

**MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD DE
FRECUENCIA DE UN SISTEMA DE
GENERACIÓN EÓLICA MEDIANTE LA
INCLUSIÓN DE INVERSORES APLICANDO
CONTROL ROBUSTO.**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD DE
FRECUENCIA DE UN SISTEMA DE
GENERACIÓN EÓLICA MEDIANTE LA
INCLUSIÓN DE INVERSORES APLICANDO
CONTROL ROBUSTO.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: ALEXANDER GIOVANNY CISNEROS SANCHEZ
TUTOR: CRISTIAN CRISTÓBAL CUJI CUJI

Quito -Ecuador
2023

Juan Manuel Pérez López

“MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD DE FRECUENCIA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE INVERSORES APLICANDO CONTROL ROBUSTO.”

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2023

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



Alexander Giovanni Cisneros Sanchez (Y'1998). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Agropecuario “Técnico Pedernales” del cantón de Pedernales. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el mejoramiento de la estabilidad de frecuencia de un sistema de generación eólica mediante la inclusión de inversores aplicando control robusto. acisneross@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Cristian Cristóbal Cuji Cuji (Y'1986 – SM'03). Se graduó de Ingeniero Electrónico de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2014 y Master en Energía, Facultad de Ciencias Físicas en la Universidad Complutense de Madrid – España en 2015. Actualmente es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana - Quito Ecuador. ccuji@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2023 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Alexander Giovanni Cisneros Sanchez con documento de identificación N°1719105692 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quti, 24 de octubre del año 2023

Atentamente,



Alexander Giovanni Cisneros Sanchez
1719105692

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Alexander Giovanni Cisneros Sanchez con documento de identificación No.1719105692, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico “Mejoramiento de la estabilidad de frecuencia de un sistema de generación eólica mediante la inclusión de inversores aplicando control robusto”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quti, 24 de octubre del año 2023

Atentamente,



Alexander Giovanni Cisneros Sanchez

1719105692

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Cristian Cristóbal Cuji Cuji con documento de identificación N°1718002221, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD DE FRECUENCIA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE INVERSORES APLICANDO CONTROL ROBUSTO, realizado por Alexander Giovanni Cisneros Sanchez con documento de identificación N°1719105692, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 24 de octubre del año 2023

Atentamente,



Ing. Cristian Cristóbal Cuji Cuji, MSc
1718002221

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico.....	2
2.1	Generación distribuida por medio de la generación eólica.	2
2.2	Control Robusto aplicados a modelos de regulación de frecuencia.	3
2.3	Inversores aplicados a la generación eólica mediante un control robusto.	4
2.4	Afectaciones de la variación de frecuencia en la estabilidad del sistema.	5
2.5	Estabilidad de la frecuencia.....	5
2.6	Técnicas para la estabilización de la frecuencia.	5
2.6.1	Cuasi-oposicional.	6
2.6.2	Control integral derivativo.....	6
2.6.3	Controladores.	6
2.7	Control robusto aplicado a la generación eléctrica.	6
2.7.1	Control robusto ante una incertidumbre en el sistema.	6
2.7.2	Optimización de control robusto.....	7
2.7.3	Control robusto ante un controlador PID.....	7
2.8	Aplicación de control robusto H-infinity aplicado en la generación eólica.	8
2.8.1	Regulación de la frecuencia mediante Control H-infinity.....	8
3	Planteamiento del problema.	8
3.1	Caso de estudio.....	9
3.2	Modelo de turbina eólica.....	10
3.3	Circuito de potencia del Sistema de Energía Eólica.	10
3.4	Modelo de control de la turbina eólica.....	11
3.5	Modelo mecánico de la turbina eólica.	11
3.6	Modelado de control robusta para regular la velocidad de la turbina eólica.	12
4	Análisis de resultados.....	12
4.1	Respuesta de control robusto ante una perturbación.	13
4.2	Mejora de los niveles de frecuencia de una turbina eólico.....	14
4.3	Casos críticos obtenidos en frecuencia.....	14
4.3.1	Valores críticos obtenidos con el controlador PI.	14
4.3.2	Valores críticos obtenidos con el control robusto.....	15
4.4	Resumen de resultados.	15
5	Conclusiones.....	16
5.1	Trabajos futuros.....	16
6	Referencias.....	16

6.1	Matriz de Estado del Arte.....	21
6.2	Resumen de Indicadores.....	31
7	Anexos	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Interconexión de fuentes de energía para el sistema eléctrico.	3
Figura 2: Inversor aplicado en la distribución de energía eólica.....	4
Figura 3: Modelo de onda de la frecuencia dentro de los márgenes de estabilidad. ...	4
Figura 4: Control robusto de un sistema retroalimentado.	7
Figura 5: Pseudocódigo del proceso – Metodología a seguir en el proceso de control robusto.....	9
Figura 6: IEEE 37 Bus Pest Test Feeder.	9
Figura 7: Modelado de la turbina eólica dada por Plecs.....	10
Figura 8: Modelo de eje mecánico de la turbina eólica, incluida la conversión de velocidad del viento/eje en par.	11
Figura 9: control robusto aplicado a la generación eólica de la librería Plecs.....	12
Figura 10: Implementación de aerogenerador con control robusto en la barra 731. ...	13
Figura 11: Modelado de control robusto retroalimentado ante una perturbación.	13
Figura 12: Actuación de control robusto ante una perturbación.	13
Figura 13: Niveles de frecuencia con un control PI.....	14
Figura 14: Niveles de frecuencia con un Control Robusto.	14
Figura 15: Niveles de frecuencia críticos con control PI.....	15
Figura 16: Niveles de frecuencia críticos con control robusto.....	15
Figura 17: Comparación de los niveles de frecuencia del control robusto vs el control PI.	16
Figura 18: Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	
Figura 19: Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	31
Figura 20: Indicador de solución - Estado del arte.....	31
Figura 21: Sistema de 37 barras conectado a un aerogenerador.	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ecuación de oscilación de una máquina síncrona (SM).....	5
Tabla 2: Ecuación de la función de transferencia de primer orden $G_{wtg}(s)$	6
Tabla 3: Ecuación de acoplamiento directo entre la frecuencia y el cambio de la salida dada como ΔF_s	6
Tabla 4: Ecuación de control PID.....	7
Tabla 5: Ecuación de oscilación	8
Tabla 6: Ecuación de oscilación mediante una perturbación.	8
Tabla 7: Ecuación de oscilación mediante la transformada de la place.	9
Tabla 8: Datos del sistema IEEE 37 Bus Pest Test Feeder.....	9
Tabla 9: Modelo matemático de turbina eólica.	10
Tabla 10: Variables del generador síncrono.	11
Tabla 11: Modelo matemático de un generador síncrono.	12
Tabla 12: Análisis de la estabilidad angular ante la ecuación de oscilación.....	12
Tabla 13: Constante de tiempo de la máquina.	12
Tabla 14: Función de transferencia aplicada a control robusto.....	13
Tabla 15: Niveles de frecuencia críticos con control PI.	15
Tabla 16: Niveles de frecuencia críticos con control robusto.	15
Tabla 17: Comparación de los niveles de frecuencia del control robusto vs el control PI.....	15
Tabla 18: Matriz de estado del arte.	21

MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD DE FRECUENCIA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE INVERSORES APLICANDO CONTROL ROBUSTO.”

Resumen

El objetivo de este artículo científico es mejorar la estabilidad de frecuencia en sistemas de generación eólico, mediante la simulación de un modelo de control robusto H-infinity para obtener un mejor control de la velocidad del rotor aumentando la estabilidad de frecuencia del sistema eólico. Se implementa un control robusto de H-infinity ya que este controlador brinda una mayor velocidad de respuesta de actuación permitiendo regular nuestro sistema lo antes posible. El control será de manera automática en un tiempo mínimo que actuará ante los diferentes niveles de viento que se presenta en el aerogenerador obteniendo un sistema confiable y seguro para los usuarios. Una vez realizada la simulación se pudo evidenciar casos críticos de estudios donde se aplicando diferentes niveles de frecuencia mismos que se producen por el comportamiento aleatorio por la generación eólica, causando daños al sistema donde se pudo observar la perfecta actuación del modelo de control H-infinity. Para finalizar los resultados que se presentan son la obtención de una frecuencia controlada dentro de los límites establecidos y así poder tener un servicio de energía eléctrica de calidad.

Palabras Clave: frecuencia, armónicos, distorsión, filtro, aerogenerador, energía eólica, inductor, inversor, capacitor.

Abstract

The objective of this scientific article is to improve the frequency stability in wind generation systems, by simulating a robust H-infinity control model to obtain a better control of the rotor speed, increasing the frequency stability of the wind system. A robust control of H-infinity is implemented since this controller provides a higher actuation response speed, allowing our system to be regulated as soon as possible. The control will be automatically in a minimum time that will act before the different levels of wind that occurs in the wind turbine, obtaining a reliable and safe system for users. Once the simulation was carried out, it was possible to demonstrate critical cases of studies where different frequency levels were applied, which are produced by the random behavior of wind generation, causing damage to the system where the perfect performance of the H-infinity control model could be observed. Finally, the results that are presented are obtaining a controlled frequency within the established limits and thus be able to have a quality electric power service.

Keywords: frequency, harmonics, distortion, filter, wind turbine, wind power, inductor, inverter, capacitor.

1 Introducción

A raíz del aumento masivo de la energía renovable en el sistema eléctrico de potencia (SEP) tales como la energía eólica, los diferentes métodos de producción de energía eléctrica han traído desafíos significativos para los operadores de sistemas eléctricos [1].

Como resultado se produce un mayor desequilibrio entre la energía generada y la demanda de carga, lo que conlleva a una mejora de las variaciones de frecuencia del sistema [2].

Los sistemas de control se vuelven extremadamente importantes para maximizar la eficiencia de regulación de frecuencia, reduciendo las cargas para prolongar su vida útil.[2].

La importancia de sus sistemas de control de la energía eólica es la velocidad variable que puede operar con la máxima eficiencia aerodinámica ajustando la velocidad del rotor de la turbina de acuerdo con la velocidad del viento entrante y, por lo tanto, esto puede causar un desfase de frecuencia [3].

Los controladores robustos son esenciales en un sistema de este tipo para el control de la frecuencia de carga donde se sugiere un controlador de frecuencia de carga que utiliza un método de formación de bucle cerrado H-infinity.

El controlador H-infinity por la propiedad robusta de control garantizar la eficiencia y estabilidad en sistemas de generación eólicos[4].

El control H infinity actuara cuando la velocidad del viento supera la velocidad nominal, el controlador debe actuar de modo eficiente y alcanzar el estado correcto antes de que pueda continuar el control normal[4].

El control H-infinity es una de estas técnicas de control avanzadas, siendo un control robusto que se basa en la optimización, el cual este controlador se ha aplicado cada vez más en los sistemas de generación eólica[4].

2 Antecedentes investigados.

A continuación, se presenta la investigación de controladores para la optimización de una turbina eólica.

(Petras y Kacur, 2020) investigaron un amplio uso para el proceso de control. En algunos casos normalmente se utiliza un controlador PI o PID. Sin embargo, el sistema de circuito cerrado con planta integradora tiene un cero estable, que está en el numerador de la función de transferencia, lo que provoca un sobre impulso en la variable controlada

(Xinyan Zhang y Feng li 2012) Investigo el método y los resultados del control PI difuso y utilizado para controlar la turbina eólica para que pueda ser más estable y, mientras tanto, se puede reducir su carga de operación y minimizar la fluctuación de la potencia. Aunque su degradación y el ruido del sensor pueden generar incertidumbre. Además, la perturbación del entorno y la sobrecarga pueden interferir con el rendimiento del motor.

3 Marco teórico

La generación de energía eólica como una fuente de energía variable e intermitente ha traído nuevos problemas técnicos, el problema principal es controlar la frecuencia en un margen estables [3].

3.1 Generación distribuida por medio de la generación eólica.

La generación distribuida (GD) se refiere a la elaboración de energía para transmitir hasta el sitio del usuario final [6].

El crecimiento de la energía renovable distribuida está impulsado por las fuentes de energía renovables y sus utilidades, los generadores de la GD comúnmente están implementados por la energía eólica que produce energía eléctrica limpia [7], [8].

El sector eléctrico es el principal causante de generar gases efecto invernadero, la implementación de la energía renovable en la red, se la denomina generación distribuida siendo amigable con el medio ambiente (GD) [9].

La generación distribuida es una interconexión de fuentes de energía para funcionar de manera flexible, confiable y eficiente Figura 1[9].

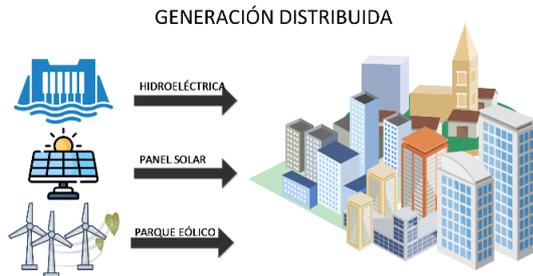


Figura 1: Interconexión de fuentes de energía para el sistema eléctrico.

Con el incremento masivo de la GD, los sistemas eléctricos aumentan su grado de complejidad en términos de operación y control [10].

El funcionamiento adecuado de la generación distribuida requiere un sistema de control de flujo de energía alto y eficiente que distribuya la demanda de energía entre los recursos de energía disponibles hasta el usuario final [10].

La energía es una parte importante del crecimiento económico y la evolución social. La investigación de nuevas fuentes de energía da paso al análisis estratégico para optar por una opción que sea rentable para poder mantener la energía eléctrica [11]–[13].

Actualmente, una gran cantidad de energía eólica está conectada a la red debido a sus ventajas no contaminantes lo que reduce la dependencia de los recursos no renovables [11]–[13].

Debido a los cambios existentes que están afectando el clima a nivel mundial se analiza vías de prevenir la contaminación y preservar áreas verdes del planeta [10].

Se ha buscado maneras de apetecer energía eléctrica con un proceso limpio sin contaminantes para el medio ambiente, y el proceso de generación eólica es uno de los más importantes y con una contaminación casi nula [11]–[13].

Las turbinas eólicas han sido desarrolladas y ampliamente utilizadas en la industria moderna como equipos potentes que trabajan en un entorno relativamente duro para el desarrollo de una energía limpia [14], [15].

Cada vez se han desarrollado más aerogeneradores en parques eólicos para satisfacer la demanda eléctrica [14], [15].

La generación eólica, considerada como una especie de Generación Distribuida e ha introducido en los sistemas de energía micro eléctrica, donde sus principales características son: limpias, renovables y competitivas en costos [16], [17].

El continuo crecimiento de los mercados de energía renovable obliga a los operadores del sistema eléctrico a garantizar la rentabilidad y mantener la confiabilidad del sistema eléctrico [16], [17].

Con la creciente penetración de la energía eólica, han generado incertidumbres en la generación de energía han traído desafíos significativos para operadores de sistemas eléctricos [16], [17].

3.2 Control Robusto aplicados a modelos de regulación de frecuencia.

El control es el mecanismo por el cual se satisface un equilibrio entre la generación y la demanda de energía y es un factor importante para la operación de los sistemas de energía [18].

Los controladores de frecuencia se utilizan en la industria son de tipo integral proporcional derivativo (PID) [18], [19].

Don de los controladores se ajustan en línea en función de enfoques de prueba y error ya que el controlador PI no puede proporcionar una respuesta tan rápida que se adapte a los requisitos de estabilidad a corto plazo [18], [19].

Se pueden encontrar muchos enfoques para ajustar la ganancia del controlador PI de parámetro fijo. Sin embargo, los sistemas con control PI tienen un tiempo de estabilización prolongado y sobre impulsos

relativamente grandes en las respuestas transitorias de la frecuencia [18].

Los controladores PID brindan más flexibilidad de diseño para una mejor estabilidad para los sistemas [20], [21].

El control de frecuencia de carga de un sistema de potencia utilizando un controlador clásico proporcional, integral y derivado (PID) que obliga a la frecuencia a oscilar de forma natural en la red. Para mejorar el perfil de potencia y voltaje [20], [21].

3.3 Inversores aplicados a la generación eólica mediante un control robusto.

En los últimos años, los estudios sobre fuentes de energía renovables han aumentado rápidamente la energía producida no se transmite a la red directamente debido a la facilidad de uso y la eficiencia [22].

Se deben proporcionar muchas condiciones para transmitir la energía a la red. Estas condiciones son forma de onda sinusoidal, continuidad de energía eléctrica, frecuencia fija, equilibrio de los voltajes producidos, para estar dentro de límites específicos de armónicos de corriente [22].

En este sentido, se utilizan inversores trifásicos a altas potencias para transferir energía eléctrica a la red Figura 2. El mecanismo de control del inversor es muy importante para controlar las tensiones de salida del inversor, estas deben estar sincronizadas con las tensiones de red [22].

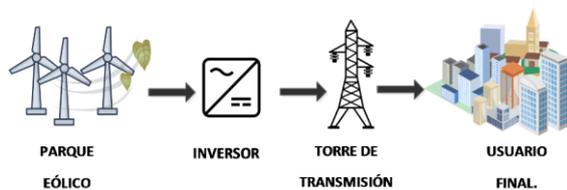


Figura 2: Inversor aplicado en la distribución de energía eólica.

En los sistemas eléctricos, el equilibrio entre generación y carga es muy importante para mantener la frecuencia de la red dentro

de los márgenes de estabilidad relevantes Figura 3.

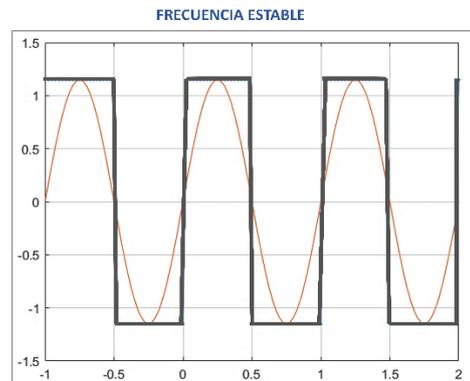


Figura 3: Modelo de onda de la frecuencia dentro de los márgenes de estabilidad.

El control de frecuencia de carga se ha utilizado hasta ahora para proporcionar servicios de apoyo a la red (GSS) principalmente desde generadores síncronos durante perturbaciones en los sistemas eléctricos que afectan la estabilidad de frecuencia [23].

Las estrategias de control se analizan para mantener el control en el voltaje de carga y la frecuencia del sistema de energía renovable con respecto a las condiciones de carga resistiva constante y variable [3].

Para evitar las desviaciones de frecuencia el controlador se vuelve muy importante. La primera parte convencional del control es la reserva de contención de frecuencia (FCR) con comportamiento proporcional para estabilizar la frecuencia en un valor de estado casi estable [3].

La desviación de frecuencia depende inicialmente de la constante de inercia agregada del sistema y de la constante de amortiguación de carga, que se apoya en una parte pasiva de la carga, donde el control es el corazón del sistema de energía y se utiliza para mantener la frecuencia dentro de un rango aceptable durante el desequilibrio entre generación y carga [23], [24].

Para analizar el control durante las perturbaciones de potencia activa, ya que la dinámica de respuesta de frecuencia es relativamente lenta, desde dos segundos a dos minutos [23].

La ecuación de oscilación de una máquina síncrona (SM) en caso de una pequeña perturbación viene dada por la siguiente ecuación Tabla 1 [23] :

Tabla 1: Ecuación de oscilación de una máquina síncrona (SM).

$$A = \frac{f_0}{2HG} \quad (1)$$

$$B = \Delta P_L(s) - \Delta P_m(s) - D\Delta f \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta f(s)}{dt} = A * B \quad (3)$$

Donde H es la constante de inercia agregada, G es la potencia nominal total de los generadores, f_0 es la frecuencia nominal de la red, Δf es el cambio en la frecuencia del rotor, ΔP_L es un el cambio en la potencia mecánica en MW debido al motor primario, $D\Delta f$ es el cambio de carga sensible a la frecuencia, ΔP_L es la perturbación en el sistema, que podría ocurrir debido a cambios en la carga o generación[23].

3.4 Afectaciones de la variación de frecuencia en la estabilidad del sistema.

La frecuencia es una de las variables más significativas que indican la seguridad y estabilidad del sistema eléctrico [25], [26].

El alto crecimientos de implementación de las energías renovables disminuye la inercia del sistema eléctrico siendo un proceso desafiante mantener la generación con la demanda eléctrica y así obtener una frecuencia dentro de límites aceptables [25], [26].

Los crecientes niveles de penetración de la energía eólica ha sido una tendencia en todo el mundo de la generación de energía, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental de la energía eléctrica[26].

Durante las variaciones de carga normales de la generación distribuida conectada a la red, la frecuencia es regulada

por el sistema de control automático de generación[27] .

Para mantener el equilibrio de potencia y evitar que la frecuencia caiga por debajo del valor especificado, las cargas adecuadas deben eliminarse lo antes posible [20].

Los aerogeneradores modernos de velocidad variable se conectan al sistema de energía mediante convertidores electrónicos de potencia. Esta conexión no síncrona desacopla la inercia natural del aerogenerador de la frecuencia de la red [28].

A medida que aumentan los niveles de penetración del viento en el sistema eléctrico, es esencial que los generadores de turbinas eólicas brinden servicios de estabilidad de frecuencia robustos y confiables a los operadores de la red [28].

3.5 Estabilidad de la frecuencia.

La implementación de las energías renovables dentro del sistema eléctrico de potencia, se utilizan ampliamente hoy en día en las redes eléctricas modernas para una generación, lo que da como resultado interacciones complicadas entre la red. Como consecuencia traen inestabilidad al sistema [29].

La respuesta de frecuencia, que es crucial para la integridad y la seguridad del sistema de potencia, es esencialmente la capacidad de un sistema de potencia para evitar cambios de frecuencia después de una perturbación [1].

Debe haber un equilibrio adecuado entre la generación y la carga para mantener la frecuencia de la red dentro de un rango aceptable alrededor de su valor nominal (por ejemplo, 60 Hz en Ecuador y muchos otros países) [1].

3.6 Técnicas para la estabilización de la frecuencia.

A medida que los niveles variables de generación renovable crecen hasta penetrar significativamente en el sistema eléctrico, los operadores de la red lucharán por mantener la estabilidad y confiabilidad del

sistema [28], las técnicas más utilizadas son:

3.6.1 Cuasi-oposicional.

Cuasi-oposicional es un algoritmo de libélula para optimizar las ganancias del controlador instalado en el modelo de sistema de energía estudiado para la mejora sustancial en el rendimiento de LFC [30]. El modelo simplificado de un aerogenerador por función de transferencia de primer orden $G_{wtg}(s)$ Tabla 2:

Tabla 2: Ecuación de la función de transferencia de primer orden $G_{wtg}(s)$

$$\frac{P_{wtg}}{P_w} = \frac{K_{wtg}}{1 + s T_{wtg}} \quad (4)$$

Donde K_{wtg} es la constante de ganancia y T_{wtg} es la constante de tiempo del WTG (turbina del generador eólico).

3.6.2 Control integral derivativo.

El análisis para la regulación de frecuencia con tecnologías eólicas presentes y futuras, dónde el acoplamiento directo entre la frecuencia y el cambio de salida de potencia activa en el sistema de potencia se presenta a través de la ecuación $\Delta F(s)$ Tabla 3 [2],[31].

Tabla 3: Ecuación de acoplamiento directo entre la frecuencia y el cambio de la salida dada como $\Delta F(s)$.

$$A = \Delta P_t + \Delta P_w - \Delta P_L - \Delta P_{tie} \quad (5)$$

$$B = \frac{K_p}{1 + s T_p} \quad (6)$$

$$\Delta F(s) = A * B \quad (7)$$

La nomenclatura es K_p es ganancia del sistema de potencia, ΔP_t variación de potencia de las unidades de generación convencionales, ΔP_w es la potencia de salida de la energía eólica, ΔP_L es alteración de la carga, ΔP_{tie} es la variación de potencia de la línea de interconexión, T_p constante de

tiempo del sistema de potencia, D es la constante de amortiguamiento de carga.

Entonces Donde, $T_p = \left(\frac{2 * Heq}{D * f^0}\right)$, $K_p = \frac{1}{D}$ la operación de LFC se logra a través de un controlador integral derivativo que implementa un control de polarización de línea de enlace que implica un error de control de área (ACE) como una combinación lineal de desviaciones de frecuencia y potencia de línea de enlace [2].

El controlador integral se utiliza para minimizar el error de control de área y llevar a cero las desviaciones de frecuencia correspondientes [2],[32].

3.6.3 Controladores.

Un control es el diseño de un controlador eficiente para controlar un sistema, este controlador puede ser PI o un PID [30]. Este controlador ayuda a mantener un sistema estable ante una perturbación [33].

3.7 Control robusto aplicado a la generación eléctrica.

El control robusto es un sistema de respuesta encargado de mantener la señal de error dentro de los límites establecidos manteniendo una estabilidad en el sistema [31].

El control robusto se basa en la creación de diseños de controladores, los cuales reaccionen a causa de una perturbación, manteniendo un rendimiento más alto en presencia de un error ocasionado en el sistema [31].

3.7.1 Control robusto ante una incertidumbre en el sistema.

En control robusto es necesaria una retroalimentación siempre y cuando exista una incertidumbre ocasionando daños en el sistema [31].

La incertidumbre se origina en modelos continuos, lineales e invariantes en el tiempo, siendo la incertidumbre un caso que motiva a la retroalimentación del control robusto [31].

Las incertidumbres pueden derivarse en 3 clases que son:

- Incertidumbre paramétrica.
- Incertidumbre no paramétrica.
- Incertidumbre mixta.

Un modelo de incertidumbre está relacionado con un margen de robustez donde la ganancia implicará la rapidez que obtendrá el sistema en responder ante dicha incertidumbre [31].

3.7.2 Optimización de control robusto.

Un margen de control robusto debe ser considerado acto para actuar ante una perturbación donde se debe tener en cuenta varias consideraciones para optimizar el funcionamiento. [31]

Para la optimización de un control robusto existen varias técnicas las cuales son:

- Diseño de compensadores.
- control de modo deslizante (SMC).
- control de estructura variable.
- retroalimentación cuantitativa (QFT).
- control basado en pasividad.
- control basado en Lyapunov.

3.7.3 Control robusto ante un controlador PID.

Hoy en día existen varias posibilidades de crear un control robusto mediante el diseño de un controlador PID donde el control robusto es un sistema retroalimentado, como se muestra en la Figura 4, la retroalimentación de un control PID ayuda a mantener una respuesta del sistema ya que analiza la señal de error y la corrige mediante el controlador[31].

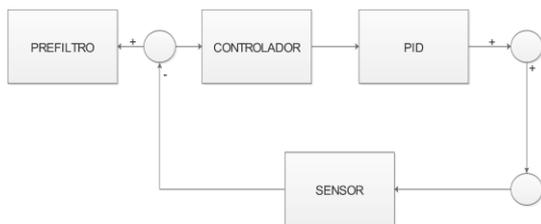


Figura 4: Control robusto de un sistema retroalimentado.

Donde la salida del bloque es una suma ponderada entre la señal de entrada, la

integral y la derivada, la carga es el valor de ganancia proporcional, integral y derivativo donde un polo de primer orden filtra la acción derivativa [34].

La ecuación de control PID se describe en la siguiente Tabla 4:

Tabla 4: Ecuación de control PID.

$$X = K_p * e(t) + K_i \quad (8)$$

$$Y = e(t)dt + K_d \quad (9)$$

$$Z = \frac{\delta e(t)}{\delta t} \quad (10)$$

$$C(t) = X * \int Y * Z \quad (11)$$

Donde:

$c(t)$ = señal de entrada

$e(t)$ = señal de error

K_p, K_i, K_d = parámetros del controlador.

El controlador robusto debe satisfacer el desempeño mediante las perturbaciones que puedan ser causadas en el sistema.

Donde el control debe actuar de manera automática corrigiendo al instante la perturbación para si tener un sistema estable [31],[35].

Para el diseño del control robusto se debe tener en cuenta la siguiente condición: el sistema debe mantenerse operando con presencias de perturbaciones[31], [32].

Es decir, ante la ausencia de perturbaciones que estén en el sistema, el modelado no será capaz de usar la retroalimentación[32], [33].

Las características de un controlador PID son las siguientes:

A. Acción proporcional de un controlador PID.

La acción proporcional multiplica la señal de error por una constante K_p , siendo esta acción proporcional a la señal de error obteniendo las siguientes características [34],[35]:

- Mayor velocidad de respuesta en el sistema.
- Tiene un error menor de régimen permanente
- Incrementa considerablemente la inestabilidad del sistema.

B. Acción integral de un controlador PID.

La acción integral es la encargada de calcular la constante Ki que se multiplicara con la integral de la señal del error obteniendo las siguientes características [34]:

- Reduce el error en régimen permanente del sistema.
- Incrementa muy poco la velocidad del sistema.
- Incrementa considerablemente la inestabilidad del sistema.

C. Acción derivativa de un controlador PID.

La acción de control derivativa es la encargada de multiplicar la constante Kd por la derivada de la señal del error obteniendo las siguientes características [34]:

- Incrementa de gran consideración la estabilidad del sistema que se está controlando.
- Reduce un poco la velocidad de respuesta del sistema.
- El error permanecerá igual en régimen permanente.

3.8 Aplicación de control robusto H-infinity aplicado en la generación eólica.

El sistema de control de la generación eólica debe garantizar su velocidad del rotor para lograr una entrega de energía eficaz al sistema eléctrico [31][38].

Un control robusto H-infinity es más eficaz que los controladores PI el cual es muy utilizado para controlar los aerogeneradores[34],[38].

El H-infinity ayuda a mantener una velocidad considerable para garantizar una entrega de energía más limpia [31], [35].

3.8.1 Regulación de la frecuencia mediante Control H-infinity.

La importancia de un buen control es que ayuda a resolver varios inconvenientes eléctricos como la regulación de la frecuencia [31], [36].

Si la velocidad del rotor es muy elevada este ocasionara un mayor incremento de frecuencia; Si la velocidad del rotor es muy baja este causara una caída de frecuencia [34], [37].

El control H-infinity ayuda a mantener una velocidad ideal al rotor para que este no ocasione alta o baja frecuencia[34], [38].

4 Planteamiento del problema.

La implementación de la energía eólica en los sistemas eléctricos de potencia ha generado incertidumbres en la regulación de frecuencia.

Los controladores convencionales de un aerogenerador causan un pequeño desfase de frecuencia, obteniendo una velocidad de giro del rotor no deseada.

Al no tener un controlador ideal, estos generan potencias netas de aceleración en los generadores síncronos de la turbina, los cuales responderán la ecuación de oscilación.

Tabla 5: Ecuación de oscilación

$$\frac{2H}{W_s} \frac{d^2}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (12)$$

Donde el punto para operar es dado por δ_0 , al momento de una perturbación será expresada como ΔP_a , dando así un nuevo estado $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$, siendo expresada por la siguiente ecuación.

Tabla 6: Ecuación de oscilación mediante una perturbación.

$$\frac{2H}{W_s} \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} = \Delta P_a = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (13)$$

$$\left(\frac{2H}{W_s} \frac{d}{dt} \right) \frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta P_a = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (14)$$

Donde $p = \frac{d}{dt}$ y se establece un valor a por unidad $w_s = [p.u]$, obteniendo la transformada de la place en la siguiente ecuación:

Tabla 7: Ecuación de oscilación mediante la transformada de la place.

$$\Delta w_r(s) = \frac{\Delta P_m - \Delta P_e}{2HS} \quad (15)$$

Se presenta un sistema de compensación mediante el implemento de un controlador robusto mediante el método H-infinity Figura 5, este controlador regulara la velocidad del rotor obteniendo una mayor eficacia al momento de regular la frecuencia.

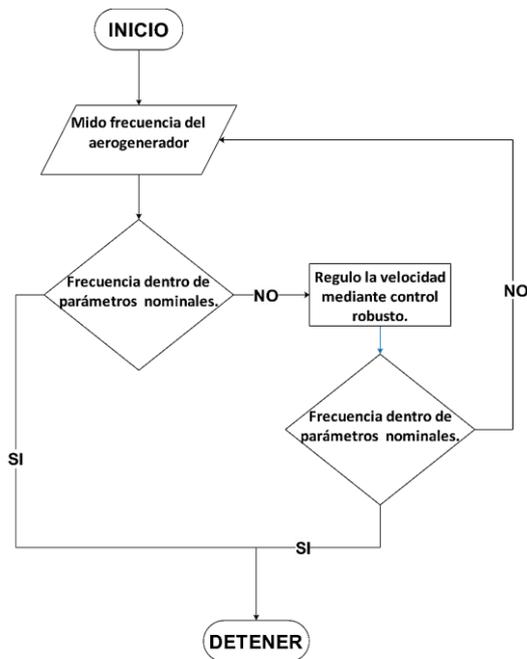


Figura 5: Pseudocódigo del proceso – Metodología a seguir en el proceso de control robusto.

4.1 Caso de estudio.

La modelación donde se implementará el caso de estudio de regulación de frecuencia de un modelo de control robusto mediante H-infinity en una turbina eólica dentro de sistema de 37 barras, el mismo que se a empleado para diferentes casos de investigación donde el escenario consta de un generador, una turbina eólica.

Se realizo a tomar las medidas mediante la simulación del sistema solamente dado con los parámetros de la IEEE dadas en Pest Test Feeder Figura 6, el sistema opera con una generación de voltaje de 4.8KV.

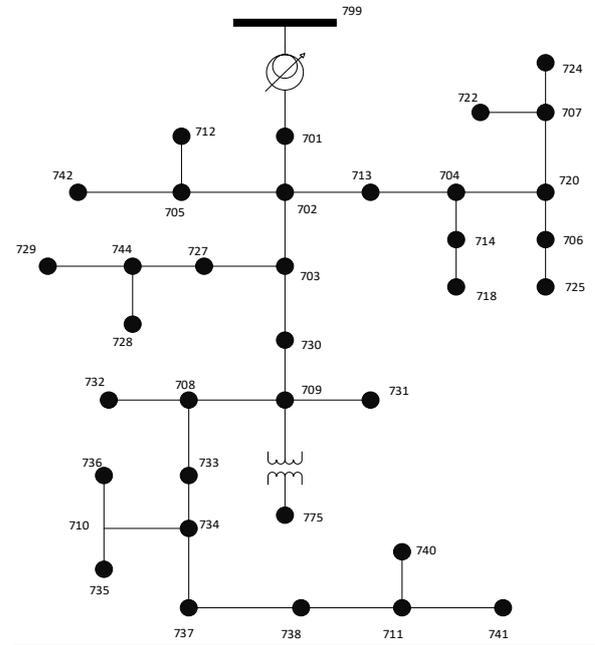


Figura 6: IEEE 37 Bus Pest Test Feeder.

La simulación esta implementada por el sistema inicial de 37 barras donde se remplazará un control ordinario PI por un control robusto H-infinity, afectando niveles de frecuencia, el sistema está conectado a su generador principal de 4.8 KV.

Donde los datos establecidos en el sistema se detallan a continuación:

Tabla 8: Datos del sistema IEEE 37 Bus Pest Test Feeder

Variable	Valor	Unidad
Frecuencia	50	Hz
Voltaje de la red	4.8	kV
Voltaje de la carga.	727	KW
Transformador	4.18/480	V
Fases	3	A, B, C
Factor de potencia	0.8961	fp

Una vez obtenida los datos de la IEEE dadas en Pest Test Feeder se realizó la programación del sistema en el programa en Matlab Simulink para realizar las respectivas investigaciones de como la variación de frecuencia puede afectar un sistema perjudicando a los usuarios finales.

β , ángulo de la pala [deg].

Este sistema de energía eólica de 2 MW con un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG). Los dominios físicos térmicos y mecánicos de PLECS también están integrados en el modelo expresado en la siguiente Figura 7.

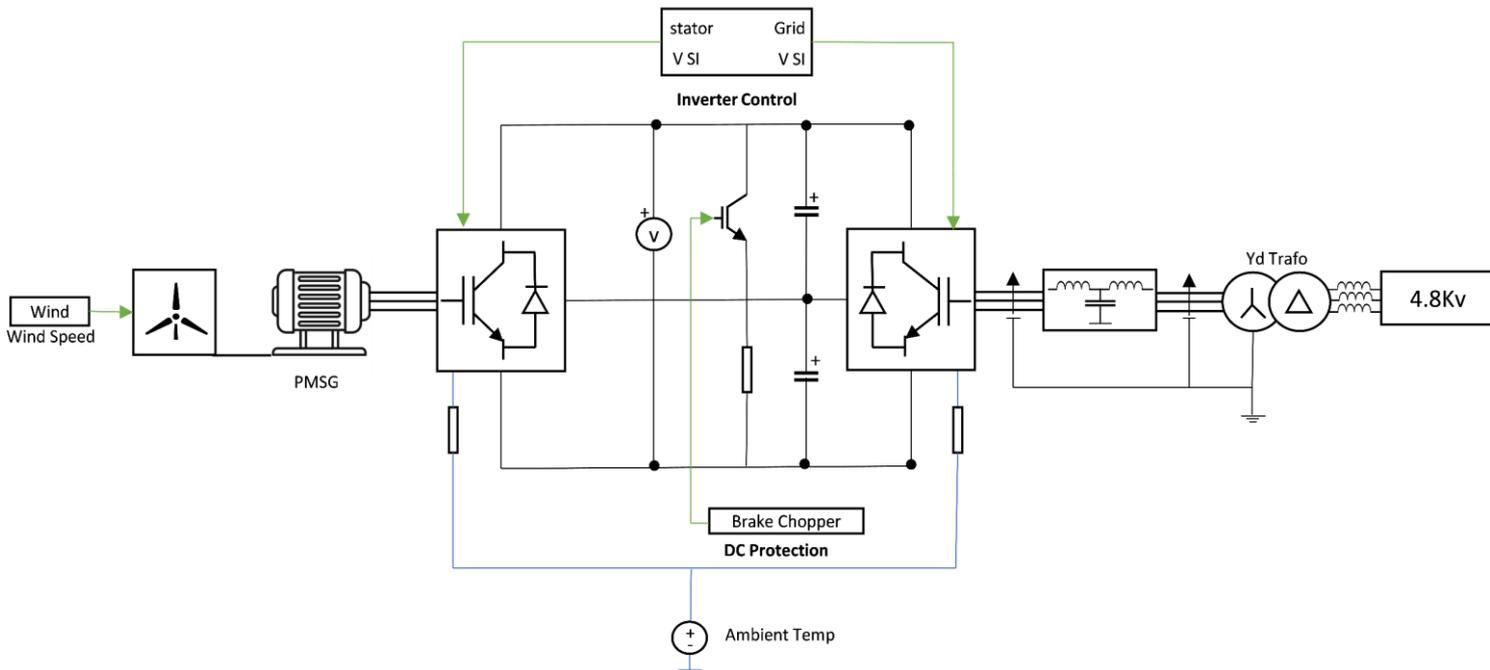


Figura 7: Modelado de la turbina eólica dada por Plecs.

4.2 Modelo de turbina eólica.

Para la simulación del sistema se basa en un Sistema de Energía Eólica con Imán Permanente Síncrono obtenido del programa Plecs. Donde el modelo matemático esta dado por la siguiente ecuación.

Tabla 9: Modelo matemático de turbina eólica.

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} v_{win}^3 \quad (16)$$

Donde:

P_m , está dada como la potencia mecánica de salida [W].

C_p , es el coeficiente de rendimiento de la turbina.

ρ , densidad del aire [kg/m³].

A , área de barrido [m²].

v_{win} , es la velocidad del viento [m/s].

λ , relación de velocidad de la punta de la pala del rotor y la velocidad del viento.

El sistema puede ser modificado con un viento constante o con un viento vareado este se verá representado en función del tiempo.

4.3 Circuito de potencia del Sistema de Energía Eólica.

El circuito de energía eléctrica viene dado por la librería del programa Plecs el cual consta de un generador síncrono de imanes permanentes PMSG con un número de pares de polos de 30.

El estator está conectado directamente a un convertidor espalda con espalda de punto neutro (NPC) de tres niveles, con el modelo de convertidor NPC.

El lado de la red del convertidor está conectado a un transformador elevador estrella-triángulo, que alimenta la energía generada a la red de media tensión de 4.8 kV.

4.4 Modelo de control de la turbina eólica.

Para el método de control de la turbina este constara de un El convertidor espalda a espalda (back to back) consta de partes separadas del lado de la máquina y del lado de la red, que están conectadas entre sí a través de dos condensadores de enlace de corriente continua con una conexión de punto medio.

El convertidor del lado de la máquina regula el par del PMSG y la velocidad de rotación con una estructura de doble lazo, donde el lazo de velocidad externo genera la señal de referencia para el lazo de corriente interno.

El control de corriente se lleva a cabo en un marco de referencia giratorio con orientación del flujo del estator. El convertidor del lado de la red transfiere la potencia activa del convertidor del lado de la máquina a la red a través de un filtro LCL y mantiene el voltaje del enlace de corriente continua a 1500 V. Los métodos de amortiguación activa, alimentación directa y anti-windup del integrador se adoptan para el nuevo controlador PID.

4.5 Modelo mecánico de la turbina eólica.

El rotor de la máquina está conectado directamente al cubo y las palas de la hélice sin caja de cambios, que en conjunto forman la parte mecánica del aerogenerador, como se muestra en la Figura 8.

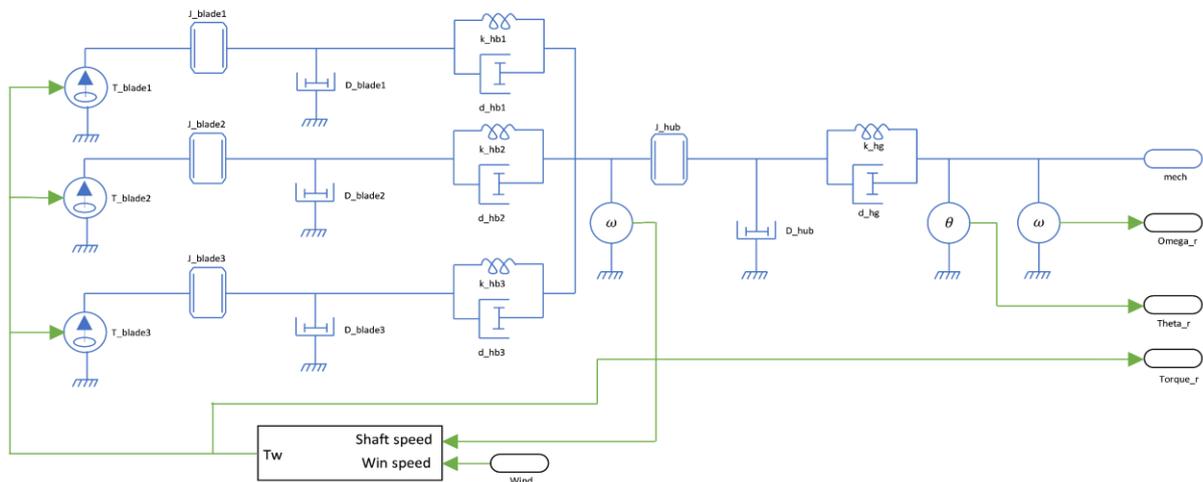


Figura 8: Modelo de eje mecánico de la turbina eólica, incluida la conversión de velocidad del viento/eje en par.

Estos conjuntos están acoplados elásticamente entre sí, lo que introduce oscilaciones resonantes en el sistema.

El valor del par de viento aplicado en las palas de la turbina proviene de una tabla de consulta, donde el valor varía con las velocidades de rotación del eje y del viento donde será el generador síncrono el cual permitirá la conversión de energía mecánica a eléctrica.

Donde el modelo matemático está basado en el torque de aceleración donde es el producto de inercia del rotor siendo expresado las variables en la siguiente tabla:

Tabla 10: Variables del generador síncrono.

J	Momento de inercia
θ_m	Desplazamiento angular
T_m	Torque mecánico
T_e	Torque Eléctrico
T_a	Torque de aceleración
m	Masa del cuerpo
R	Radio del cuerpo
θ_m	Posición angular
ω_{sm}	Velocidad sincrónica
δ_m	Desplazamiento angular
P_m	Potencia mecánica
P_e	Potencia eléctrica
P_a	Potencia de aceleración

No existirá un torque de aceleración (T_a) cuando el generador este estable ya que el torque mecánico (T_m) y el torque eléctrico (T_e) serán iguales.

Donde el termino en generales el momento de inercia se representará como una oposición de un cuerpo en movimiento rotativo siendo representado en la siguiente Tabla 11.

Tabla 11: Modelo matemático de un generador síncrono.

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (17)$$

$$J = \frac{1}{2} m R^2 \quad (18)$$

Para el análisis de la estabilidad angular se busca el Angulo de potencia ante la ecuación de oscilación donde se define θ_m y derivando con respecto a la ecuación anterior.

Tabla 12: Análisis de la estabilidad angular ante la ecuación de oscilación.

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (19)$$

$$\frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} \quad (20)$$

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (21)$$

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (22)$$

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (23)$$

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (24)$$

Donde $J \omega_m$ está dado como el momento angular de inercia dando como constante H siendo la constante de tiempo de la máquina, expresado en la Tabla 13.

Tabla 13: Constante de tiempo de la máquina.

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_B} \quad (25)$$

4.6 Modelado de control robusta para regular la velocidad de la turbina eólica.

La implementación del control robusto ofrece una variedad de herramientas para realizar un diseño de control.

Como primer paso se procede a obtener las matrices de la turbina eólica de Plecs, para esto se utilizó la turbina dentro del programa Matlab para obtener sus matrices mediante el bloque State Space como se muestra en la Figura 9.

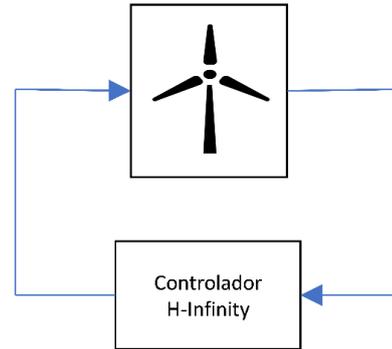


Figura 9: control robusto aplicado a la generación eólica de la librería Plecs.

Una obtenidas las matrices se procedió a cambiar a un espacio de estados para proceder a realizar la función de transferencia y así poder obtener nuestro control robusto mediante el proceso de H-infinity.

El control robusto ayuda a mantener una velocidad de giro del rotor ideal para así evitar un exceso de aceleración o por el contrario una disminución de aceleración para evitar la variación de frecuencia.

5 Análisis de resultados

Para el análisis se desarrolló una simulación para regular la frecuencia mediante la realización de 2 escenarios en Simulink donde se pondrá a prueba un control PI ante un control robusto, el cual podremos ejecutar el análisis correspondiente con respecto al control robusto de una turbina eólica.

El análisis de resultados se observará mediante las gráficas obtenidas en simulación.

Se inicio a tomar las medidas mediante la simulación del sistema solamente dado con los parámetros de la IEEE encontradas en Pest Test Feeder Figura 6.

El análisis del sistema se realizó en la barra 731 donde se implementa el modelo de control H-infinity como se muestra en Figura 10.

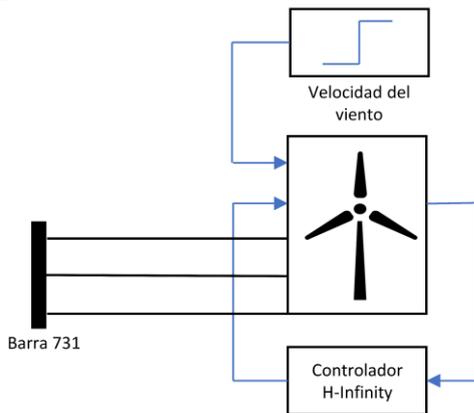


Figura 10: Implementación de aerogenerador con control robusto en la barra 731.

La implementación del control robusto se encargará de analizar la velocidad de giro del rotor, estableciendo una velocidad adecuada para regular la frecuencia.

5.1 Respuesta de control robusto ante una perturbación.

Para comprobar el funcionamiento del controlador se procedió a configurar un sistema donde tenga una señal de entrada que se efectuar en los 60 segundos junto a un modelo de planta que simular los datos de un aerogenerador.

El modelo consta de un control de retroalimentación clásico de circuito cerrado por lo que se encontrara la función de transferencia del controlador, obteniendo las matrices del sistema en un espacio estado.

La estabilidad de la planta depende de la función de transferencia, porque ayuda a calcular la estabilidad, rendimiento y robustes del controlador siendo expresado las funciones de ponderación en la siguiente Tabla 14.

Tabla 14: Función de transferencia aplicada a control robusto.

$W_s = \frac{400s + 1000}{s + 0.00015}$	(26)
$W_t = \frac{s + 0.00001}{s + 10}$	(27)

Siendo W_s la función de sensibilidad y W_t la función de sensibilidad complementaria para el controlador.

Una vez diseñado el controlador se procedió a conectar una planta, una señal de entrada que actuara a los 60 segundos y una carga no lineal que actuara a los 120 segundos, siendo el controlador un sistema retroalimentado como se muestra en la Figura 11.

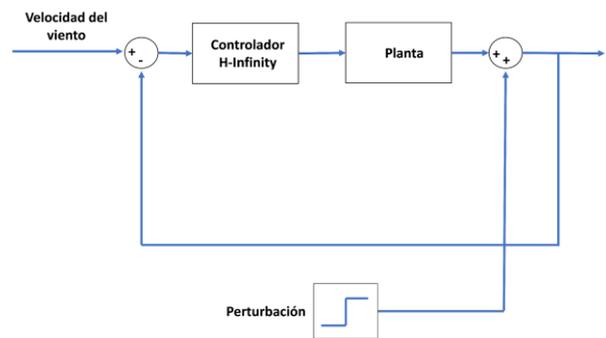


Figura 11: Modelado de control robusto retroalimentado ante una perturbación.

Una vez que exista una perturbación nuestro controlador actuara en el tiempo de 120 segundos para estabilizar el sistema del aerogenerador como se muestra en la Figura 12.

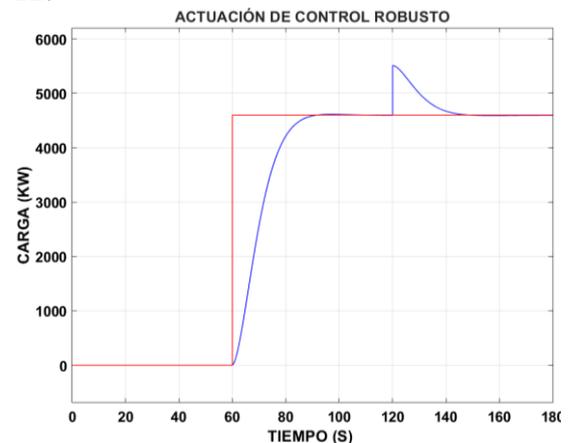


Figura 12: Actuación de control robusto ante una perturbación.

Se muestra en la Figura 12 que el controlador H-infinity está actuando de manera correcta donde se observa que en los 60 segundos la señal de entrada comienza a actuar correctamente, pero se analiza que en los 180 segundos existe una perturbación en donde, el controlador empieza a actuar regulándola correctamente hasta obtener el mismo valor de la señal de entrada.

5.2 Mejora de los niveles de frecuencia de una turbina eólica.

Un mal control de velocidad del rotor de un aerogenerador puede ocasionar diferentes niveles de frecuencia, desestabilizando el sistema eléctrico.

El sistema eólico está controlado por medio de un sistema de control PI y se intentará evaluar los niveles de frecuencia y así se comparará ante la implementación de un nuevo control robusto.

5.2.1 Niveles de frecuencia de ante un controlador PI.

Se procede a analizar los niveles de frecuencia mediante el control PI que viene por defecto el aerogenerador de la librería Plecs.

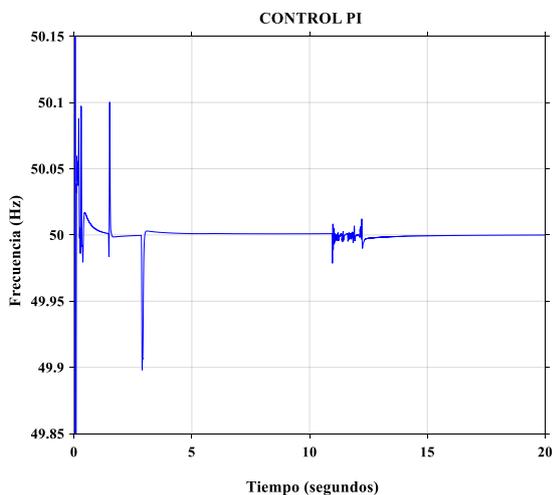


Figura 13: Niveles de frecuencia con un control PI.

Se puede observar en la Figura 13 que hay picos de frecuencia alta que excede el 50.1 Hz y una frecuencia baja de 49.9 Hz, estos picos son causados por la variación del viento que puede tanto aumentar o reducir la velocidad del rotor del sistema eólico.

5.2.2 Niveles de frecuencia de ante un controlador H-infinity.

Una vez diseñado el control robusto con el método H-infinity se procedió a realizar el análisis de frecuencia respectivo al aerogenerador.

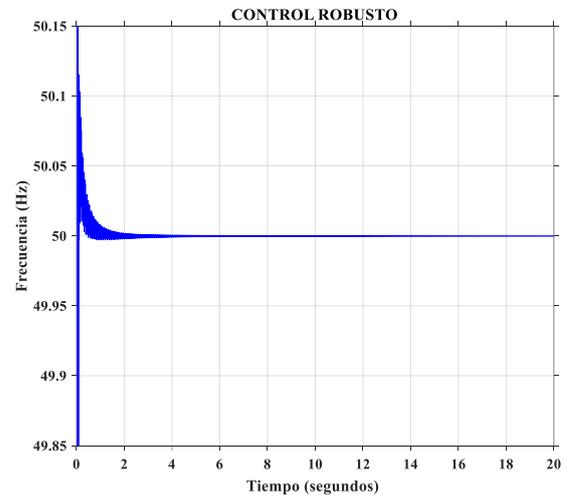


Figura 14: Niveles de frecuencia con un Control Robusto.

Se puede observar en la Figura 14 que un control robusto es más eficiente en la generación eólica, ya que este nivel eficientemente la frecuencia manteniéndola por debajo de los 49.99997 Hz.

5.3 Casos críticos obtenidos en frecuencia.

Al momento de que se presente un modelo de control no óptimo en el sistema la frecuencia va a variar, en donde se medirán los valores de frecuencia en sus estados críticos que se presenten en la simulación.

Una vez obtenidos los casos críticos estos se compararán con la actuación del controlador, obteniendo sus valores resultantes dentro de los límites establecidos.

5.3.1 Valores críticos obtenidos con el controlador PI.

Una vez terminada la simulación se procedió a analizar los valores críticos de frecuencia en donde se puede observar en la siguiente Tabla 15.

Tabla 15: Niveles de frecuencia críticos con control PI.

Tiempo (s)	Frecuencia (Hz)
1	50.01
1.5	49.91
11	49.98
12.5	50.013

Como se puede observar se presentan los casos crítico en donde el caso más representativo tiene un valor de 50.1 Hz, mientras que el valor mínimo es de 49.98 Hz siendo estos casos críticos representados en la siguiente Figura 15.

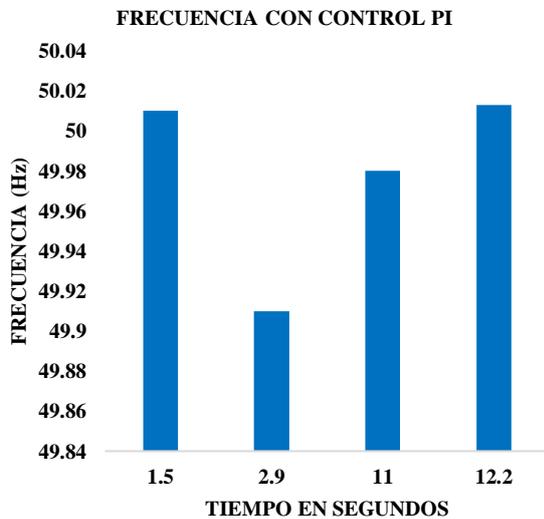


Figura 15: Niveles de frecuencia críticos con control PI.

5.3.2 Valores críticos obtenidos con el control robusto.

Se procedió a remplazar el control PI por el control robusto diseñado, obteniendo casos críticos demasiados imperceptibles como se observa en la Figura 14, se procederá a analizar los valores críticos de frecuencia obteniendo como resultados la siguiente Tabla 16.

Tabla 16: Niveles de frecuencia críticos con control robusto.

Tiempo (s)	Frecuencia (Hz)
1	50.004
1.5	50.005
11	49.99997
12.5	49.99983

Como se puede observar en la Tabla 16, se puede observar que la frecuencia a

disminuido considerablemente a un valor muy diminuto, donde el valor crítico de la frecuencia es de 49.99997 Hz siendo estos los casos críticos representados en la siguiente Figura 16.

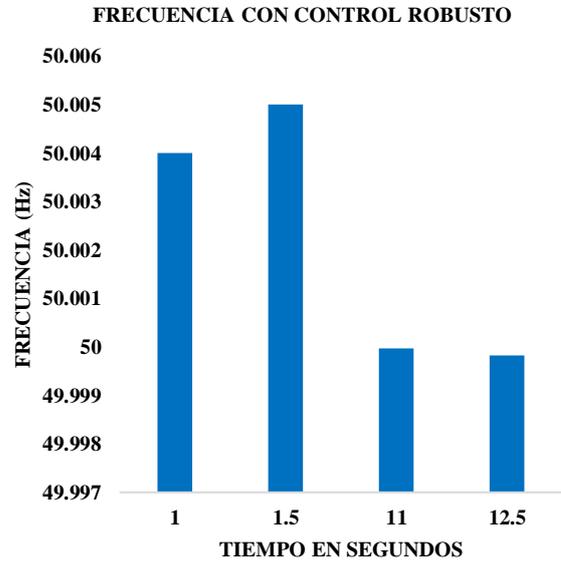


Figura 16: Niveles de frecuencia críticos con control robusto.

El control robusto es muy eficiente para el control de una turbina eólica, este ayuda a regular la velocidad del giro del rotor aumentado así los niveles de eficiencia de la frecuencia.

5.4 Resumen de resultados.

Se realiza un resumen de los resultados más relevantes de nuestra simulación en donde se plantea regular la frecuencia mediante un modelo de control H-infinity en un sistema de 37 barras.

Para la simulación de este programa se toma en cuenta la regulación de frecuencia en donde el encargado de actuar es un modelo H-infinity el cual se encargará de regular la frecuencia por medio de la regulación de velocidad del rotor.

Tabla 17: Comparación de los niveles de frecuencia del control robusto vs el control PI.

PI(Hz)	CONTROL ROBUSTO(Hz)
50.01	50.004
49.91	50.005
49.98	49.99997
50.013	49.99983

Se procedió a realizar una comparación grafica de los niveles de frecuencia del Control Robusto vs el control PI representada en la siguiente Figura 17.

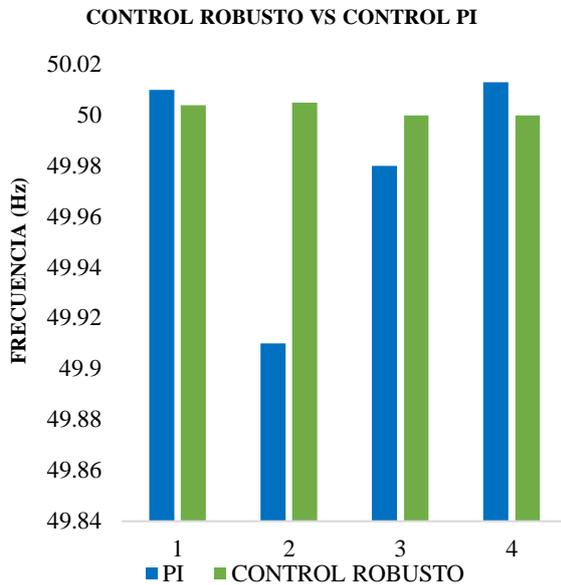


Figura 17: Comparación de los niveles de frecuencia del control robusto vs el control PI.

Se observa que el control robusto ayuda a obtener un valor muy aproximando al valor ideal, siendo un sistema estable para el sistema eléctrico.

6 Conclusiones.

Con la finalización de este análisis junto a la correcta aplicación de simulaciones se pudo ponderar los siguientes resultados:

Se mejoro la estabilidad de frecuencia en del sistema de generación eólico, simulando el modelo de control robusto de H-infinity, donde se analizó la estabilidad de todos los casos de estudios dando como resultado un valor estable del 99.9% obteniendo un sistema confiable y seguro siendo como máximo valor critico un 50.004 Hz.

Si la frecuencia varia un 1.5 Hz podría causar un desacoplamiento del sistema ya que genera una desincronización siendo perjudicial para los usuarios que se encuentren conectados a la red por ende se debe mantener un sistema estable mediante el correcto control de un aerogenerador manteniendo la frecuencia dentro de los parámetros estables que son 50 Hz.

Al conectar un aerogenerador al sistema eléctrico este deberá tener el mismo nivel de frecuencia al que trabaja el sistema eléctrico (50Hz/60Hz), la implementación de un control robusto ayudará a mantener la frecuencia dentro de los parámetros nominales requeridos por el sistema eléctrico.

6.1 Trabajos futuros.

Diseñar un sistema de filtros que aporten con la disminución de armónicos existentes en el sistema eléctrico de potencia que esté conectado mediante la hidráulica.

Desarrollar nuevos métodos de estabilización de frecuencia mediante un aerogenerador que esté conectado a una carga de 10 kV.

7 Referencias.

- [1] A. Subhana and Nahid-Al-Masood, 'Estimation of Frequency Stability Considering Load Levels and Load Frequency Relief', in *Proceedings of 2020 IEEE International Women in Engineering (WIE) Conference on Electrical and Computer Engineering, WIECON-ECE 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020, pp. 448–451. doi: 10.1109/WIECON-ECE52138.2020.9397973.
- [2] A. Aziz, A. T. Oo, and A. Stojcevski, 'Analysis of frequency sensitive wind plant penetration effect on load frequency control of hybrid power system', *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 99, no. November 2017, pp. 603–617, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.01.045.
- [3] A. V. P. Kumar, A. M. Parimi, and K. U. Rao, 'A comparative analysis of Load Frequency Control Strategy of a Voltage Source Inverter for a stand-alone PV-Wind hybrid system', *2016 IEEE 6th*

- International Conference on Power Systems, ICPS 2016*, 2016, doi: 10.1109/ICPES.2016.7584130.
- [4] G. Ravindra, CH Chengaiah, A. Yuva Kishore, SKR Engineering College, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Madras Section, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics & Soft Computing (ICECDS) - 2017 : 1st & 2nd August 2017*.
- [5] I. Petras and J. Kacur, *Proceedings of the 2020 21st International Carpathian Control Conference (ICCC) : virtual conference, Košice, Slovak Republic, October 27-29, 2020*. 2020.
- [6] Xinyan Zhang, Weiqing Wang, and Feng li, *2012 12th International Conference on Control Automation Robotics and Vision*. 2012.
- [7] G. Suriya Priya and M. Geethanjali, ‘Design and Development of Distance Protection Scheme for Wind Power Distributed Generation’, *2018 National Power Engineering Conference, NPEC 2018*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/NPEC.2018.8476720.
- [8] Hadi Suyono, Mahfudz Shidiq, Alfian Nur Ferdianzah, Teguh Utomo, Ismail Musirin, and Lilik J. Awal, *Dynamic Stability Impact of the Hybrid Wind and Microhydro Renewable Energy Sources on the Distribution System*.
- [9] A. Shahid, ‘Performance evaluation of sinusoidal and Space Vector Pulse-Width-Modulation for power quality enhancement in distributed generation systems’, *2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2015*, vol. 00, no. c, 2015, doi: 10.1109/PEDG.2015.7223066.
- [10] G. Chen, F. L. Lewis, E. N. Feng, and Y. Song, ‘Distributed Optimal Active Power Control of Multiple Generation Systems’, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 11, pp. 7079–7090, 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2431631.
- [11] S. Roga, S. Bardhan, Y. Kumar, and S. K. Dubey, ‘Recent technology and challenges of wind energy generation: A review’, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102239, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.SETA.2022.102239.
- [12] S. Xuewei *et al.*, ‘Research on Energy Storage Configuration Method Based on Wind and Solar Volatility; Research on Energy Storage Configuration Method Based on Wind and Solar Volatility’, *2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES)*, 2020, doi: 10.1109/ICPES51309.2020.9349645/20/\$31.00.
- [13] Z. Yuan *et al.*, ‘Capacity planning of wind generation units in multi-wind-generation DC-connected system based on cooperative game’, *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1601–1609, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.02.062.
- [14] Z. Guo, Z. Pu, W. Du, H. Wang, and C. Li, ‘Improved adversarial learning for fault feature generation of wind turbine gearbox’, *Renew Energy*, vol. 185, pp. 255–266, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2021.12.054.
- [15] Q. Li *et al.*, ‘Prediction of power generation of two 30 kW Horizontal Axis Wind Turbines with Gaussian model’, *Energy*, vol. 231, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121075.
- [16] Z. J. Lin, H. Chen, and X. Yin, ‘Discussion on “data-Driven Stochastic Unit Commitment for

- Integrating Wind Generation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 5, p. 3983, 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2932510.
- [17] P. J. dos Santos Neto, A. C. Pinto, and E. Ruppert Filho, ‘A Proposal to Control Active and Reactive Power in Distributed Generation Systems Using Small Wind Turbines; A Proposal to Control Active and Reactive Power in Distributed Generation Systems Using Small Wind Turbines’, 2020.
- [18] H. Parastvand, A. Modirrousta, M. J. Khosrowjerdi, and V. Cheraghi, ‘Robust PID synthesis for load frequency control’, in *22nd Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE 2014*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2014, pp. 1284–1289. doi: 10.1109/IranianCEE.2014.6999732.
- [19] Eslam M. Wazeer, Rasha El-Azab, Mohamed Daowd, and A. M. Abdel Ghany, *Short-term frequency stability regulation for power system with large-scale wind energy penetration using PID controller*. 2018.
- [20] M. M. Ozyetkin, ‘An approximation method and PID controller tuning for systems having integer order and non-integer order delay’, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 12, pp. 11365–11375, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.aej.2022.05.015.
- [21] A. K. Naik, N. K. Jena, S. Sahoo, and B. K. Sahu, ‘Frequency Stability Study in Electrical Power System with SMES and TCSC units’, in *2021 International Conference in Advances in Power, Signal, and Information Technology, APSIT 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/APSIT52773.2021.9641170.
- [22] F. Sevilmi and H. Karaca, ‘An experimental study of grid tied inverter for renewable energy systems’, *2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, SEST 2018 - Proceedings*, 2018, doi: 10.1109/SEST.2018.8495826.
- [23] A. Kannan, M. Nuschke, and D. Strauß-mincu, ‘LFC model for frequency stability analysis of prospective power systems with high shares of inverter based generation’, 2019.
- [24] A. Kannan, W. Heckmann, D. Strauß-Mincu, A. Kannan, W. Heckmann, and D. Strauss-Mincu, ‘Renewable integration and primary control reserve demand in the Indian power system Renewable integration and primary control reserve demand in the Indian power system Renewable integration and primary control reserve demand in the Indian power system’, 2017. [Online]. Available: www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de
- [25] Y. Xie, C. Li, H. Zhang, H. Sun, and V. Terzija, ‘Long-Term Frequency Stability Assessment Based on Extended Frequency Response Model’, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 122444–122455, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3006239.
- [26] L. Casasola-Aignesberger and S. Martinez, ‘Electric vehicle recharge strategies for frequency control in electrical power systems with high wind power generation; Electric vehicle recharge strategies for frequency control in electrical power systems with high wind power generation’, 2020, doi: 10.13039/501100011033.
- [27] M. Marzband, M. M. Moghaddam, M. F. Akorede, and G. Khomeyrani,

- ‘Adaptive load shedding scheme for frequency stability enhancement in microgrids’, *Electric Power Systems Research*, vol. 140, pp. 78–86, 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2016.06.037.
- [28] J. Boyle, T. Littler, and A. Foley, ‘Review of frequency stability services for grid balancing with wind generation; Review of frequency stability services for grid balancing with wind generation’, *J. Eng*, vol. 15, pp. 1061–1065, 2018, doi: 10.1049/joe.2018.0276.
- [29] Y. Liao, Z. Liu, H. Zhang, and B. Wen, ‘Low-Frequency Stability Analysis of Single-Phase System with dq-Frame Impedance Approach - Part II: Stability and Frequency Analysis’, *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 54, no. 5, pp. 5012–5024, Sep. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2828386.
- [30] B. Vedik, R. Kumar, R. Deshmukh, S. Verma, and C. K. Shiva, ‘Renewable Energy-Based Load Frequency Stabilization of Interconnected Power Systems Using Quasi-Oppositional Dragonfly Algorithm’, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 227–243, 2021, doi: 10.1007/s40313-020-00643-3.
- [31] J. Ramírez, L. Ortiz, and A. Aguila, ‘PASSIVE CONTROL TOLERANT TO SENSING FAULTS IN DYNAMIC COMPENSATION DEVICES - SVC THROUGH A HYBRID STRATEGY’, *Ingenius*, vol. 2022, no. 28, pp. 34–43, Jul. 2022, doi: 10.17163/ings.n28.2022.03.
- [32] L. Ortiz, J. W. González, L. B. Gutierrez, and O. Llanes-Santiago, ‘A review on control and fault-tolerant control systems of AC/DC microgrids’, *Heliyon*, vol. 6, no. 8. Elsevier Ltd, Aug. 01, 2020. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04799.
- [33] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Águila, J. W. González, G. J. López, and I. Isaac, ‘Hybrid AC/DC microgrid test system simulation: grid-connected mode’, *Heliyon*, vol. 5, no. 12, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02862.
- [34] F. A. Inthamoussou, ‘Nociones de control robusto’, 2011.
- [35] L. Ortiz, L. B. Gutiérrez, J. W. González, and A. Águila, ‘A novel strategy for dynamic identification in AC/DC microgrids based on ARX and Petri Nets’, *Heliyon*, vol. 6, no. 3, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03559.
- [36] L. Hurtado Cortés and L. Villarreal López, ‘CONTROL ROBUSTO DE UN SISTEMA MECÁNICO SIMPLE MEDIANTE UNA HERRAMIENTA GRAFICA ROBUST CONTROL OF A SIMPLE MECHANICAL SYSTEM THROUGH A GRAFIC TOOL’, 2008.
- [37] C. G. Bolivar Vincenty, K. Z. R. Medina, and G. Beauchamp Baez, ‘Control Robusto del Sistema de Bola y Viga’.
- [38] Buestán Vera, Jean Carlos, Ortiz Leony, and Aguila Telelz Alexander, ‘Esta obra está bajo una licencia Creative Commons de tipo Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) Control Tolerante a Fallos Multi-Objetivo para BESS acoplados a Micro-redes aisladas basado en IMC y H_∞ Multi-Objective Fault Tolerant Control for BESS coupled to isolated Micro-grids based on IMC and H_∞ ’, vol. 15, no. 5, pp. 41–56, 2022, [Online]. Available: <http://publicaciones.uci.cu>
- [39] Chongchong Mao, Yetao Zhu, and Zhu’an Li, *Design of LC bandpass filters based on siliconbased IPD Technology Shanghai, China*. 2018.

- [40] S. Serrano-Vincenti, T. Condom, L. Campozano, J. Guamán, and M. Villacís, ‘An Empirical Model for Rainfall Maximums Conditioned to Tropospheric Water Vapor Over the Eastern Pacific Ocean’, *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 8, Jul. 2020, doi: 10.3389/feart.2020.00198.
- [41] E. Del *et al.*, ‘Estimation of Energy Payback Time Applied In Hydrogen Production For Electricity Generation Purposes’, 2022.
- [42] C. Cristóbal, C. Cuji, and H. David Sisa, ‘Evaluación del consumo de energía eléctrica de acuerdo a la arquitectura bioclimático mediante el Modelo ASHRAE y Gauss T-Student Evaluation of electricity consumption according to the bioclimatic architecture using the ASHRAE Model and Gauss T-Student’, 2018. [Online]. Available: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>
- [43] C. Cuji and R. O. Galarza Zambrano, ‘Gestión Óptima De La Energía En Un Proceso Paulatino Y Controlado Para Contribuir A La Descarbonización Del Sector Eléctrico’, *Revista Técnica ‘energía’*, vol. 19, no. 1, pp. 71–84, Jul. 2022, doi: 10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.518.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 18: Matriz de estado del arte.

MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD DE FRECUENCIA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE INVERSORES APLICANDO CONTROL ROBUSTO																							
ITEM	DATOS			TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación distribuida por medio de la generación eólica.	Control Robusto aplicados a modelos de regulación de frecuencia	Inversores aplicados a la generación eólica mediante un control robusto.	Afectaciones de la variación de frecuencia en la estabilidad del sistema	Estabilidad de la frecuencia	Técnicas para la estabilización de la frecuencia	Control robusto aplicado a la generación eléctrica	Aplicación de control robusto H-infinity aplicado en la generación eólica.	FUNCIONES OBJETIVO			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
												Frecuencia desfasada	Nivel de voltaje	Cargas no lineales	Nivel de Tensión	Niveles de frecuencia	Oscilaciones del control	controladores	simulaciones	Regulaciones de frecuencia	Modelo eólico	Inversores	Control robusto
1	2020	Estimation of Frequency Stability Considering Load Levels and Load Frequency Relief	2	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>																
2	2017	Analysis of frequency sensitive wind plant penetration effect on load frequency control of hybrid power system	7	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
3	2016	A comparative analysis of Load Frequency Control Strategy of a Voltage Source Inverter for a stand-alone PV-Wind hybrid system	5	<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>		

MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD DE FRECUENCIA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE INVERSORES APLICANDO CONTROL ROBUSTO

ITEM	DATOS			TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación distribuida por medio de la generación eólica.	Control Robusto aplicados a modelos de regulación de frecuencia	Inversores aplicados a la generación eólica mediante un control robusto.	Afectaciones de la variación de frecuencia en la estabilidad del sistema	Estabilidad de la frecuencia	Técnicas para la estabilización de la frecuencia	Control robusto aplicado a la generación eléctrica	Aplicación de control robusto H-infinity aplicado en la generación eólica.	FUNCIONES OBJETIVO			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
												Frecuencia desfasada	Nivel de voltaje	Cargas no lineales	Nivel de Tensión	Niveles de frecuencia	Oscilaciones del control	controladores	simulaciones	Regulaciones de frecuencia	Modelo eólico	Inversores	Control robusto
4	2021	Ultra-wide stopband HTS LPF with closed-loop cross-coupled microstrip structure	6	<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>					
5	2017	Low Pass Filter Design With Artificial Ground Structure	7	<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>
6	2018	Design and Development of Distance Protection Scheme for Wind Power Distributed Generation	2		<input checked="" type="checkbox"/>							<input checked="" type="checkbox"/>											
7	2019	Dynamic Stability Impact of the Hybrid Wind and Micro hydro Renewable Energy Sources on the Distribution System.	4		<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
8	2015	Distributed Optimal Active Power Control of Multiple Generation Systems	5		<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			

MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD DE FRECUENCIA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE INVERSORES APLICANDO CONTROL ROBUSTO																							
ITEM	DATOS			TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación distribuida por medio de la generación eólica.	Control Robusto aplicados a modelos de regulación de frecuencia	Inversores aplicados a la generación eólica mediante un control robusto.	Afectaciones de la variación de frecuencia en la estabilidad del sistema	Estabilidad de la frecuencia	Técnicas para la estabilización de la frecuencia	Control robusto aplicado a la generación eléctrica	Aplicación de control robusto H-infinity aplicado en la generación eólica.	FUNCIONES OBJETIVO			Nivel de Tensión	Niveles de frecuencia	Oscilaciones del control	RESOLVER EL PROBLEMA			Modelo eólico	Inversores	Control robusto
												Frecuencia desfasada	Nivel de voltaje	Cargas no lineales				controladores	simulaciones	Regulaciones de frecuencia			
9	2015	Recent technology and challenges of wind energy generation: A review	8		<input checked="" type="checkbox"/>							<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	2022	Research on Energy Storage Configuration Method Based on Wind and Solar Volatility; Research on Energy Storage Configuration Method Based on Wind and Solar Volatility	4		<input checked="" type="checkbox"/>							<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>							<input checked="" type="checkbox"/>		
11	2020	Capacity planning of wind generation units in multi-wind-generation DC-connected system based on cooperative game	5		<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	

MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD DE FRECUENCIA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE INVERSORES APLICANDO CONTROL ROBUSTO																							
ITEM	DATOS			TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación distribuida por medio de la generación eólica.	Control Robusto aplicados a modelos de regulación de frecuencia	Inversores aplicados a la generación eólica mediante un control robusto.	Afectaciones de la variación de frecuencia en la estabilidad del sistema	Estabilidad de la frecuencia	Técnicas para la estabilización de la frecuencia	Control robusto aplicado a la generación eléctrica	Aplicación de control robusto H-infinity aplicado en la generación eólica.	FUNCIONES OBJETIVO			Nivel de Tensión	Niveles de frecuencia	Oscilaciones del control	RESOLVER EL PROBLEMA			Modelo eólico	Inversores	Control robusto
												Frecuencia desfasada	Nivel de voltaje	Cargas no lineales				controladores	simulaciones	Regulaciones de frecuencia			
12	2022	Improved adversarial learning for fault feature generation of wind turbine gearbox	3		<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>										
13	2022	Prediction of power generation of two 30 kW Horizontal Axis Wind Turbines with Gaussian model	3		<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>										
14	2021	Discussion on 'data-Driven Stochastic Unit Commitment for Integrating Wind Generation	2		<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>										

MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD DE FRECUENCIA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE INVERSORES APLICANDO CONTROL ROBUSTO																								
ITEM	DATOS			TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación distribuida por medio de la generación eólica.	Control Robusto aplicados a modelos de regulación de frecuencia	Inversores aplicados a la generación eólica mediante un control robusto.	Afectaciones de la variación de frecuencia en la estabilidad del sistema	Estabilidad de la frecuencia	Técnicas para la estabilización de la frecuencia	Control robusto aplicado a la generación eléctrica	Aplicación de control robusto H-infinity aplicado en la generación eólica.	FUNCIONES OBJETIVO			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			RESOLVER EL PROBLEMA			PROPUESTA			
												Frecuencia desfasada	Nivel de voltaje	Cargas no lineales	Nivel de Tensión	Niveles de frecuencia	Oscilaciones del control	controladores	simulaciones	Regulaciones de frecuencia	Modelo eólico	Inversores	Control robusto	
18	2018	An approximation method and PID controller tuning for systems having integer order and non-integer order delay	5			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>									
19	2022	Frequency Stability Study in Electrical Power System with SMES and TCSC units	6			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>							
20	2021	An experimental study of grid tied inverter for renewable energy systems	4			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>												
21	2018	LFC model for frequency stability analysis of prospective power systems with high shares of inverter-based generation	6			<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>				

MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD DE FRECUENCIA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE INVERSORES APLICANDO CONTROL ROBUSTO																							
ITEM	DATOS			TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación distribuida por medio de la generación eólica.	Control Robusto aplicados a modelos de regulación de frecuencia	Inversores aplicados a la generación eólica mediante un control robusto.	Afectaciones de la variación de frecuencia en la estabilidad del sistema	Estabilidad de la frecuencia	Técnicas para la estabilización de la frecuencia	Control robusto aplicado a la generación eléctrica	Aplicación de control robusto H-infinity aplicado en la generación eólica.	FUNCIONES OBJETIVO			Nivel de Tensión	Niveles de frecuencia	Oscilaciones del control	controladores	simulaciones	Regulaciones de frecuencia	Modelo eólico	Inversores	Control robusto
												Frecuencia desfasada	Nivel de voltaje	Cargas no lineales									
24	2018	Long-Term Frequency Stability Assessment Based on Extended Frequency Response Model	7				<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	
25	2020	Electric vehicle recharge strategies for frequency control in electrical power systems with high wind power generation; Electric vehicle recharge strategies for frequency control in electrical power systems with high wind power generation	3				<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>				

MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD DE FRECUENCIA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE INVERSORES APLICANDO CONTROL ROBUSTO

ITEM	DATOS			TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Generación distribuida por medio de la generación eólica.	Control Robusto aplicados a modelos de regulación de frecuencia	Inversores aplicados a la generación eólica mediante un control robusto.	Afectaciones de la variación de frecuencia en la estabilidad del sistema	Estabilidad de la frecuencia	Técnicas para la estabilización de la frecuencia	Control robusto aplicado a la generación eléctrica	Aplicación de control robusto H-infinity aplicado en la generación eólica.	FUNCIONES OBJETIVO			Nivel de Tensión	Niveles de frecuencia	Oscilaciones del control	RESOLVER EL PROBLEMA			Modelo eólico	Inversores	Control robusto
												Frecuencia desfasada	Nivel de voltaje	Cargas no lineales				controladores	simulaciones	Regulaciones de frecuencia			
26	2020	Adaptive load shedding scheme for frequency stability enhancement in microgrids	3					<input checked="" type="checkbox"/>											<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>
27	2016	Review of frequency stability services for grid balancing with wind generation; Review of frequency stability services for grid balancing with wind generation	2					<input checked="" type="checkbox"/>											<input checked="" type="checkbox"/>				
28	2018	Review of frequency stability services for grid balancing with wind generation; Review of frequency stability services for grid balancing with wind generation	5					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	
29	2021	Renewable Energy-Based Load Frequency Stabilization of Interconnected Power Systems Using Quasi- Oppositional Dragonfly Algorithm	3						<input checked="" type="checkbox"/>										<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	
30	2018	Design of LC bandpass filters based on siliconbased IPD TechnologyShanghai	2							<input checked="" type="checkbox"/>													<input checked="" type="checkbox"/>

7.2 Resumen de Indicadores

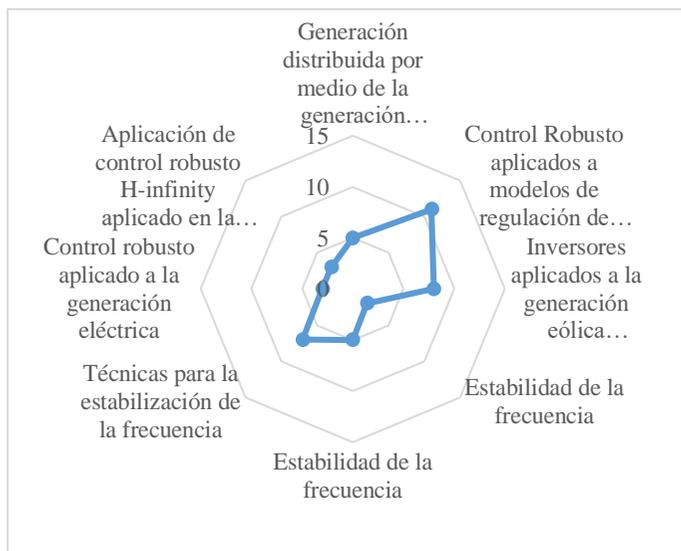


Figura 18: Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

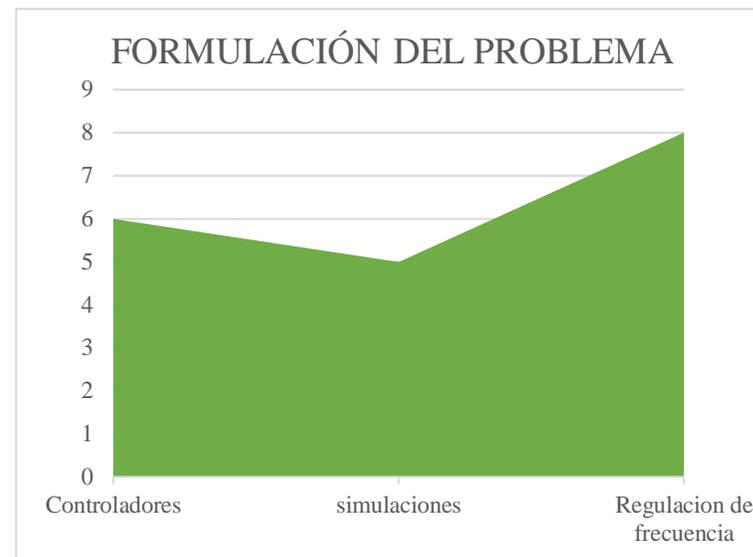


Figura 19: Indicador de formulación del problema - Estado del arte

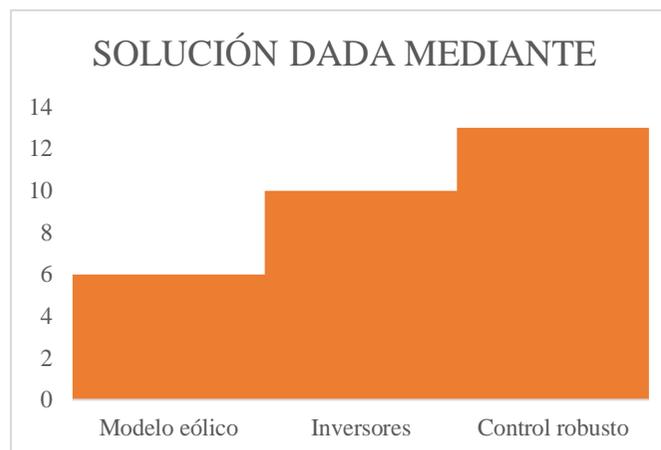


Figura 20: Indicador de solución - Estado del arte.

8 Anexos

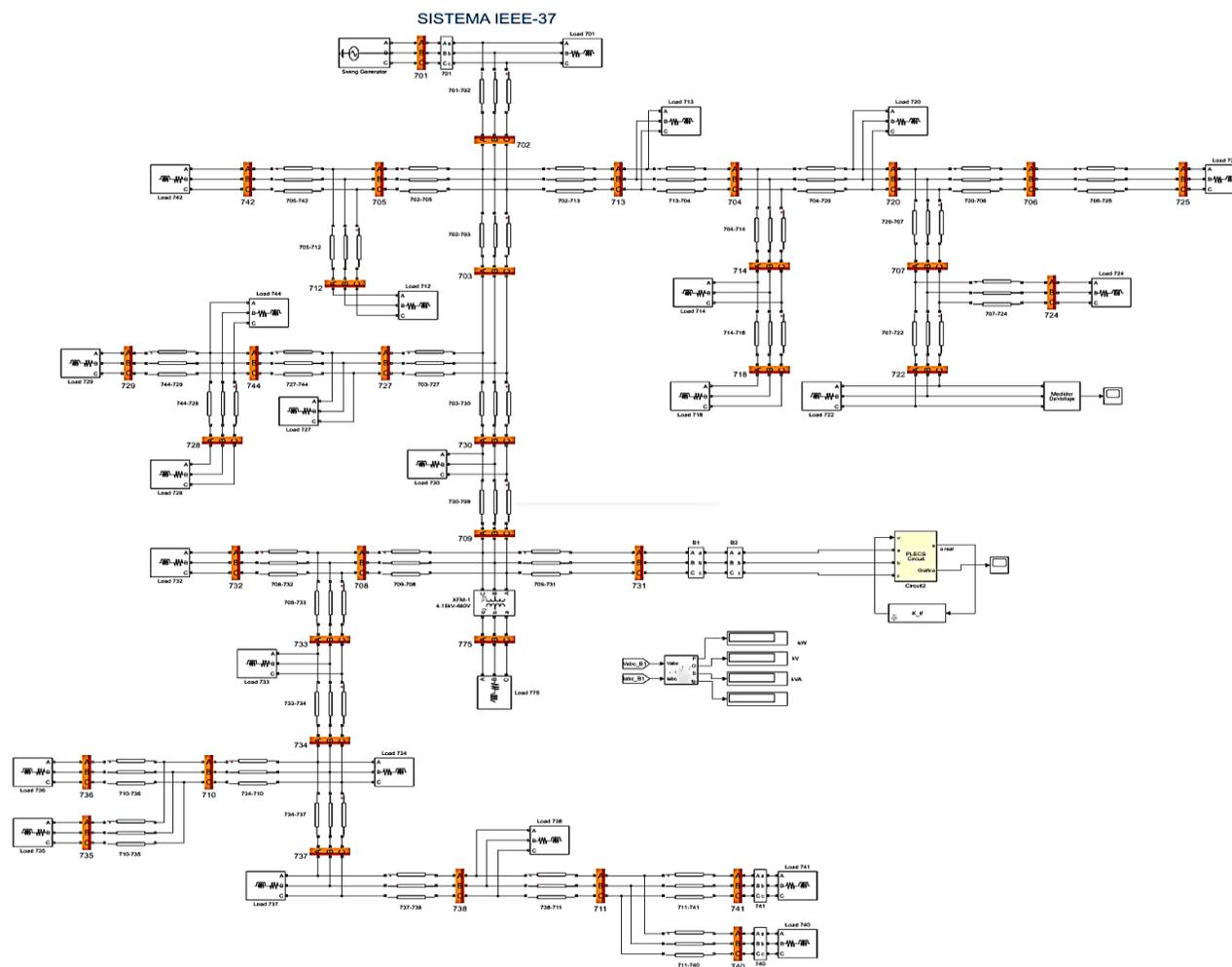


Figura 21: Sistema de 37 barras conectado a un aerogenerador.