del

sistema es determinar tanto los parámetros no lineales del antecedente como los parámetros lineales de las reglas consecuentes.

Durante los últimos años, se ha prestado mucha atención a las técnicas basadas en datos para la generación de modelos difusos. Es bien sabido que los sistemas difusos son aproximadores universales, es decir, pueden aproximar cualquier función continua no lineal a cualquier precisión prescrita si se proporcionan suficientes reglas difusas. El modelo borroso Takagi-Sugeno se ha convertido en una poderosa herramienta de ingeniería práctica para el modelado de sistemas complejos debido a su capacidad para describir un sistema altamente no lineal que utiliza un pequeño número de reglas. También el modelado difuso implica la identificación de la estructura y los parámetros.

La determinación de los parámetros no lineales del antecedente es un punto central en este modelado para sistemas de variante de tiempo y no lineales, debido a las características de estos parámetros. En general esta situación se resuelve mediante la linealización. Algunos métodos basados en agrupación de datos se utilizan para la identificación de la estructura. Los algoritmos de agrupamiento pueden dividirse en dos clases, fuera de línea y en línea. Aunque se ha propuesto un gran número de algoritmos de agrupación en clústeres, la mayoría de ellos procesa los datos fuera de línea, por lo tanto, la estructura de la variante se ignora [96]. Los algoritmos de agrupación en línea deben ser adaptables en el sentido de que se ofrecen agrupaciones actualizadas en cualquier momento, teniendo en cuenta los nuevos elementos de datos tan pronto como lleguen. Para el aprendizaje en línea continuo del modelo difuso de TS, se ha desarrollado algún método de agrupación en línea responsable del aprendizaje de la estructura del modelo (base de reglas). [109, 113-114].

En el caso particular objeto de investigación en esta tesis, el sistema DFIG-WECS, la necesidad de modelar e identificar cuando el sistema está sometido a condiciones severas de operación, implica la necesidad de considerar la dinámica de cambio en los parámetros del modelo a obtener. Esto implicaría considerar en el modelo TS que los parámetros pueden tener una variación. Esta variación, a su vez, puede ser también considerada como una variable difusa en relación con el rango de valores a tomar.

En consecuencia, con lo anterior se desarrollan otros métodos para tomar en cuenta esta situación de parámetros variables. Para la aplicación de los sistemas TS en esta situación se considera que los parámetros están cambiando continuamente y de igual forma se considerarían los parámetros de los conjuntos difusos.

Por esa razón, es muy importante obtener una determinación correcta de la función de pertenencia correspondiente a los conjuntos difusos en los antecedentes. Estos conjuntos difusos no toman valores únicos. En este sentido, una representación formal de este modelo implica utilizar otro concepto. Una alternativa para estas clases de sistemas son los conjuntos difusos de valores de intervalo, donde los grados de membresía son subintervalos cerrados de  $[0,1]$ , ver Ilustración 48.

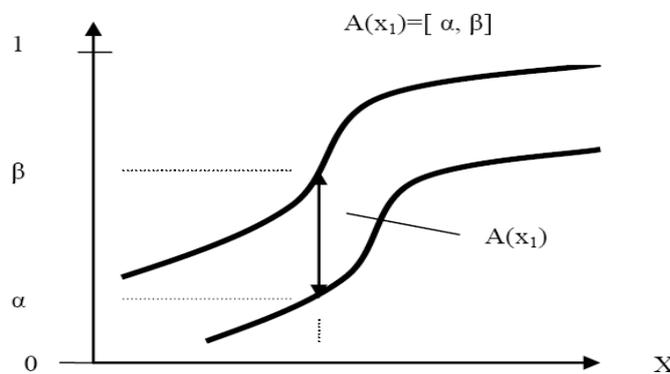


Ilustración 48: Conceptos básicos del conjunto difuso evaluado por intervalos [115]

En esta forma es posible determinar un conjunto difuso que puede representar todas las regiones en el estado espacial visitado para el punto de operación del proceso no lineal y de variante de tiempo. La pregunta es cómo determinar los parámetros de estos conjuntos difusos y qué relaciones existen entre estos parámetros y los parámetros del proceso que caracterizan la no linealidad y la variabilidad en el tiempo.

### El modelo difuso Takagi-Sugeno

El objetivo de esta sección es describir un algoritmo computacionalmente eficiente y preciso para la generación de modelos difusos Takagi-Sugeno (TS) en línea.

Nuestro sistema dinámico difuso en línea utiliza el conocido motor de inferencia Takagi-Sugeno [111]. Dicho sistema difuso está compuesto por N reglas difusas indicadas de la siguiente manera:

$$\mathcal{R}_i: \text{if } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and...and } x_r \text{ is } A_{ir} \text{ then } y_i = a_{i0} + a_{i1}x_1 + \dots + a_{ir}x_r, i = 1, \dots, N. \quad (4.1)$$

donde  $x_j, j = 1, \dots, r$ , son variables de entrada definidas sobre los universos del discurso  $X_j$ , y  $A_{ij}$ , son conjuntos difusos definidos por sus funciones de pertenencia difusa

$$\mu_{A_{ij}}: X_j \rightarrow [0, 1].$$

Teniendo en cuenta  $A_{ij}$  como conjunto difuso de valores de intervalo, entonces

$$\mu_{A_{ij}}: X_j \rightarrow [0, 1]$$

donde  $I$  ( $[0, 1]$ ) denota la clase de todos los subintervalos cerrados de  $[0, 1]$ . En las partes consiguientes,  $y_i$  es la salida de la regla y  $a_{ij}$  son escalares.

Para un vector de entrada  $x = [x_1, x_2, \dots, x_r]^T$ , cada una de las funciones consecuentes se puede expresar de la siguiente manera:

$$y_i = \mathbf{a}_i^T \mathbf{x}_e, \quad \mathbf{x}_e = [1, \mathbf{x}^T]^T, \quad (4.2)$$

El resultado de la inferencia, la salida del sistema  $y$ , es el promedio ponderado de cada salida de regla  $y_i$ , que se calcula de la siguiente manera:

$$y = \left( \sum_{i=1}^N w_i y_i \right) / \sum_{i=1}^N w_i = \left( \sum_{i=1}^N w_i \mathbf{a}_i^T \mathbf{x}_e \right) / \sum_{i=1}^N w_i \quad (4.3)$$

$$w_i = \prod_{j=1}^r \mu_{A_{ij}}(x_j); \quad i = 1, \dots, N, \quad (67)$$

$$(4.4)$$

La cantidad  $w_i$  es la fuerza de disparo de la regla  $i$ . La ecuación (4.3) se puede reescribir en la forma:

$$y = \sum_{i=1}^N \tau_i y_i = \sum_{i=1}^N \tau_i \mathbf{a}_i^T \mathbf{x}_e, \quad (4.5)$$

$$\tau_i = w_i / \sum_{j=1}^N w_j, \quad (4.6)$$

donde  $\tau_i$  representa la fuerza de disparo normalizada de la  $i$ -ma regla. El modelo basado en reglas difusas de TS, como un conjunto de modelos locales, permite la aplicación de un método LS lineal, ya que este algoritmo requiere un modelo que sea lineal en los parámetros.

Finalmente, todas las funciones de pertenencia difusa son funciones de tipo campana invertidas porque, en la práctica, se recomiendan las particiones de este tipo cuando se utilizan los consecuentes de Takagi-Sugeno. [116].

$$\mu(x_d, a, b, c) = 1 / (1 + |(x_d - c) / a|^{2b}) \quad (4.7)$$

donde:

$c$  es el centro de la campana (valor máximo) en la dimensión  $x_d$ ,

$a$  es el ancho de la campana invertida, y

$b$  es proporcional al soporte del conjunto difuso.

Si se utilizan conjuntos difusos de valores de intervalo, el resultado de inferencia cambia. Uno necesita resolver las expresiones (4.3) y (4.4) donde las operaciones de multiplicación y división deben resolverse con intervalos y no con números fijos.

### **Algoritmo para la identificación**

El primer paso es determinar los números de entrada y las reglas. Después de eso, las funciones lineales en las partes consiguientes se crean y actualizan utilizando un estimador lineal de mínimos cuadrados. En esta aplicación se utilizó el conocido método ANFIS.

El procedimiento recursivo para el aprendizaje en línea de los modelos de TS utilizados en este documento, incluye las siguientes etapas.

- 1) Etapa 1: Inicialización del modelo difuso. Para esto:
  - (a) Tome las primeras  $m$  muestras de datos del conjunto de datos.
  - (b) Determine las variables de entrada utilizando sistemas de inferencia borrosa iniciales
  - (c) Crea el modelo difuso para ser entrenado.
- 2) Etapa 2: en el siguiente paso de tiempo, lectura de la siguiente muestra de datos.
- 3) Etapa 3: Actualización recursiva del modelo.
- 4) Etapa 4: Actualización de los parámetros del antecedente
- 5) Etapa 5: Cálculo de los parámetros consiguientes.
- 6) Etapa 6: Predicción de la salida para el siguiente paso por el modelo difuso TS.

## **Resultados experimentales**

Es necesario adecuar los procedimientos de identificación establecidos a los requerimientos impuestos por las condiciones de operación cuando están presentes huecos de tensión en el sistema eléctrico. Estas condiciones en resumen son;

- Los huecos se presentan aleatoriamente en forma del patrón expuesto en los capítulos anteriores.
- Un patrón de hueco puede tener solo un hueco, dada la posibilidad del sistema de recuperarse en el periodo de tiempo concebido para ello (un segundo)

- Entre un patrón de huecos y otro puede existir un periodo de tiempo indeterminado con condiciones estables de operación en todo el sistema, implicando con ello que las variables de salida consideradas (potencia y velocidad del rotor) no tengan variación respecto al punto de operación.

Por otra parte, la aplicación de los procedimientos de identificación implica un determinado grado de persistencia en la entrada, como planteado en el capítulo 1, para poder extraer toda la dinámica del sistema a identificar.

Por lo anterior se conforma un procedimiento basado en los siguientes pasos:

1) Obtener la respuesta a cada uno de los  $N$  patrones de huecos tensión que se presenten en el sistema.

2) Conformar una señal compuesta de una secuencia de  $N$  respuestas obtenidas con los correspondientes patrones de huecos, y así se obtiene las señales de entrada y salida necesarias para aplicar los procedimientos. Esta concatenación de patrones de entrada y respuesta tiene que cumplir con la condición de que, entre una respuesta y otra, el sistema retorne al estado de equilibrio que proporcione el punto de operación que esté trabajando el sistema. En este caso, este punto de operación viene dado por la velocidad del viento promedio que esté durante la ocurrencia del patrón de hueco de tensión.

3) Conformar una entrada general al sistema neurodifuso compuesto por un conjunto de regresores de la señal de entrada y de salida determinada en el punto 2. Esta señal estaría formada por grupos de  $n$  regresores de la variable de salida  $y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n)$  y un grupo con la señal de salida formado por  $m$  regresores;  $u(t-1), u(t-2)$ , etc.

4) Aplicar un sistema de búsqueda exhaustiva (todas las combinaciones) de regresores de los grupos de la señal de entrada y salida, con un sistema neurodifuso base e igual para todas las combinaciones para determinar la conformación de regresores con mejor resultado.

5) Aplicar el procedimiento de identificación neurodifuso (ANFIS) para la mejor combinación resultante del punto anterior. Correspondiente a este procedimiento se determinan por reiteraciones de aplicación, el mejor resultado en función del tipo y número de funciones de pertenencias, el número de épocas en el proceso iterativo y otros parámetros de funcionamiento del procedimiento.

6) Si necesario, repetir el procedimiento a partir del punto 3 para otros valores de n y m.

## Resultados experimentales

La identificación experimental se realizó con los mismos juegos de datos usados para la identificación con los métodos convencionales usados en el capítulo anterior, con lo cual se garantiza adecuadas condiciones para la necesaria comparación de los resultados a obtener.

Como salida se consideró los datos de la variación de potencia efectiva, la que se muestra en la Ilustración 49.

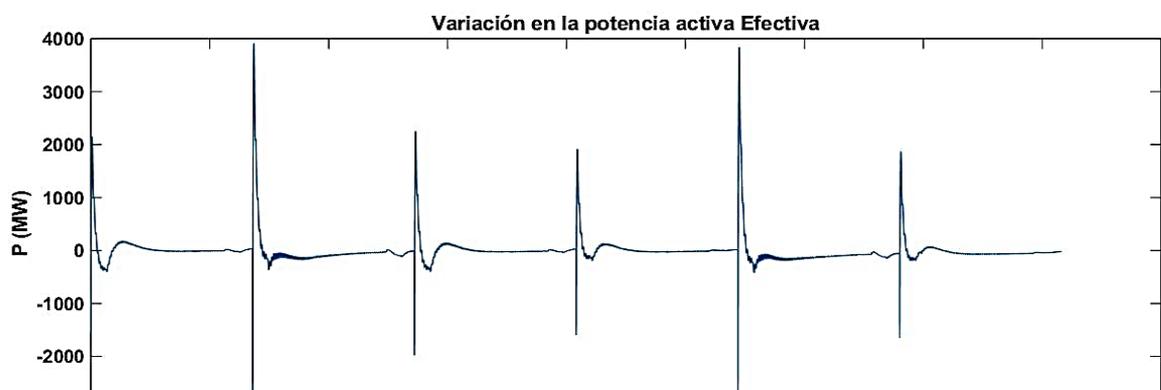


Ilustración 49: Variación en el valor efectivo de la potencia activa

Los resultados de implementar el algoritmo descrito en el epígrafe anterior, se obtuvo aplicando ANFIS con un modelo desarrollado en MatLab, el mejor resultado se obtiene con la siguiente combinación de entradas, obtenido por funciones de la herramienta de identificación del MatLab:

Potencia en k-1 y k-2 y la tensión en k-4.

El modelo neurofuzzy tiene las siguientes características:

Numero de nodos: 158

Número de parámetros lineales: 256

Número de parámetros no lineales: 36

Número de total de parámetros: 292

Número de pares de datos de entrenamiento: 1000

Número de pares de datos de chequeo: 972

Número de reglas Fusca: 64

Las reglas Fuzzy están descritas a continuación:

If  $y(k-1)$  is  $A_{11}$  and  $y(k-2)$  is  $A_{21}$  and  $u(k-4)$  is  $A_{31}$  then  $y(k) = p_{10} + p_{11}y(k-1) + p_{12}y(k-2) + p_{13}u(k-4)$

If  $y(k-1)$  is  $A_{11}$  and  $y(k-2)$  is  $A_{21}$  and  $u(k-4)$  is  $A_{32}$  then  $y(k) = p_{20} + p_{21}y(k-1) + p_{22}y(k-2) + p_{23}u(k-4)$

If  $y(k-1)$  is  $A_{11}$  and  $y(k-2)$  is  $A_{21}$  and  $u(k-4)$  is  $A_{33}$  then  $y(k) = p_{30} + p_{31}y(k-1) + p_{32}y(k-2) + p_{33}u(k-4)$

If  $y(k-1)$  is  $A_{11}$  and  $y(k-2)$  is  $A_{21}$  and  $u(k-4)$  is  $A_{34}$  then  $y(k) = p_{40} + p_{41}y(k-1) + p_{42}y(k-2) + p_{43}u(k-4)$

If  $y(k-1)$  is  $A_{11}$  and  $y(k-2)$  is  $A_{22}$  and  $u(k-4)$  is  $A_{31}$  then  $y(k) = p_{50} + p_{51}y(k-1) + p_{52}y(k-2) + p_{53}u(k-4)$

If  $y(k-1)$  is  $A_{11}$  and  $y(k-2)$  is  $A_{22}$  and  $u(k-4)$  is  $A_{32}$  then  $y(k) = p_{60} + p_{61}y(k-1) + p_{62}y(k-2) + p_{63}u(k-4)$

If  $y(k-1)$  is  $A_{11}$  and  $y(k-2)$  is  $A_{22}$  and  $u(k-4)$  is  $A_{33}$  then  $y(k) = p_{70} + p_{71}y(k-1) + p_{72}y(k-2) + p_{73}u(k-4)$

If  $y(k-1)$  is  $A_{11}$  and  $y(k-2)$  is  $A_{22}$  and  $u(k-4)$  is  $A_{34}$  then  $y(k) = p_{80} + p_{81}y(k-1) + p_{82}y(k-2) + p_{83}u(k-4)$

...

If  $y(k-1)$  is  $A_{14}$  and  $y(k-2)$  is  $A_{24}$  and  $u(k-4)$  is  $A_{34}$  then  $y(k) = p_{640} + p_{641}y(k-1) + p_{642}y(k-2) + p_{643}u(k-4)$

Con estas reglas se realizó el entrenamiento de la red y se obtuvo los valores de los parámetros de los antecedentes y consecuentes.

Con estos parámetros y las reglas ANFIS se realiza la identificación del sistema obteniéndose los resultados mostrados en la ilustración 49, donde se registra la potencia calculada por el modelo y la potencia considerada como real, tanto para datos de entrenamiento como para los datos chequeo. Como dato de chequeo se tomó los datos reales provocados por un hueco de tensión de profundidad arbitraria, pero con similar patrón que el expuesto en el capítulo 2. Nótese el muy bajo valor del error en los datos

de chequeo. Se nota que son prácticamente imperceptibles las variaciones del modelo analizado con el de predicción, lo que significa que este

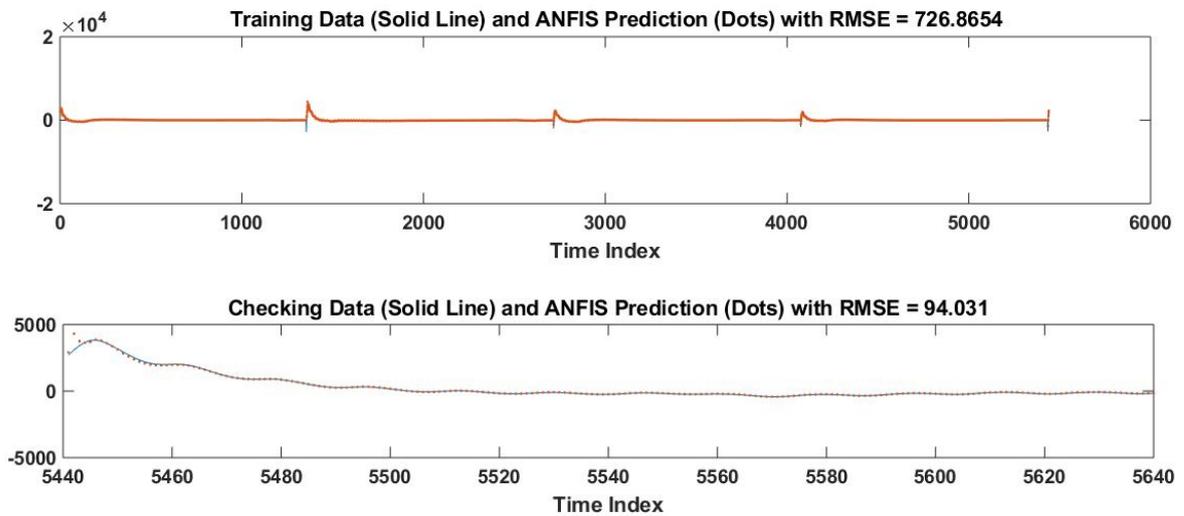


Ilustración 50: Comparación del modelo con los datos reales

El algoritmo ANFIS, es importante para la identificación de sistemas no lineales y que se correlaciona mejor con el comportamiento real del sistema.

Para el caso de la salida velocidad del rotor se consideró los datos de la variación de esta variable como la mostrada en la ilustración 51. Al igual que en el caso potencia se tomaron los datos de valor efectivo de la variación de la velocidad y no la velocidad instantánea.

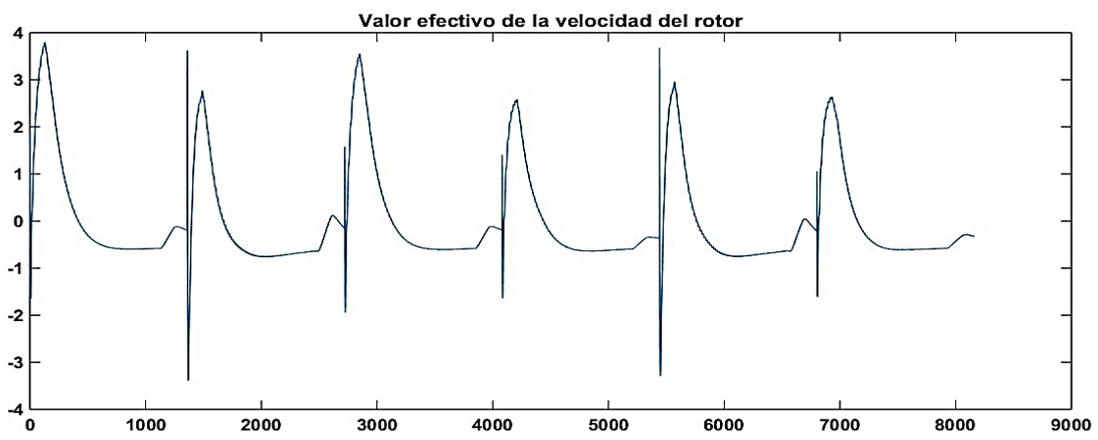
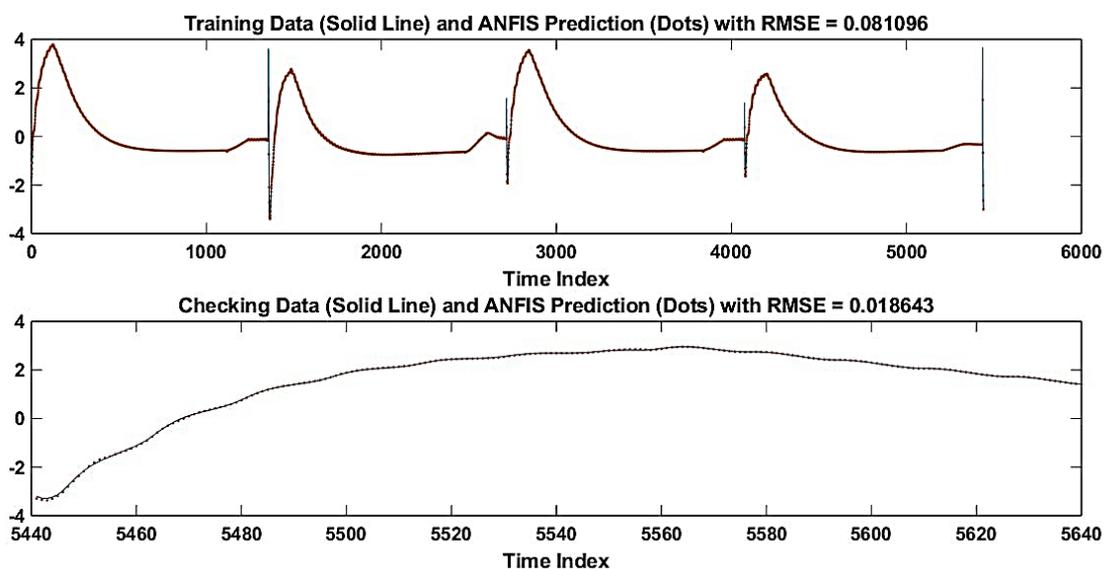


Ilustración 51: Variación en el valor efectivo de la velocidad del rotor

El modelo neurofuzzy tiene igual estructura (número de reglas, nodos, parámetros lineales y no lineales) que el planteado anteriormente para el caso de la potencia.

Se obtienen los resultados de la identificación mostrados en la Ilustración 52, donde se registra la velocidad del rotor calculada por el modelo y la velocidad considerada como real, tanto para datos de entrenamiento como para los datos chequeo. Como dato de chequeo se tomó los datos reales provocados por un hueco de tensión de profundidad arbitraria, pero con similar patrón al usado en el caso de potencia. Nótese el muy bajo valor del error en los datos de chequeo. Se nota que son prácticamente imperceptibles las variaciones del modelo analizado con el de predicción.



*Ilustración 52: Variable Variación en Potencia Activa. Comparación del modelo con los datos reales.*

Finalmente, como ejemplo demostrativo de la calidad de este tipo de procedimiento de identificación respecto a uno convencional, en la figura 4.6 se muestra los resultados de la predicción realizada por un modelo lineal comparado con los datos reales. La comparación de las Ilustración 52 y

Ilustración 53 complementa la conclusión de los mejores resultados obtenidos con la identificación inteligente.

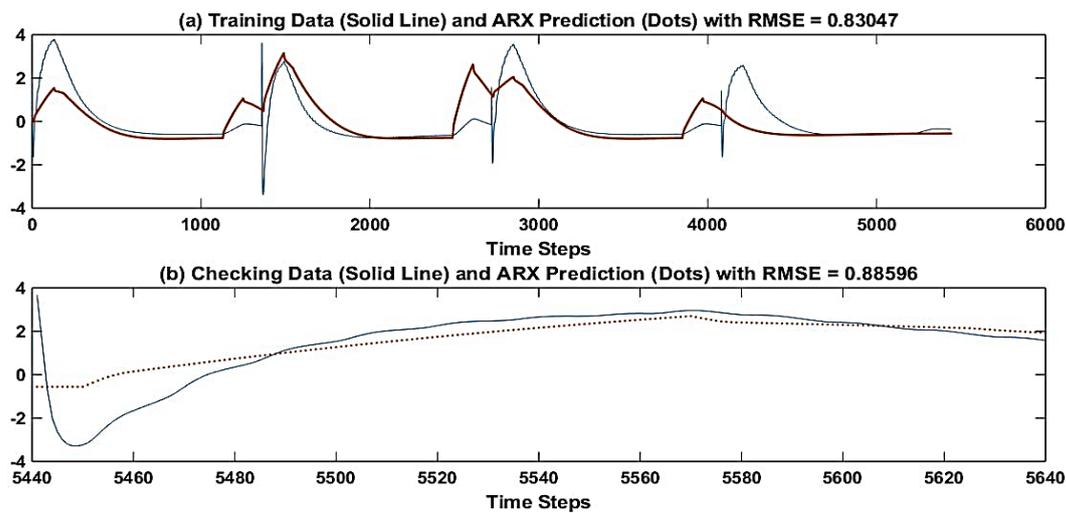


Ilustración 53: Comparación del modelo inteligente con modelo clásico.

### Variación en los parámetros del modelo difuso

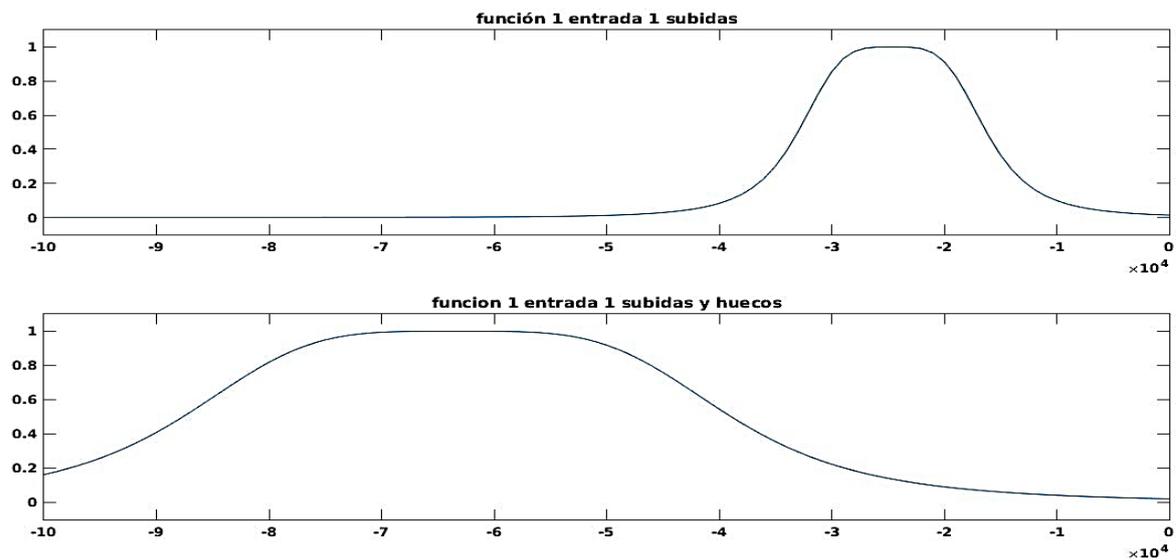
Se puede apreciar, realizando una comparación con métodos lineales y no lineales, las mejoras en la identificación utilizando algoritmos inteligentes, en este caso ANFIS.

Tomando solo el primer conjunto difuso,  $A_{11}$ , es posible observar las variaciones en el valor de esta función de pertenencia. La fig. 4.3 muestra cómo cambia con las condiciones de operación del sistema, implicando con ello que los parámetros básicos de los conjuntos difusos son diferentes, por lo tanto, también los modelos.

La Ilustración 51 explica la posibilidad de aplicar el concepto de conjunto difuso de valores de intervalo para la descripción de sistemas no lineales (y variante en el tiempo).

Como se evidencia del resultado en esta Ilustración 50, respecto al resultado de la primera función de pertenencia de la primera entrada, es significativa la presencia de una no linealidad en el comportamiento en el sistema,

expresado por la variación de los parámetros de esta función de pertenencia, la magnitud de la variación en estos parámetros puede entonces ser una representación, al menos desde el punto de vista cualitativo de la magnitud (severidad) de la no linealidad presente en el sistema, implicando con ello la posibilidad de tomar la variación de estos parámetros como indicador de la magnitud de la incidencia de las alinealidades en un punto o región de operación de la máquina.



*Ilustración 54: Comportamiento de la función de pertenencia A11*

Se demuestra por los resultados obtenidos en la totalidad de los experimentos realizados, que todos los parámetros de las distintas funciones de pertenencia (que son los parámetros no lineales del modelo neurofuzzy) cambian de igual forma. Por eso se plantea que es suficiente tomar como referencia la variación de los parámetros de solo una función de pertenencia, En el ejemplo expuesto se tomó la primera función de la entrada uno, que es la que afecta el primer valor de la salida del modelo (potencia) desplazada un periodo de muestreo, esta variación lo podemos observar en la Ilustración 54.

Con los resultados de este capítulo se cierra el ciclo de investigación sobre la identificación de las dinámicas de comportamiento de las principales variables en un sistema de generación eólica basado en DFIG. Se demuestra que los modelos obtenidos basados en herramientas de la inteligencia artificial, particularmente los sistemas neurodifusos, brindan resultados superiores a las técnicas clásicas de identificación lineales y no lineales. Pero además proporciona en forma directa la posibilidad de detectar la presencia e influencia de no linealidades en el sistema medido por la variación de los parámetros de las funciones de pertenencia de los referidos modelos inteligentes.

## Conclusiones

Como resultado final alcanzado en esta investigación, se llega a un procedimiento para obtener el comportamiento dinámico de un sistema de generación eólica basado en DFIG, expresado en modelos paramétricos, bajo el efecto de alinealidades, y en presencia de fallos provocados por huecos de tensión en el sistema. Este procedimiento de identificación queda comprobado debidamente por pruebas de simulación. A partir de estos resultados, se plantean las conclusiones generales siguientes:

El estudio realizado como parte del marco teórico relativo a los procedimientos de modelado e identificación en estos tipos de sistemas, se concluye la necesidad de incorporar al modelo los efectos de las alinealidades, específicamente la saturación magnética, con vistas a lograr un modelo con mayor grado de aproximación a la realidad del comportamiento de estos sistemas. Las técnicas de identificación en estos tipos de sistemas constituyen en conclusión un complemento y no una sustitución de las técnicas de modelado convencionales.

El modelo reajustado para el sistema DFIG-WECS incluyendo el efecto de la alinealidad saturación magnética representa adecuadamente el comportamiento dinámico lo cual permite su uso para realizar experimentos de simulación del sistema en diferentes condiciones de operación, específicamente para fallos en el sistema eléctrico, como huecos y sobretensiones. Todo esto queda evidenciado en las simulaciones de comprobación efectuadas.

Con la aplicación de la metodología de investigación en identificación en el sistema tomado como estudio, se demuestra que la identificación no lineal brinda mejores resultados que la basada en modelos lineales. No obstante, queda demostrado también que por la complejidad del sistema

en estos modelos obtenidos por técnicas clásicas, no queda reflejada totalmente la dinámica de comportamiento que se requiere.

El procedimiento de identificación obtenido basado en herramientas de la inteligencia artificial brinda un muy buen grado de aproximación a la realidad del comportamiento del sistema en caso de fallas (huecos de tensión). Este procedimiento brinda la posibilidad de vincular el cambio en sus parámetros a los efectos de las alinealidades en el sistema.

## Bibliografía

- [1]. C. Moreno, y otros "Doce preguntas y respuestas sobre energía eólica". Editorial Cubasolar, La Habana Cuba, 2017
- [2] A. A. G. Páucar, "Estudio de la máquina de inducción incluyendo el efecto de la saturación transversal con diversos modelos de la curva de magnetización", Tesis de grado", Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima Perú, 1987.
- [3] D. A. Delgado Palacios, "Modelo de la Máquina de Inducción Considerando la Saturación""", Proyecto de Grado", Coordinación de Ingeniería Eléctrica, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Noviembre de 2012 , pp. 10-53.
- [4] H. M. Wang, Y. Yan, Z. Zhang, and C. L. Xia, "Analytical Field Calculation of Doubly Fed Induction Generator with Core Saturation Considered", 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016), pp. 6.-6 . 2016.
- [5] M. E. M. Cañadas, 2007. "Aportación al Modelado del Motor Trifásico de Inducción con Consideración de la Saturación y el Efecto de Doble Jaula", Web, <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93622/01MEmc01de03.pdf>
- [6] M. e. a. v. lordache, "Saturated Induction machine stady-state performance assesment through simulations", IEEE Transaction on Energy Conversion., vol. 28, pp. 368-374, 2014.
- [7] L. Monjo, y otros., "Saturation effects on torque and current-slip curves of squirrel-cage induction Motors", IEEE Transaction on Energy

Conversion., vol. 28, pp. 243-254, 2013.

- [8] T. D. Strous, X. Wang, H. Polinder, and J. A. Ferreira, "Saturation in Brushless Doubly-Fed Induction Machines.", 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016). SBN: 978-1-78561-188-9 Glasgow, UK . 2016 ,
- [9] Reve, «Ewind,» 18 Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.ewind.com/2019/03/18/los-10-primeros-paises-del-mundo-por-capacidad-de-energia-eolica/>. [Último acceso: 2019]
- [10] Anónimo, "El clima promedio en Holguin Cuba", disponible en <https://es.weatherspark.com/y/21603/Clima-promedio-en-Holgu%C3%ADn-Cuba-durante-todo-el-a%C3%B1o>], 2019.
- [11] E. G. Carlos D. Zuluaga, "Identificación de un generador de inducción doblemente alimentado basado en el filtro de Kalman en presencia de datos espurios", *Ingeniería y Competitividad*, vol. 15, pp. 49-61, 2013.
- [12] C. Belfedal, Gherbi, S., Sedraoui, M., Moreau, S., Champenois, G. Allaoui, T. & Denai, M. A., "Robust control of doubly fed induction generator for stand-alone applications. *Electric Power Systems*", *Research*, vol. 80(2), pp. 230-239, 2010.
- [13] M. A. E. Nadia A. Eslonbaty, Ahmed M. Diab, "Proposed control policy for high power transfer capability DFIG", *Electric power Systems Research*, vol. 155, pp. 144-152, 2018.
- [14] D. L. A. Avila, " Control de sistema multivariables aplicado a un Generador Eólico Conectado a un Sistema de Potencia.", "Trabajo de grado", Facultad de Ingenierías - Ingeniería Eléctrica, Universidad

Tecnológica De Pereira, Pereira, 2013.

- [15] J. B. N. Alireza Alizade, "Evaluating noise and DC offset due to interharmonics and supra-harmonics caused by back-to-back converter of (DFIG) in AC distribution network", presented at the 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), 2017.
- [16] M. E. Hossain, "Improvement of transient stability of DFIG based wind generator by using of resistive solid state fault current limiter", *Ain Shams Engineering*, vol. 9 pp. 2557-2570 2018.
- [17] A. F. Mohammad Javad Morshed\*, "A new fault ride-through control for DFIG-based wind energy systems", *Electric Power Systems Research*, vol. 146, pp. 258–269, 2017.
- [18] L. V. Lesyani, "Control Basado en la Transformada de Fourier para un Restaurador Dinámico de Tensión que Alimenta un Generador Eólico", "Tesis Doctoral", Facultad de Eléctrica, Universidad Marta Abreu de La Villas, 2014.
- [19] A. Petersson, "Analysis modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines.", Ph.D. dissertation Sweden: Univ.Technol.Gothenberg, 2005.
- [20] L. T. León, F. de A. D. S. Neves, M. V. Llanes, "Análisis y modelado del generador de inducción doblemente alimentado", *Ingeniería Energética*, vol. 35, pp. 101-111, 2014.
- [21] P. Vas, "Electrical machines and drives, a space-vector theory approach.", Oxford Science Publications Oxford. New York. ISBN: 0198593783, 1992.

- [22] V. Akhmatov, "Analysis of Dynamic Behavior of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power,." vol. PhD: Technical University of Denmark, April 2003.
- [23] A. Petersson, "Analysis modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines." vol. Ph.D. dissertation Sweden: Univ.Technol.Gothenberg, 2005.
- [24] J. Morren and S. W. H. d. Haan, "Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip," *IEEE Trans. Energy Convers*, vol. 20, pp. 435–441, Jun. 2005.
- [25] A. N. Y. K. H. Akagi, "Reyes Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 20, p. 625–630, 1984.
- [26] F. Z. P. a. J. S. Lai, "Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems", *IEEE Trans. Instrum. Meas*, vol. 45, p. 293–297, 1996.
- [27] M. P. K. a. L.Malesani, "Current Control Techniques for Three-Phase Voltage-Source PWM Converters", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 45, pp. 691-703, October 1998.
- [28] A. C. S. L. Guimaraes, F. Neves, M. Carvalho, M. Cavalcanti, and Z. Lins, "Doubly Fed Induction Generators Active and Reactive Power Control", in *11TH, International power electronics and motion control conference:: EPE-PEMC 2004 Riga*, 2004.
- [29] G. Saccomando and J. Svensson, "Transient operation of grid connected voltage source converter under unbalanced voltage conditions", presented at the *Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting*, ISBN:

0-7803-7114-3, 2001.

- [30] J. L. Taberna, "Comportamiento de generadores eólicos con máquina asíncrona doblemente alimentada frente a huecos de tensión", "Tesis doctoral", Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Politécnica de Navarra, Pamplona, 2008.
- [31] R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation", *IEEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 143, pp 231-241, May 1996.
- [32] O. W. P. C. Krause, and S. D. Sodhoff, "Analysis of electric machinery and drive systems", 3ra. Ed., New York, Estados Unidos. IEEE Press Wiley, 2013..
- [33] J.-F. Funes Ruiz, «e-archivo,» 07 2009. [En línea]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/8015>.
- [34] T. Burton, N. Jenkins, and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, 2001.
- [35] J. G. Sloopweg, H. Polinder, and W. L. Kling, "Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, pp. 516-526, 2003.
- [36] J. G. Sloopweg, S. W. H. d. Haan, H. Polinder, and W. L. Kling, "General Model for Representing Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations," *IEEE Trans. on power system*, vol. 18, pp. 144-154, 2003.
- [37] A. Perdana and J. Persson, "Dynamic Response of Grid-Connected Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator during Disturbances," in *Nordic workshop on power and industrial electronics*

Trondheim 2004.

- [38] J. González Álvarez, "Significado de la No Linealidad.", Web, disponible en: <http://casanchi.com/mat/nolinealidad01.pdf>
- [39] G. R. Bossio, "Modelado de las irregularidades del motor de inducción: aplicaciones en la estimación de posición y el diagnóstico de fallas. "PhD Thesis.". Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ing Eléctrica, Universidad Nacional de la Plata. 2004.
- [40] S. a. B. Abdeddaim, A. , "Optimal tracking and robust power control of a DFIG wind turbine.", *Electrical Power and Energy Systems, International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 49, pp. 234-242, 2013.
- [41] B. e. a. Beltran, "Second order sliding mode control of a DFIG driven wind turbine", *IEEE Transaction on Energy Conversion.*, vol. 27, pp. 261-269, 2012.
- [42] Z. e. a. Boudjema, "Nonlinear control of a DFIG supplied by a matrix converter for wind energy conversion systems", *Journal of Electrical Engineering*, vol. 13, pp. 269-276, 2013.
- [43] E. e. a. Bounadja, "Variable structure control of a DFIG for Wind energy conversion systems", *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 999-1007, 2014.
- [44] G. e. a. Calderón, "Simulation and Comparative Analysis of DFIG-based WECS Using Stator Voltage and Stator Flux Reference Frames", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, pp 1052-1059, 2017.
- [45] W. e. a. Dawit, "Mitigation of power Quality Issues of wind and geothermal Power generation system by using FACTS devices", *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics,*

- Instrumentation and Control Engineering.*, vol. 6, pp. 42-50, 2018.
- [46] Y. e. a. Djeriri, "A comparative study beetwen Field oriented control strategy and direct Power control strategy for DFIG", *Journal of Electrical Engineering*, vol. 14, pp. 159-167, 2014.
- [47] G. G. a. M. Guidi, E.E. , "Initialization of the DFIG Machine for Electromagnetic Transients Calculation", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, pp. 497-504, 2018.
- [48] L. T. e. a. León, "The SVFT-Based Control", *IEEE Transactions on Industrial electronics*, vol. 61, pp. 4152-4160, 2014.
- [49] C. e. a. Mehdipour, "Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under balanced network conditions", *Electrical Power and Energy Systems.*, vol. 83, pp. 560-569, 2016.
- [50] B. e. a. Mehta, "Small signal stability enhancement of DFIG based wind power system using optimized controllers parameter", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 70, pp. 70–82, 2015.
- [51] A. K. a. B. Mondal, P. Singapore: Springer, "Design of P-I Controller of Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator Using Flower Pollination Algorithm.", *Advances in Communication, Devices and Networking. Lecture Notes in Electrical Engineering.* , vol. 462, pp. 755-766, 2018.
- [52] A. e. a. Rahab, "An overall control of BDFIG using direct power control for WECS under unbalanced grid voltage conditions", *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology*, vol. 4 pp. 53-63, 2018.
- [53] M. e. a. Ramirez, "Effect of PODCs for DFIG Based Wind Farms in the

- Inter-area and Torsional Oscillation Damping*", *IEEE Latin America Transactions* vol. 14, pp. 3648 - 3654, 2016.
- [54] J. e. a. Hu, "Dynamic modeling and improved control of FIG under distorted grid voltage conditions", *IEEE Transactions on Energy Conversion.*, vol. 26, no. 3, pp. 163–175, 2011.
- [55] A. A. e. a. Jimenez, "Analysis of rotor current impact on DFIG-WECS under fault condition", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, pp. 329-334, 2018.
- [56] G. Marques, "Understanding the Doubly Fed Induction Generator During Voltage Dips", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 6, pp. 421 – 431,, 2012.
- [57] S. e. a. Seman, "Ride-through analysis of doubly fed induction wind-power generator under unsymmetrical network disturbance", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 11, pp. 1782-1789, 2016.
- [58] X. e. a. Zhen, "Improved Ride-Through Control of DFIG During Grid Voltage Swell", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, pp. 3584-3594, 2015.
- [59] L. e. a. Zhou, "Improved Demagnetization Control of a Doubly-Fed Induction Generator Under Balanced Grid Fault", *IEEE Transactions on Power Electronics.*, vol. 30, pp. 6695 - 6705, 2015
- [60] A. C. S. L. Guimaraes, F. Neves, M. Carvalho, M. Cavalcanti, and Z. Lins, "Doubly Fed Induction Generators Active and Reactive Power Control", in *11TH, International power electronics and motion control conference:: EPE-PEMC 2004 Riga*, 2004.
- [61] R. e. a. Zhu, "Dual-Loop Control Strategy for DFIG-based Wind Turbines

- under Grid Voltage Disturbances", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, pp. 2239 - 2253, 2015.
- [62] L. Lupsa-Taturu, "A Flux-Based Expression of Induction Machine Magnetizing Inductance", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, pp. 268-270, 2010.
- [63] M. E. Martín, "Aportación al modelado del motor trifásico de inducción con consideración de la saturación y el efecto de la doble jaula", PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2016.
- [64] D. e. a. Bispo, "A new strategy for induction machine modeling taken into account the magnetic saturation", *IEEE transaction on Industrial Application*, vol. 37, pp. 1710-1719, 2001.
- [65] H. a. K. Jbar, N., "Leakage flux saturation effects on the transient performance of wound rotor induction motors", *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 1280-1289, 2008.
- [66] A. De Blas del Hoyo, "Modelización de la Histéresis Magnética y su Aplicación al Cálculo Numérico en Máquinas Eléctricas", "Tesis doctoral", Departamento de Ingeniería Electrica, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2005.
- [66] L. N. Arruda, S. M. Silva, and B. J. C. Filho, "PLL structures for utility connected systems", presented at the Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, 2001.
- [67] S.-K. Chung, "A phase tracking system for three phase utility interface inverters", *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 15, pp. 431-438, May 2000.
- [68] V. Kaura and V. Blasko, "Operation of phase locked loop system under distorted utility conditions", *IEEE Trans. Ind. Appl*, vol. 23, pp. 58-63,

Jan./Feb. 1997.

- [69] P. Rodríguez, J. Pou, J. Bergas, I. Candela, R. Burgos, and D. Boroyevich, "Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control", *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 22, pp. 584–592, 2007.
- [70] X. Guo, W. Wu, and Z. Chen, "Multiple-complex coefficient-filterbased phase-locked loop and synchronization technique for three-phase grid-interfaced converters in distributed utility networks", *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 58, pp. 1194–1204, 2011.
- [71] R. T. P. Rodríguez, I. Candela, A. Timbus, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions," *IEEE PES*, pp. 1-7, 2006.
- [72] F. A. S. Neves, H. E. P. d. Souza, M. C. Cavalcanti, and E. Bueno, "Low effort digital filters for fast sequence components separation of unbalanced and distorted three-phase signals", presented at the *Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron*, 2010.
- [73] F. A. S. Neves, M. C. Cavalcanti, H. E. P. d. Souza, F. Bradaschia, E. Bueno, and M. Rizo, "A generalized delayed signal cancellation method for detecting fundamental-frequency positive-sequence three-phase signals", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, pp. 1816–1825, 2010.
- [74] H. E. P. d. Souza, F. Bradaschia, F. A. S. Neves, M. C. Cavalcanti, G. M. S. Azevedo, and J. P. Arruda, "A method for extracting the fundamental frequency positive-sequence voltage vector based on simple mathematical transformations", *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 56, pp. 1539–1547, 2009.

- [75] J. Svensson, M. Bongiorno, and A. Sannino, "Practical implementation of delayed signal cancellation method for phase-sequence separation", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, pp. 18–26, 2007.
- [76] S. M. D. M. S. Pádua, and F. P. Marafão, "Frequency-adjustable positive sequence detector for power conditioning applications", publicado: *2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, 2005.
- [77] M. L. V. Moreno, A. Pigazo, and A. Dell'Aquila, "A comparative analysis of real-time algorithms for power signal decomposition in multiple synchronous reference frames", *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 22, pp. 1280 - 1289, 2007.
- [78] F. Neves, H. d. Souza, F. Bradaschia, M. Cavalcanti, M. Rizo, and F. Rodriguez, "A space-vector discrete fourier transform for unbalanced and distorted three-phase signals", *IEEE Transactions on Industries Electronic*, vol. 57, pp. 2858-2867, Aug. 2010.
- [79] M. F. Martinez-Montejano, G. Escobar, and R. E. Torres-Olguin, "Fixed reference frame phase-locked loop (FRF-PLL) for unbalanced line voltage conditions", in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, 2008, pp. 4723–4728.
- [80] K. Borisov and H. Ginn, "A novel reference signal generator for active power filters based on recursive DFT", in *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Exhib*, 2008, pp. 1920–1925.
- [81] T. Funaki and S. Tanaka, "Error estimation and correction of DFT in synchronized phasor measurement", in *Proc. IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Exhib*, 2002, pp. 448–453.
- [82] S. Srianthumrong and S. Sangwongwanich, "An active power filter with

harmonic detection method based on recursive DFT", presented at the Proc. Conf. Harmon. Quality Power, 1998.

- [83] F. A. S. Neves, M. Cabral, H. E. P. d. Souza, F. Bradaschia, E. Bueno, and M. Rizo, "A Generalized Delayed Signal Cancellation Method for Detecting Fundamental-Frequency Positive-Sequence Three-Phase Signals " *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 25, July 2010.
- [84] I. S. 1159-2009, 2009, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electrical Power Quality", IEEE, disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=5154052>
- [85] A. R. Blanco, "Estudio del Efecto de los Huecos de Tension en el Generador de Inducción Doblemente Alimentado",. "Tesis Doctoral", Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial y Aeronautica de Terrssa, Universidad Politécnica de Cataluña, 2012.
- [86] Paul M.V. den Hof, X. Bombois. "System Identification for Control". Delft University of Technology. 2004
- [87] Bounadja, E. & Mahmoudi, M.O. & Abdelkader, Djahbar. "Performance of saturated doubly-fed induction generator during transient state". *Journal of electrical engineering*, vol. 16, pp 244-252, Ene. 2016.
- [88] X. B. Paul M. J. Van den Hof, "System Identification for Control", Delft Center for Systems and Control Delft University of Technology, The Netherlands, 2004.
- [89] U. Forsell, L. Ljung, "Close-loop Identifcation Revisited", *Automatica*, vol. 35, pp 1215-1241. 1999.
- [90] A. Aguado and A. Cipriano, "Identificación en lazo cerrado y ajuste de

- reguladores mediante algoritmos genéticos", *RIAI*, vol. 6, pp. 20-30, 2009.
- [91] A. A. R. F. Tanda, "Identificación de sistemas en lazo cerrado basada en una estrategia híbrida AGA.Simplex", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 10, pp. 37-49, 2013.
- [92] A. F. d. Santos, "Aplicação de Redes Neurais Artificiais no Controle Eficiente do Motor de Indução Trifásico", *Tesis de Maestria*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal De Pernambuco, Recife 2008.
- [93] Brouri, A, y otros Identification of nonlinear systems structures by HammersteinWiener Model. *International Journal of Electric, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*. Vol 8, No. 5, p. 744-748, 2014
- [94] Will, A and Ninnes B. Estimation of Generalised Hammerstein-Wiener Systems. *IFAC Proceeding Vol 42, No 10*, p. 1104-1109, 2009
- [95] M. Boutayeb and M. Darouach. Recursive identification method for MISO Wiener-Hammerstein model. *IEEE Trans. Automat. Control*, 40(2):287–291, 1995. ISSN 0018-9286.
- [96] J. Schoukens, J. Suykens, and L. Ljung. Wiener–hammerstein benchmark (sysid 2009 special session). [www.tw.vub.ac.be/elec/sysid09.htm](http://www.tw.vub.ac.be/elec/sysid09.htm), 2008.
- [97] Jozef V. Parameter identification of Wiener systems with multisegment piecewise-linear nonlinearities. *Systems Control Lett.*, 56(2):99–105, 2007. ISSN 0167-6911.
- [98] HONGMEI, J; LIANHUA,W. "Interval-valued fuzzy subsemigroups and subgroups sssociated by intervalvalued Fuzzy graphs", 2009 WRI Global

Congress on Intelligent Systems, 484-487 (2009).

- [99] BUSTINCE, Humberto. "Interval-valued Fuzzy Sets in Soft Computing". *International Journal of Computational Intelligence Systems*, Vol.3, No. 2 (June, 2010), 215-222.
- [100] BUSTINCE, Humberto, et. al. A survey of interval-valued fuzzy sets. In W.Pedrycz (Ed.), *Handbook of Granular Computing*, Wiley, New Jersey, (2008).
- [101] WANG, C.H; CHENG, C.S; LEE, T.T. "Dynamical optimal training for interval type-2 fuzzy neural network (T2FNN)". *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics: Part B*, 34 (3), 1462-1477 (2004)
- [102] CHEN, S.H; WANG, H.Y. "Evaluating students answer scripts based on interval-valued fuzzy grade sheets", *Expert Systems with Applications*, 36 (6), 9839-9846 (2009).
- [103] SANZ Jose, y otros "A First Study on the Use of Interval-Valued Fuzzy Sets with Genetic Tuning for Classification with Imbalanced Data-Sets". *4th International Workshop on Hybrid Artificial Intelligence Systems, 2009 Salamanca, Spain, Hybrid Artificial Intelligences Systems, Book Series: Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 5572, 581-588 (2009)
- [104] BROUMI, Said; SMARANDACH, Florentin. "New Operations over Interval Valued Intuitionistic Hesitant Fuzzy Set". *Mathematics and Statistics* 2(2): 62-71, (2014)
- [105] Xu Z S, Xia M M. "On distance and correlation measures of hesitant fuzzy information". *International Journal of Intelligent Systems* 26(5),pp. 410-425 (2011)
- [106] KASABOV, N. K; SONG, Q. "DENFIS: Dynamic Evolving Neural-Fuzzy

- Inference System and its application for time-series prediction*". *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 10(2) 144-154 (2012)
- [107] LI, Z; ER, M.J.. "A nonlinear transversal fuzzy filter with online clustering". *5th Asian Control Conference (ASCC 2004)*, Melbourne, Australia (2004) 1585- 1593
- [108] KUKOLJ, D; LEVI, E. "Identification of complex systems based on neural and Takagi–Sugeno fuzzy model" *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics*. 34(1) (2004) 272-282
- [109] ANGELOV, P.P; FILEV, D.P. "An approach to online identification of Takagi-Sugeno fuzzy models". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics*. 34(1) (2004) 484-498
- [110] YU, W; FERREYRA, A. "On-line clustering for nonlinear system identification using fuzzy neural networks" *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Reno, NE, USA (2005) 678-683
- [111] BOUCHACHIA, A; MITTERMEIR, R."Towards incremental fuzzy classifiers". *Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*. 11(2) (2007) 193-207
- [112] TAKAGI, T; SUGENO, M. "Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 15 (1) (1985) 116-132
- [113] MARTÍNEZ, B. L., HERRERA, F., FERNÁNDEZ, J. A. "Métodos de agrupamiento clásico para el modelado difuso en línea *Convención Internacional FIE'06*, Santiago de Cuba, Cuba (2006)
- [114] MARTINEZ, y otros "Método de Agrupamiento en Línea para la Identificación de Modelos Borrosos Takagi-Sugeno" *Revista*

*Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. ISSN: 1697-7912. Vol. 5, Núm. 3, Julio 2008, pp. 63-69

- [115] HERRERA, F, MARTINEZ, B. KERRE, E, "A global fuzzy model for non linear systems using interval valued fuzzy sets", *RIELAC*, V 37, No 3, pag 50 a 57, 2016
- [116] MARTINEZ, B. "Fuzzy identification of non linear systems using incremental clustering with application in a bioethanol fermentative process". *PhD Dissertation, UCLV, 2008.*

## ***Descubre tu próxima lectura***

Si quieres formar parte de nuestra comunidad, regístrate en <https://www.grupocompas.org/suscribirse> y recibirás recomendaciones y capacitación



   @grupocompas.ec  
compasacademico@icloud.com

compAs  
Grupo de capacitación e investigación pedagógica



@grupocompas.ec  
compasacademico@icloud.com

