

**ESTABILIDAD DE FRECUENCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA CONSIDERANDO GENERACIÓN NO INERCIAL**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
ESTABILIDAD DE FRECUENCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA CONSIDERANDO GENERACIÓN NO INERCIAL**

**AUTOR:
PAÚL SANTIAGO SÁNCHEZ OÑATE**

**DIRECTOR:
CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA**

Quito, febrero 2020

Paúl Santiago Sánchez Oñate

ESTABILIDAD DE FRECUENCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA CONSIDERANDO GENERACIÓN NO INERCIAL

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Paúl Santiago Sánchez Oñate (Y'1995). Realizó sus estudios de nivel primario en la Unidad Educativa Borja N°3 Cavanis, nivel secundario en la Unidad Educativa Municipal Eugenio Espejo de la ciudad de Quito-Ecuador. Actualmente egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana.

psanchezo@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Carlos Andrés Barrera Singaña (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en 2013. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Zaragoza, España, donde obtuvo el título en Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética con Especialidad en Sistemas Eléctricos. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana.

cbarrera@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

©2020 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*ESTABILIDAD DE FRECUENCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA CONSIDERANDO GENERACIÓN NO INERCIAL*” realizado por Paúl Santiago Sánchez Oñate, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., febrero de 2020



.....
Carlos Andrés Barrera Singaña

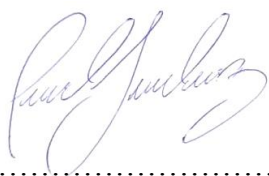
C.C.: 0503503336

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Paúl Santiago Sánchez Oñate, con documento de identificación N° 1722822259, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de grado/titulación intitulado: “*ESTABILIDAD DE FRECUENCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA CONSIDERANDO GENERACIÓN NO INERCIAL*”, mismo que 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 aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., febrero de 2020



.....
Paúl Santiago Sánchez Oñate

C.C.: 1722822259

1. ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico	3
2.1	Estabilidad en Sistemas Eléctricos de Potencia	3
2.2	Estabilidad de Frecuencia.....	3
2.3	Generación Renovable no Inercial	4
2.4	Generación Eólica	5
2.4.1	Recurso eólico	5
2.4.2	Distribución del viento	6
2.4.3	Generadores eólicos	6
2.4.4	Conexión del sistema eólico a la red	9
2.5	Generación Solar Fotovoltaica	10
2.5.1	Recurso solar	10
2.5.2	Célula fotovoltaica	10
2.5.3	Generadores fotovoltaicos	12
3	Modelos de generación renovable no inercial para estabilidad de frecuencia	12
3.1	Modelo WECC EOLICO III	13
3.2	Modelo WECC EOLICO IV	14
3.3	Modelo WECC FV	15
4	Implementación en el software DIgSILENT PowerFactory	15
4.1	Sistema de prueba.....	16
4.2	Escenarios de simulación	16
4.3	Metodología de estudio	17
5	Análisis de resultados	17
6	Conclusiones	20
6.1	Trabajos futuros.....	20
7	Referencias	20
7.1	Matriz de Estado del Arte.....	22
7.2	Resumen de Indicadores.....	24

2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de estabilidad en sistemas eléctricos de potencia.	3
Figura 2. Estabilidad de frecuencia en sistemas eléctricos de potencia.	4
Figura 3. Estabilidad de frecuencia. Frecuencia vs Tiempo	4
Figura 4. Comportamiento del coeficiente de potencia.	6
Figura 5. Generador sincrónico.	7
Figura 6. Generador de inducción tipo jaula de ardilla.	7
Figura 7. Generador de inducción tipo rotor bobinado.	8
Figura 8. Generador de inducción con conversión completa tipo jaula de ardilla.	8
Figura 9. Generador de inducción doblemente alimentado.	9
Figura 10. Generador de imanes permanentes con convertidor completo.	9
Figura 11. Generador de campo bobinado con convertidor completo.	9
Figura 12. Gráfica Voltaje-Corriente de una célula solar	11
Figura 13. Esquema de generación fotovoltaica.	12
Figura 14. Generador de inducción convencional. Modelo WECC Tipo I.	13
Figura 15. Generador de inducción con resistencia variable en el rotor. Modelo WECC Tipo II.	13
Figura 16. Generador asíncrono doblemente alimentado. Modelo WECC Tipo III.	13
Figura 17. Generador con convertidor completo. Modelo WECC Tipo IV.	13
Figura 18. Modelo WECC III.	14
Figura 19. Modelo WECC 4A.	15
Figura 20. Modelo WECC 4B.	15
Figura 21. Modelo fotovoltaico WECC.	15
Figura 22. Sistema eléctrico IEEE de 39 barras.	16
Figura 23. Implementación de generación renovable WECC en la barra 19.	16
Figura 24. Diagrama de flujo de la metodología de estudio.	17
Figura 25. Resultado de estabilidad de frecuencia Caso 1.	18
Figura 26. Resultado de estabilidad de frecuencia Caso 2.	18
Figura 27. Resultado de estabilidad de frecuencia Caso 3.	19
Figura 28. Resultado de estabilidad de frecuencia Caso 4.	19
Figura 29. Resultado de estabilidad de frecuencia Caso 5.	19
Figura 30. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	24
Figura 31. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.	24
Figura 32. Indicador de solución - Estado del arte.	25

3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de generación WECC	17
Tabla 2. Datos de control eléctrico WECC.....	17
Tabla 3. Datos de control eléctrico WECC Caso 1.....	18
Tabla 4. Datos de control eléctrico WECC Caso 2.....	18
Tabla 5. Datos de control eléctrico WECC Caso 3.....	18
Tabla 6. Datos de control eléctrico WECC Caso 4.....	18
Tabla 7. Datos de control eléctrico WECC Caso 5.....	18
Tabla 8. Resultado de frecuencia y tiempo del Caso 1 al Caso 5.	19
Tabla 9. Matriz de estado del arte.	22

ESTABILIDAD DE FRECUENCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA CONSIDERANDO GENERACIÓN NO INERCIAL

Resumen

Los sistemas eléctricos de potencia cuentan cada vez más con energías renovables no convencionales como fuentes de generación, siendo las más relevantes la energía solar y fotovoltaica, en tal sentido la implementación en grandes cantidades de estos tipos de generación en el sistema eléctrico puede afectar a la estabilidad de la frecuencia. El sistema eléctrico presenta condiciones de respuestas ante una falla o perturbación, la inercia de las máquinas es una de ellas, esta actúa como primera respuesta siendo así una parte fundamental de la recuperación de la frecuencia, por lo tanto, es imprescindible el estudio de la estabilidad del sistema ya que las fuentes de generación eólica y fotovoltaica no poseen inercia. Por lo expuesto, el presente documento se enfoca en desarrollar un modelo de simulación de la estabilidad de la frecuencia mediante el software DIgSILENT Power Factory, obteniendo como resultado el comportamiento de la frecuencia ante una falla del sistema, de tal modo que la simulación se realice con los modelos propuestos por WECC (West Electricity Coordinating Council) variando las características de control eléctrico de cada tipo de generador.

Palabras Clave: Energía solar, Energía fotovoltaica, Estabilidad de frecuencia, Generación no Inercial, Sistema Eléctrico de Potencia, Falla del sistema, WECC.

Abstract

Electric power systems increasingly have non-standard renewable energies as sources of generation, the most relevant being solar and photovoltaic energy, in this sense the implementation in large quantities of these types of generation in the electrical system can affect the frequency stability. The electrical system has conditions to response to a fault or disturbance, the inertia of the machines is one of them, these acts as the first response, thus being a fundamental part of the recovery of the frequency, therefore, the study of the System stability and sources of wind and photovoltaic generation not limited inertia. Therefore, this document focuses on developing a simulation model of frequency stability using the DIgSILENT Power Factory software, obtaining as a result the frequency behavior in the event of a system failure, so that the simulation is performed with the models proposed by WECC (Western Electricity Coordination Council) varying the electrical control characteristics of each type of generator.

Keywords: Solar energy, photovoltaic energy, frequency stability, non-inertial generation, electric power system, system failure, WECC.

1 Introducción

La energía eléctrica es una parte fundamental en el desarrollo y funcionamiento de un país y del mundo. Actualmente los combustibles fósiles son ampliamente utilizados para la producción de energía; y, a partir de que estos son uno de los causantes del calentamiento global se pretende disminuir su uso. Es por esto que la implementación de los sistemas eólicos y fotovoltaicos está aumentando a un ritmo acelerado en los últimos años, esto conlleva a un aporte significativo en temas medio ambientales desde el enfoque de la preservación del mismo [1][2].

La generación eólica y fotovoltaica mundial está liderada por China, Estados Unidos y Alemania, estos países proporcionan el 61% de 456 GW de energía eólica y el 45% de 227 GW de energía fotovoltaica global en el 2018, con altas proyecciones de crecimiento durante la década del 2020, por el hecho del desarrollo de nuevas tecnologías y materias en estas energías renovables.

Por lo antes expuesto, este tipo energías renovables no convencionales están creciendo exponencialmente en el sector eléctrico mundial [3][4][5]. Por lo tanto, para la inyección de grandes cantidades de energía eólica y fotovoltaica en el sistema eléctrico se deben considerar los cambios que puede sufrir la estabilidad en el sistema, siendo la estabilidad de frecuencia un aspecto que puede ser sensiblemente disminuido.

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) son sensibles a diferentes tipos de eventos ocasionados por fallas internas o externas, por lo tanto producen variaciones o pérdidas de estabilidad del sistema, sea esta de tipo referente a la frecuencia [6]. Por otro lado, debido al bajo factor de utilización de las turbinas,

para alcanzar una potencia de dos cifras, se requiere una gran cantidad de potencia instalada, en comparación con las centrales tradicionales. La base para la estabilidad de frecuencia de un sistema eléctrico es el equilibrio entre la potencia activa de generación y la potencia activa que consumen las cargas.

Este desequilibrio puede ocurrir por la falla de un elemento del sistema, es así que, la capacidad de controlar la potencia activa y reactiva con frecuencia/voltaje se han implementado en los sistemas eléctricos de todo el mundo, cada vez con mayores facilidades y otorgando al operador mayor controlabilidad y observabilidad. Sin embargo, el control y la regulación de la frecuencia también se ha convertido en un tema crítico de estudio [1]. Un primer análisis de la estabilidad de la frecuencia está relacionado con la respuesta inercial, y desde la generación renovable; los aerogeneradores de tipo DFIG (Generador de Inducción de Alimentación Doble) y Full Converter PMSG (Generador síncrono de imanes permanentes) poseen un convertidor electrónico, motivo por el cual proporcionan una menor cantidad de respuesta inercial en el sistema en comparación con una máquina rotativa convencional de el mismo tamaño. Se puede realizar un intento de emular este tipo de respuesta agregando, en el bucle de control de seguimiento de potencia máxima, una señal procesada por un filtro configurado correctamente que aumenta la potencia de referencia a medida que la frecuencia disminuye [1]; mientras que la generación fotovoltaica no posee un sistema rotativo en la producción de energía, por lo que no contiene inercia que aportar al sistema.

El propósito de este documento es, por lo tanto, simular distintos casos para la frecuencia a fin de poner a prueba su

estabilidad, en escenarios de alta incidencia de generación eólica y fotovoltaica. Además, esta información es el punto de inicio para el análisis y comprensión de los modelos de prueba de esta generación propuestos por WECC (West Electricity Coordinating Council).

2 Marco teórico

2.1 Estabilidad en Sistemas Eléctricos de Potencia

La estabilidad de un sistema eléctrico de potencia depende de la capacidad del sistema de permanecer en un estado estable en condiciones normales de operación y retornar a un estado normal en caso se sufrir una falla o perturbación.

El sistema de potencia es altamente no lineal, opera en un ambiente que constantemente cambia; por ejemplo, con variación de cargas, salidas de generadores o fallas y cambios continuos de las características de operación. Cuando el sistema es expuesto a una perturbación, la estabilidad del sistema depende del estado de operación inicial, así como de la gravedad de la perturbación.

Los SEP presentan estados dinámicos debido a que son vulnerables a diferentes tipos de disturbios causadas por fallas de cualquier elemento que posea el sistema, o por una falla externa, que pueden terminar en la pérdida parcial o total de la estabilidad del sistema, ya sea de tipo angular, de voltaje o de frecuencia, como se muestra en la Figura 1.

El estudio de los problemas de estabilidad, identificar los factores que llevan a la inestabilidad, y el análisis de procesos para mejorar el funcionamiento de la operación en estado estable es proporcionado por la categorización de la estabilidad en las siguientes categorías:

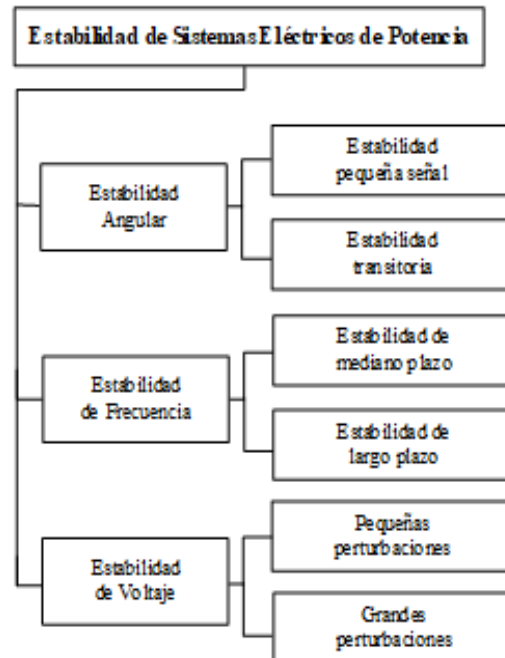


Figura 1. Tipos de estabilidad en sistemas eléctricos de potencia.

- La naturaleza física del desequilibrio resultante del sistema.
- La severidad del disturbio considerado.
- Los componentes, procesos, y el tiempo que debe ser tomado dentro de la consideración en orden de determinar la estabilidad [7].

Este trabajo toma su centra en la estabilidad de frecuencia, la cual se encuentra detallada en la Figura 2.

2.2 Estabilidad de Frecuencia

Para el correcto funcionamiento y operación de un sistema eléctrico es necesario mantener un estado de equilibrio entre la generación y la carga (incluyendo las pérdidas) en todo el tiempo. Si existe un evento y aumenta la carga, por lo tanto aumenta el par electromagnético de los generadores, estos empiezan a frenarse, y la frecuencia disminuye paulatinamente [8].

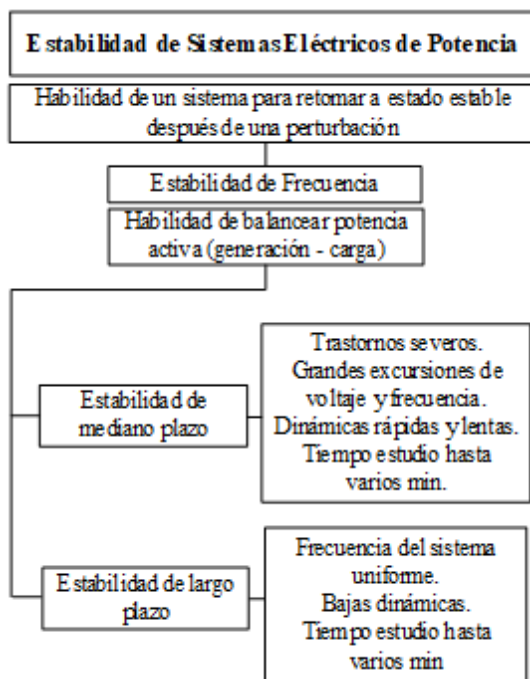


Figura 2. Estabilidad de frecuencia en sistemas eléctricos de potencia.

Sin embargo, existen pequeños desbalances de potencia que afectan este equilibrio constantemente, ya sea por variaciones de la carga o por perturbaciones en el sistema, como desconexión de generadores debido a una falla.

Para evitar que estos desbalances o perturbaciones terminen en un mal funcionamiento operativo de los equipos y al colapso del sistema, existen las respuestas o controles o regulaciones de frecuencia. La respuesta de frecuencia se divide en tres fases de control, sin incluir la respuesta inercial que poseen naturalmente las máquinas sincrónicas ya que estas actúan en los primeros 3 a 5 segundos. Las tres fases de control se conocen como: respuesta primaria de frecuencia (RPF), respuesta secundaria de frecuencia (RSF); y, respuesta terciaria de frecuencia (RTF) como se muestra en la Figura 3. Cada uno actúa en ventanas de tiempo diferentes. La RPF actúa entre 3 y 30 segundos, la RSF opera entre 30 segundos y 2 minutos y la

RTF opera después de 10 minutos. Cada respuesta de frecuencia tiene acciones distintas, la RPF controla la velocidad de giro del eje de cada generador, la RSF actúa en el control de la frecuencia y al interactuar la potencia con las áreas contiguas y la RTF opera en el lugar de un sistema eléctrico amplio, buscando repartir óptimamente las cargas que aseguren suficientes reservas de energía [9].

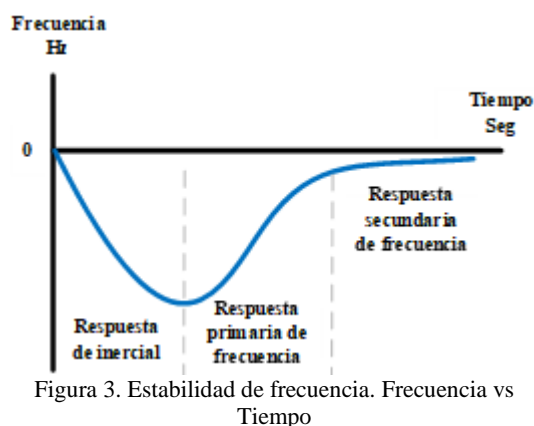


Figura 3. Estabilidad de frecuencia. Frecuencia vs Tiempo

2.3 Generación Renovable no Inercial

Las energías renovables despiertan un progresivo interés porque las provee la naturaleza y son prácticamente inagotables, por lo tanto son seguras y limpias [10]. Las energías renovables incluyen tecnologías que poseen varios factores positivos para el medio ambiental, siendo el principal objetivo la reducción y de la dependencia de los combustibles fósiles [11].

En el mercado actual predominan las turbinas de velocidad variable, que permiten proporcionar una potencia activa/reactiva al sistema eléctrico, apoyándose de electrónica de potencia, por lo tanto, la masa rotativa de la turbina queda desacoplada del sistema. En cuanto a la energía fotovoltaica, los paneles carecen de respuesta inercial intrínseca (es decir, no disminuyen ni

incrementan la potencia cuando existen desequilibrios eléctricos en el sistema), al no ser una masa rotativa [12].

2.4 Generación Eólica

2.4.1 Recurso eólico

El viento es el movimiento de las corrientes de aire causadas por diferentes temperaturas en diferentes puntos geográficos que reciben distintas cantidades de radiación solar. [11].

El viento es uno de los temas renovables más comunes en el ámbito energético. Debido a su bajo impacto ambiental y al desarrollo tecnológico avanzado en los últimos años, la energía fotovoltaica y eólica han llegado a ser la mejor alternativa para la generación de electricidad en el futuro [13].

La fuerte variación temporal y espacial del viento es una de las principales razones para la descripción de su comportamiento, si se desea utilizar el recurso eólico como fuente de generación de energía eléctrica. [11].

Para realizar un análisis de una turbina eólica, su modelo se basa en la ecuación (1):

$$P_v = \frac{1}{2} * \rho * A * C_p * v^3 \quad (1)$$

Donde:

- P_v Potencia disponible en el viento en Watts.
- ρ Densidad del aire en kg/m^3 .
- v Velocidad del viento en m/s .
- A Área de barrido de las palas en m^2 .

Los generadores eólicos solo pueden obtener parte de la energía disponible en el viento debido a cuestiones aerodinámicas. Esta parte está representada por el coeficiente de

potencia (2):

$$C_P = \frac{P_t}{P_v} \quad (2)$$

Donde:

- P_t Potencia que es aprovechada por la turbina en Watts.

La relación de velocidad de punta está determinada como la relación entre la velocidad de barrido y la velocidad del viento (3).

$$\lambda = \frac{\omega * R}{v} \quad (3)$$

Donde:

- ω Velocidad angular del eje de la turbina dada en rad/s .
- R Radio de la turbina dado en m .

El coeficiente de potencia del rotor de un generador eólico varía en función de la relación de velocidad de punta o λ , y se da por:

$$C_P(\lambda) = C_1 * \left(\frac{C_2}{\lambda_1} - C_3 \right) * e^{-\frac{C_4}{\lambda}} + C_5 * \lambda \quad (4)$$

Donde:

- C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 Coeficientes numéricos con valores para cada rotor.

Por lo tanto, la potencia depende del coeficiente de potencia del rotor, la relación de velocidad pico y del número de palas con las que se diseñe el aerogenerador como se observa en la Figura 4. El diseño de tres palas es aquel empleado de manera general; pues por temas mecánicos es aquel que aporta con

mayor estabilidad al aerogenerador.

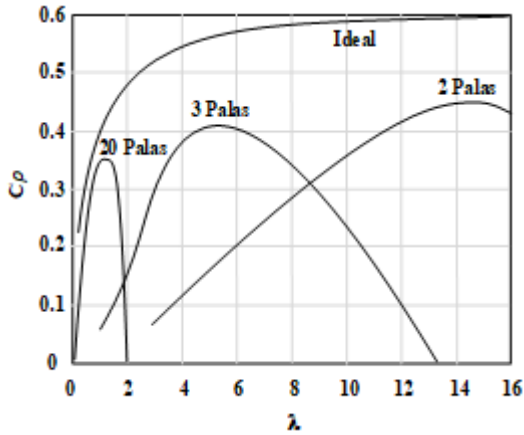


Figura 4. Comportamiento del coeficiente de potencia.

2.4.2 Distribución del viento

La velocidad del viento cambia constantemente, por lo que es necesario describirla estadísticamente. Es útil crear un modelo de las frecuencias de la velocidad del viento que se describe mediante una función matemática continua en lugar de una tabla de valores discretos. Hay varias funciones que pueden usarse para describir la frecuencia de la distribución de la velocidad del viento. Una de ellas es la función Weibull, que sirve como modelo confiable para el análisis del viento para describir la curva de velocidad y frecuencia del viento. Muchos investigadores lo han usado ampliamente para modelar estadísticamente las fluctuaciones de la velocidad del viento. La ecuación de la distribución de Weibull $f_w(v)$ (5) se puede expresar como:

$$f_w(v) = \left(\frac{k}{C}\right) * \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} * \exp\left(-\left(\frac{v}{C}\right)^k\right) \quad (5)$$

Donde:

- v Velocidad del viento en m/s.
- k Parámetro de la forma de

Weibull (sin dimensiones), una medida de las características de la velocidad del viento de la distribución.

- C Parámetro de la Escala de Weibull en m/s.

Por otro lado, la distribución de Rayleigh $f_R(v)$ (6) es un caso especial de la distribución de Weibull en la que se supone que el parámetro de forma k es igual a 2.

En la ecuación de Weibull $f_w(v)$, las funciones de probabilidad de densidad de la distribución de Rayleigh vienen dadas por:

$$f_R(v) = \frac{2 * v}{C^2} * e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^2} \quad (6)$$

Donde:

- v Velocidad del viento en m/s.
- C parámetro de escala de Weibull en m/s [14].

2.4.3 Generadores eólicos

En el proceso de conversión de energía eólica se requieren distintos tipos de configuraciones de generadores, que se explican en las siguientes secciones.

2.4.3.1 Generador de velocidad fija

Los generadores sincrónicos se utilizan normalmente para la generación de energía con turbinas convencionales de gas, vapor o agua. La Figura 5 muestra el uso de un generador de este tipo con una turbina eólica, pero los generadores sincrónicos normalmente no se utilizan para las turbinas eólicas que están conectadas a la red. La razón principal de esto es que, dado que el generador funciona a una velocidad constante, el acoplamiento entre el generador y la red

es muy rígido para este sistema, con el resultado de que todo el par transitorio se debe al eje del motor de la turbina, estos generan una importante tensión mecánica en los engranajes, lo que reduce la confiabilidad del sistema. Todos los demás sistemas mostrados tienen este nivel de correspondencia ya que la velocidad del sistema de accionamiento puede cambiar cuando se expone a pares transitorios.

Esta disposición a menudo se conoce como el concepto danés, en el que la potencia generada cambia naturalmente cuando cambia la velocidad del viento. Cuando la turbina se somete a una ráfaga de viento, su velocidad puede cambiar ligeramente y los pares de transición se reducen en comparación con el sistema de sincronización rígido.

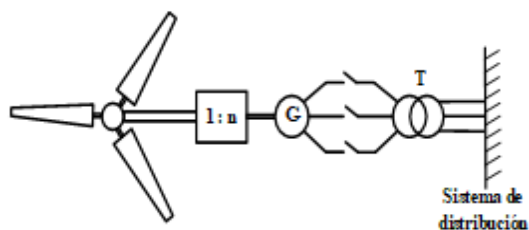


Figura 5. Generador sincrónico.

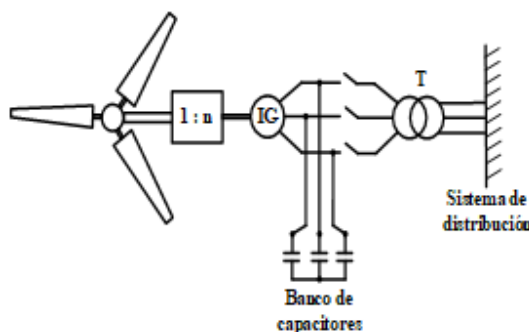


Figura 6. Generador de inducción tipo jaula de ardilla.

La Figura 5 muestra un generador sincrónico que funciona a velocidad constante y en la Figura 6 muestra el sistema generador de inducción tipo jaula de ardilla que funciona a una velocidad que es casi constante, puede variar entre

un 2 y un 4% desde la carga total. Como el cambio de velocidad del generador de inducción es pequeño, a menudo se lo denomina generador de velocidad fija.

2.4.3.2 Generador de velocidad variable

La Figura 7 muestra una modificación de la máquina de inducción de velocidad fija en la que el rotor de la jaula de la máquina de velocidad fija ha sido reemplazado por un rotor bobinado. Al controlar la resistencia del rotor del devanado, el rango de velocidad de la turbina se puede aumentar ligeramente, haciendo que el sistema sea aún más potente.

Todas las máquinas de inducción deben recibir energía reactiva para generar el flujo de magnetización en la máquina. El sistema debe proporcionar esta potencia reactiva y, para reducir esta necesidad, los capacitores de corregir el factor de potencia a menudo se instalan en los terminales del generador. Con el desarrollo adicional de la tecnología de las turbinas, los operadores de red necesitan un control más fuerte de la turbina para que el generador pueda contribuir más o menos al control de voltaje y al control de frecuencia (control de potencia activa). Al introducir el control electrónico de potencia en los sistemas del generador como se muestra en la Figura 7 y Figura 8, puede aumentarse el rango de velocidad en el que opera el generador, aumentando así la generación de energía.

Debido a que la velocidad puede cambiar significativamente a medida que cambia la potencia de la turbina, el sistema tiene una potencia significativa y los pares transitorios se reducen aún más. El control electrónico de potencia permite variar el factor de potencia en los terminales del generador según lo requiera el operador de la red.

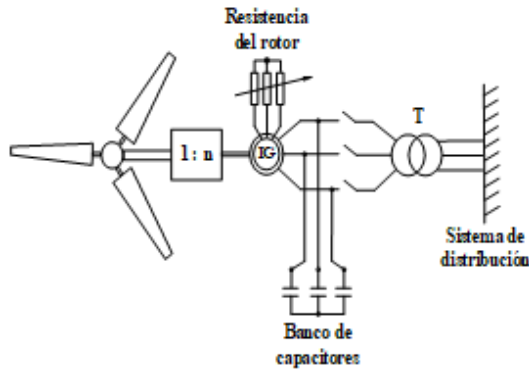


Figura 7. Generador de inducción tipo rotor bobinado.

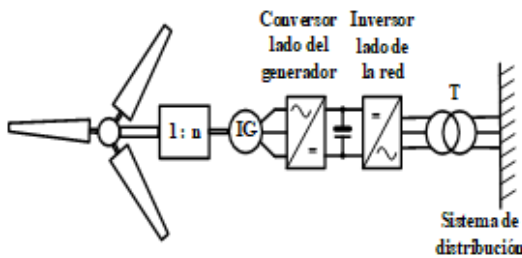


Figura 8. Generador de inducción con conversión completa tipo jaula de ardilla.

2.4.3.3 Generador de inducción doblemente alimentado

El generador de inducción de conversión completa que se muestra en la Figura 8 proporciona un alto nivel de control, pero el convertidor de potencia electrónico debe tener toda la potencia (MVA) de la turbina y llevar la potencia del generador completa. Dichos generadores de conversión completa son caros y una forma de reducir costos es usar un convertidor parcialmente clasificado y un generador de inducción de doble alimentación (DFIG). Esta disposición del generador se muestra en la Figura 9 y actualmente es el sistema preferido para muchos fabricantes de sistemas de turbinas de varios megavatios. El DFIG es una máquina de inducción con un rotor de devanado y un estator que está conectado directamente al sistema a la frecuencia del sistema. El rotor es

alimentado por un convertidor con una frecuencia de deslizamiento y, como tal, normalmente tiene una salida nominal del 25 al 30% de la salida del generador. En el caso de un inversor de esta clasificación, la velocidad puede variar en una cantidad similar, es decir, $\pm 25\%$ a 30% , con un control correcto del inversor, que permite controlar tanto la velocidad como el factor de potencia de salida del generador. Con este sistema, sin embargo, se requieren anillos colectores para que el convertidor pueda alimentar el circuito del rotor.

La Figura 10 muestra un diagrama que usa un generador de imanes permanentes, en el que el campo magnético dentro del generador es generado por imanes permanentes en el rotor. Dado que no hay devanado de campo en este generador, no hay pérdidas asociadas, por lo que este tipo de generador tiene una eficiencia muy alta, que supera el 90%. La salida del generador se rectifica primero antes de ser invertida y conectada a la red. Aunque se podrían usar rectificadores pasivos, un rectificador activo que usa la tecnología IGBT se usa típicamente en máquinas grandes para proporcionar un control total sobre la potencia entregada al enlace de corriente directa, así como el factor de potencia del generador. Una característica especial de esta disposición es que los imanes permanentes siempre aseguran que el campo magnético esté activo, de modo que el generador siempre induce una f.e.m. (fuerza electromotriz) en los devanados de la armadura cuando gira. Esta función se puede usar porque si los devanados del generador están en cortocircuito (posiblemente por una pequeña resistencia para limitar la corriente) se genera un par electromagnético que impide que la turbina gire. Eso significa

que puede usarse como un sistema de frenado.

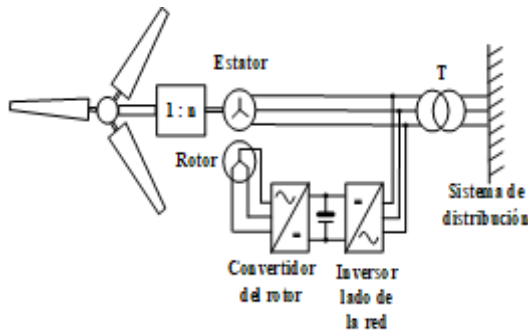


Figura 9. Generador de inducción doblemente alimentado.

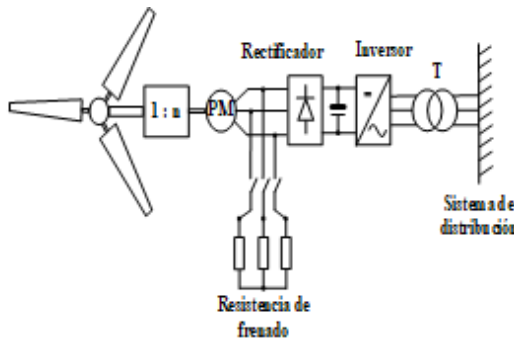


Figura 10. Generador de imanes permanentes con convertidor completo.

2.4.3.4 Configuración Full Converter

La disposición de la Figura 11 muestra una máquina de transmisión directa sincrónica. Aunque a veces se usa un generador de imanes permanentes sin una caja de engranajes, una alternativa es usar una máquina de campo de bobinado como se muestra en la Figura 11. Al usar una máquina de campo de bobinado, la fuerza del campo magnético dentro del generador se puede controlar ajustando la corriente en el campo. Esto permite controlar el tamaño de la f.e.m. inducida cuando cambia la velocidad del generador. Se puede utilizar un convertidor de tiristores o un rectificador IGBT activo para convertir la potencia generada AC por la frecuencia variable en potencia DC antes de invertir finalmente a la potencia AC de

frecuencia fija para la conexión a la red. El inversor permite un control completo de la potencia activa-reactiva en los terminales del inversor. La necesidad de control de potencia a altas velocidades del viento que limita la potencia de la turbina al valor nominal para que la velocidad de la turbina no exceda su velocidad nominal [15].

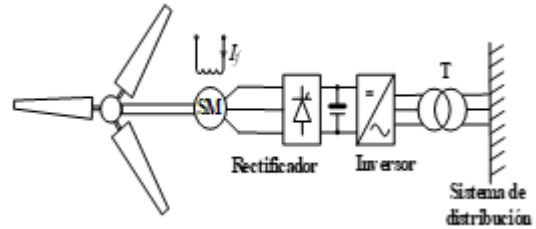


Figura 11. Generador de campo bobinado con convertidor completo.

2.4.4 Conexión del sistema eólico a la red

Desde el punto de vista de una turbina eólica conectada a la red, estas se pueden dividir en turbinas eólicas con una velocidad fija y turbinas eólicas con una velocidad variable.

Los generadores eólicos con turbinas de velocidad fija son de inducción de tipo jaula de ardilla (conocidos como Tipo A) donde el movimiento se delimita a valores próximos al 2%, por lo tanto, el valor de la variación de velocidad es usualmente el mismo que los valores de operación en los que se encuentra la turbina. La potencia activa se relaciona esencialmente con el par mecánico del eje del rotor y el voltaje en los terminales del generador. Si se toma en cuenta que la potencia reactiva fluctúa con el voltaje y que el generador no tiene una regulación de voltaje independiente, de modo que la excitación proviene del sistema eléctrico del vehículo, esto significa que la potencia reactiva del generador de la red eléctrica consume la red todo el tiempo. Por lo tanto, los

bancos de capacitores se utilizan normalmente para compensar el consumo de reactivos. Por lo general, se utiliza un doble devanado para aumentar la potencia activa, uno para trabajar a velocidades del viento bajas (generalmente de 8 pines) y el segundo para velocidades del viento medianas y altas (generalmente entre 4 y 6 pines) [16].

2.5 Generación Solar Fotovoltaica

2.5.1 Recurso solar

La energía solar es la energía que resulta del sol. La radiación solar que absorbe nuestro planeta rodea los 1.5 kW/h. Eso significa que hay una fuente de energía con un gran rendimiento y la importancia de ser renovable [17]. El propósito de un sistema fotovoltaico es convertir la energía que proviene del sol en energía eléctrica utilizable. El nombre fotovoltaico se usa concretamente para designar el sistema que realiza esta transformación electrónicamente. El componente mínimo y primordial de los sistemas de transformación del sol a electricidad es la célula fotovoltaica, cuyo elemento principal es un semiconductor, generalmente silicio [18].

2.5.2 Célula fotovoltaica

La célula fotovoltaica es como un diodo de enorme área que consiste en un cristal de silicio, cuya superficie consiste en gran parte de impurezas de boro y en gran parte de impurezas de fósforo. El resultado del diodo es crear un campo eléctrico interiormente en la celda en el área de relación entre la parte de silicio dopada con boro y la parte dopada con fósforo. Conectadas estas superficies a través en un circuito exterior se genera una corriente eléctrica [17]. Un módulo es el resultado de acoplar varias celdas

en una fila. El área de superficie de las celdas utilizadas en la fabricación de un módulo y su eficiencia determinan el rendimiento del módulo. Por ejemplo, un módulo de 20 W genera 20 W en una hora con una radiación de 1000 W/m² y una temperatura de 25 °C.

Una célula presenta una eficiencia como la porción proporcional de la radiación solar que convierte la célula en energía eléctrica. Se da en porcentaje y generalmente varía entre 3% y 30% dependiendo de las propiedades del material. Hoy en día, el uso de la energía fotovoltaica para generar electricidad es muy habitual, siendo los paneles solares los elementos más populares [19].

Si se utiliza la experiencia y el entorno matemático, se encontrará que las células fotovoltaicas dependen de dos parámetros de tipo ambiental: la irradiancia G (que afecta la cantidad de luz por unidad de área de la célula W / m²) y la temperatura del ambiente Ta. De estas dos variables y los atributos en cada celda, puede obtener una ecuación matemática que figura la corriente generada por esa celda (7):

$$I = I_L - I_0 * \left(e^{\frac{V + I * R_s}{V_r}} - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_p} \quad (7)$$

Donde:

- I Corriente generada por la célula.
- I_L Corriente de electrones generada por la incidencia de los fotones.
- I_0 Corriente inversa de saturación (por su similitud con el comportamiento de un diodo).
- V Voltaje generado por la

- célula.
- V_T Voltaje térmico.
- R_S Resistencia en serie de la célula.
- R_P Resistencia en paralelo de la célula.

Al observar a la ecuación (7) se muestra muy complejo su análisis. Por lo tanto, para simplificar la resolución de la ecuación, se hicieron las siguientes simplificaciones:

- Se supone que el efecto de R_P es despreciable.
- Se supone la igualdad: $I_L = I_{SC}$, dado que, es un valor conocido y empíricamente calculado.
- Con $e^{\frac{V + I \cdot R_S}{V_T}} \gg 1$.

resultando la siguiente ecuación (8):

$$I = I_{SC} * \left(1 - e^{\frac{V - V_{OC} + I_{SC} * R_S}{V_T}} \right) \quad (8)$$

La definición matemática para el voltaje térmico (9) es la siguiente:

$$V_T = \frac{m * k * T_C}{e} \quad (9)$$

Donde:

- m Factor de idealidad $1 < m < 2$.
- k Constante de Boltzman $1.3806504 * 10^{23}$.
- T_C Temperatura de la célula, función de la temperatura ambiente.
- e Carga de un electrón $1.602176565 * 10^{19} \text{C}$.

Los módulos solares se caracterizan por el fabricante e indican, entre otras cosas, el voltaje de circuito en modo

abierto y la corriente de cortocircuito. Estos valores determinan la curva de generación fotovoltaica mostrada en la Figura 12.

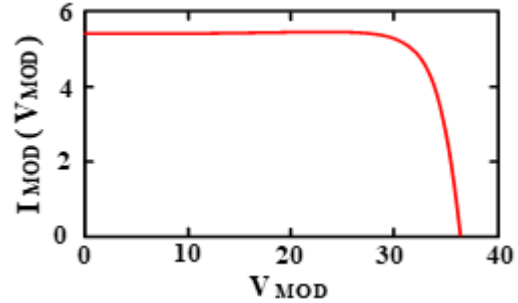


Figura 12. Grafica Voltaje-Corriente de una célula solar

Dichas células solares se pueden conectar en paralelo o en serie, por lo tanto, se cumplen las ecuaciones (10) y (11):

$$V_{OCgen} = N_S * V_{OCmod} \quad (10)$$

$$I_{SCgen} = N_P * I_{SCmod} \quad (11)$$

Donde:

- V_{OCgen} Voltaje de circuito abierto del conjunto de paneles.
- I_{SCgen} Corriente de cortocircuito del conjunto de paneles solares (generador).
- V_{OCmod} Voltaje de circuito abierto para cada uno de los paneles.
- I_{SCmod} Corriente de cortocircuito para cada uno de los paneles.
- N_S Número de paneles asociados en serie.
- N_P Número de paneles asociados en paralelo.

Por lo tanto, la conexión en serie extiende la curva de la Figura 12 hacia la derecha, mientras que la conexión paralela corre la curva en sentido

vertical. En las dos conexiones, cada una de las células siempre funciona con la misma corriente y voltaje, un factor esencial para que el generador trabaje correctamente [19]. La ecuación que define el nivel de voltaje que depende de la corriente (12) es:

$$V(I) = N_s * V_T * \ln \left(1 + \frac{I}{I_s} \right) + V_{oc} - I_{sc} * R_s \quad (12)$$

Y la corriente que rige el comportamiento de la célula fotovoltaica (13) es [18]:

$$I = I_{sc} * \left(1 - \exp \left(\frac{V - V_{oc} + I_{sc} * R_s}{N_s * V_T} \right) \right) \quad (13)$$

2.5.3 Generadores fotovoltaicos

La conexión de un sistema fotovoltaico (FV) a la red eléctrica depende de la cantidad de carga que se va a alimentar, lo que se refleja en la cantidad de módulos. Varios módulos conectados en serie se denominan una cadena, y varias cadenas conectadas en paralelo forman un arreglo. Dado que el voltaje generado por el sistema FV es del tipo de corriente directa, se requiere un inversor con el que el voltaje generado pueda ser acondicionado a un nivel de corriente alterna. Para aumentar la potencia entregada a la red y mejorar la eficiencia del sistema, el inversor puede incluir un MPPT que detecta la señal de corriente proporcionada por la matriz FV e intenta maximizar la potencia que proporciona. Todos estos conceptos se los observa en el esquema de la Figura 13.

Los inversores son una parte imprescindible del sistema de generación fotovoltaica. Este sistema tiene inversores que están orientados a ramales, que son especialmente

utilizados en algunos sistemas de combinación arquitectónica y pueden ajustarse mejor a los entornos de operación con diferentes inclinaciones y disposiciones.

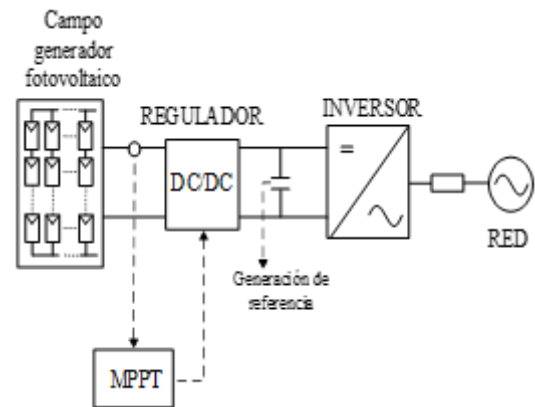


Figura 13. Esquema de generación fotovoltaica [20].

La principal desventaja es que el inversor debe ser muy robusto, ya que el voltaje debe aumentarse para garantizar una conexión adecuada a la red. Aunque el inversor tiene un alto nivel de eficiencia en esta configuración, esto no se aplica a la conexión en paralelo de los módulos fotovoltaicos, ya que pueden ocurrir diferencias de voltaje en los módulos fotovoltaicos, lo que conduciría a una disminución en la eficiencia [21] [22].

3 Modelos de generación renovable no inercial para estabilidad de frecuencia

Varios fabricantes de turbinas eólicas han desarrollado modelos con los que el comportamiento de las turbinas que producen se puede reproducir con gran precisión en estudios que deben realizar las agencias responsables de regular y controlar la expansión; y el funcionamiento adecuado del sistema de suministro de energía. El proceso de desarrollo fue llevado a cabo por organizaciones como el WECC o la

Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). Estas organizaciones trabajan con instituciones de varios gobiernos y el sector privado para desarrollar modelos generalizados de turbinas eólicas que pueden usarse para realizar estudios que demuestren el impacto de las turbinas eólicas en la estabilidad de los sistemas de energía eléctrica [23]. El estudio realizado por la WECC e IEC dio como resultado los siguientes cuatro modelos de aerogeneradores desde la Figura 14 a la Figura 17:

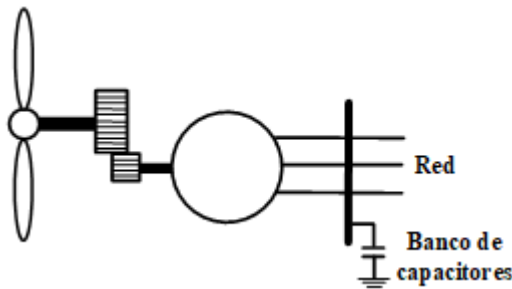


Figura 14. Generador de inducción convencional. Modelo WECC Tipo I.

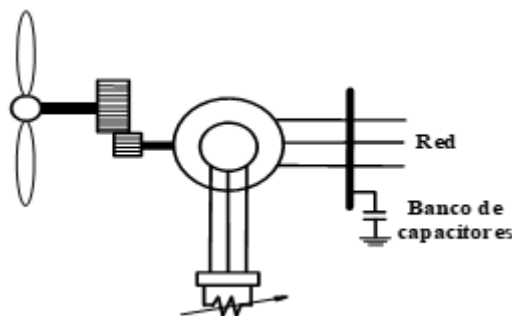


Figura 15. Generador de inducción con resistencia variable en el rotor. Modelo WECC Tipo II.

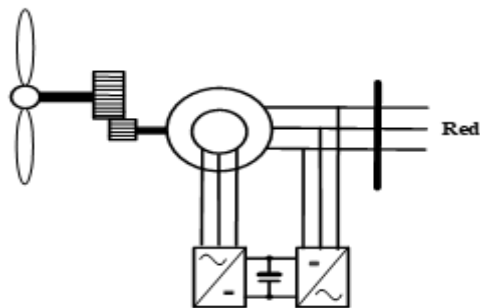


Figura 16. Generador asíncrono doblemente alimentado. Modelo WECC Tipo III.

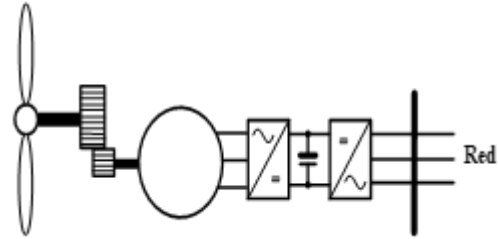


Figura 17. Generador con convertidor completo. Modelo WECC Tipo IV.

En el presente trabajo se analizan los modelos Tipo III, Tipo IV y el modelo fotovoltaico propuesto por WECC.

3.1 Modelo dinámico WECC III

El modelo WECC Tipo III es un generador asíncrono doblemente alimentado, se desarrolla utilizando siete modelos de control, todos los cuales se encuentran entre los modelos genéricos de segunda generación recientemente desarrollados:

- 1) *regc_a*: que es el generador / convertidor de energía renovable modelo y tiene entradas de comando de corriente real (I_{pcmd}) y reactiva (I_{qcmd}) y salidas de inyección de corriente real (I_p) y reactiva (I_q) en el modelo de cuadrícula.
- 2) *reec_a*: que es el modelo de controles eléctricos de energía renovable a, y tiene entradas de referencia de potencia real (P_{ref}) que se pueden controlar externamente, referencia de potencia reactiva (Q_{ref}) que se puede controlar externamente y retroalimentación de la potencia reactiva generada (Q_{gen}).
- 3) *wtgt_a*: que es la emulación de las oscilaciones de la transmisión. La salida de este modelo es la velocidad (spd). En este caso, se supone que la velocidad es un vector $spd = [\omega \ t \ \omega \ g]$.
- 4) *wtgarr_a*: que es un modelo lineal simple de la aerodinámica de la

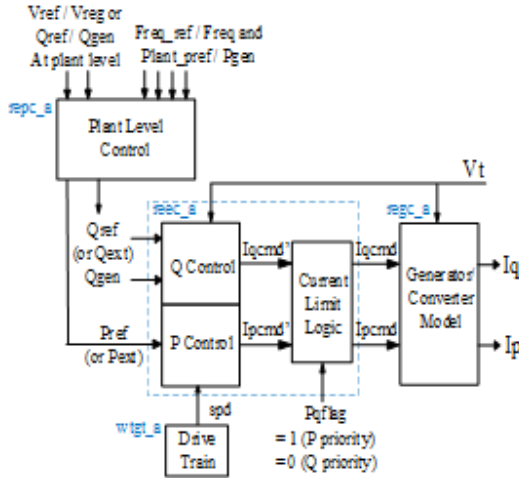


Figura 19. Modelo WECC 4A.

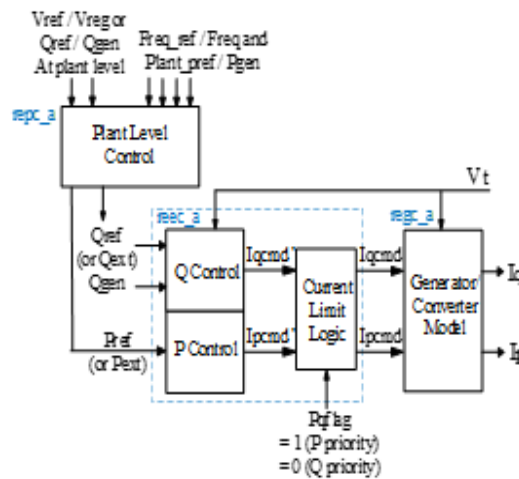


Figura 20. Modelo WECC 4B.

3.3 Modelo WECC FV

Una central fotovoltaica se desarrolla utilizando tres de los modelos genéricos de segunda generación recientemente desarrollados:

- 1) *regc_a*: es el modelo de generador/convertidor de energía renovable y tiene entradas de comando de corriente real (I_{pcmd}) y reactiva (I_{qcmd}) y salidas de inyección de corriente real (I_p) y reactiva (I_q).
- 2) *reec_b*: es el modelo de controles eléctricos de energía renovable b, y tiene entradas de referencia de potencia real (P_{ref}), referencia de

potencia reactiva (Q_{ref}) que puede controlarse externamente y retroalimentación de la potencia reactiva generada (Q_{gen}).

- 3) *repc_a*: que es el modelo de controlador de planta de energía renovable a. Este modelo tiene entradas de referencia de voltaje (V_{ref}) y voltaje medido / regulado (V_{reg}) a nivel de planta, o referencia de potencia reactiva (Q_{ref}) y medido (Q_{gen}) a nivel de planta [25].

Todos estos procesos se muestran detallados en la Figura 21.

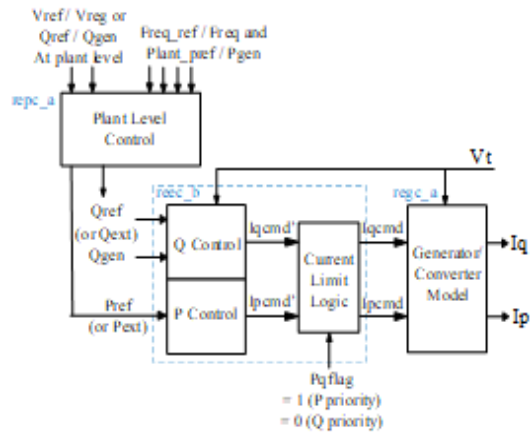


Figura 21. Modelo fotovoltaico WECC.

4 Implementación en el software DIGSILENT PowerFactory

En el presente artículo, la simulación se resuelve bajo el software DigSILENT PowerFactory. El estudio utiliza los sistemas de generación eólicos y fotovoltaicos propuestos por WECC Tipo III, Tipo IV y Tipo FV respectivamente, estos tipos de tecnologías se implementan en un sistema de potencia, poniendo a prueba su operación y funcionamiento ante un desbalance entre la carga y la generación con el fin de analizar la estabilidad de frecuencia del SEP.

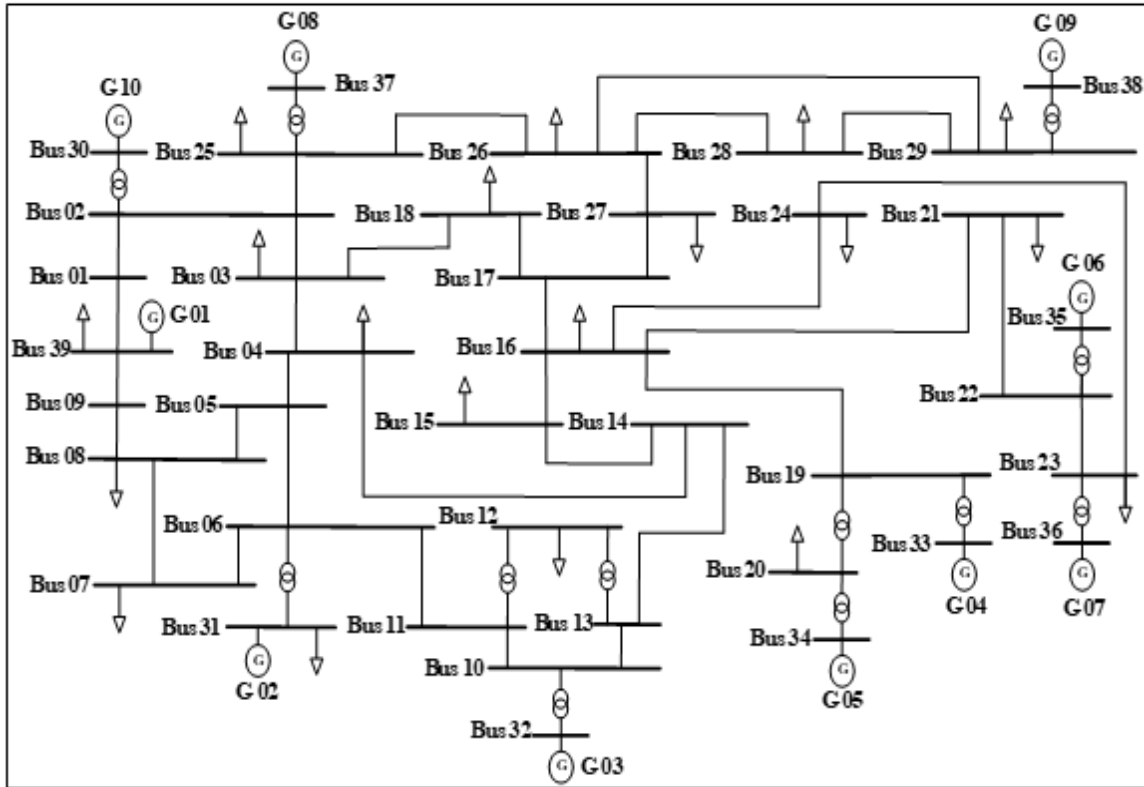


Figura 22. Sistema eléctrico IEEE de 39 barras

4.1 Sistema de prueba

Para el modelo de prueba se utiliza el sistema eléctrico de potencia IEEE de 39 barras mostrado en la Figura 22.

4.2 Escenarios de simulación

Se plantea la ocurrencia de una falla en el generador G06 que inyecta energía en la barra 35; para que exista una descompensación entre generación y demanda. En la barra 19 (generador G04) se reemplaza la generación convencional como se muestra en la Figura 23; donde se implementan los sistemas de energía renovable propuestas por WECC Tipo III (DFIG), WECC Tipo IV (Full Converter) y WECC FV (Fotovoltaico) con la finalidad de simular la inyección de la misma cantidad de energía que es generada por el generador G04 del sistema. Los datos para cada uno de los sistemas WECC implementados en la

barra 19 se muestra en la Tabla 1, por lo tanto, cada sistema inyecta la misma cantidad de potencia al sistema; derivándose en los escenarios de simulación presentados en el apartado 5.

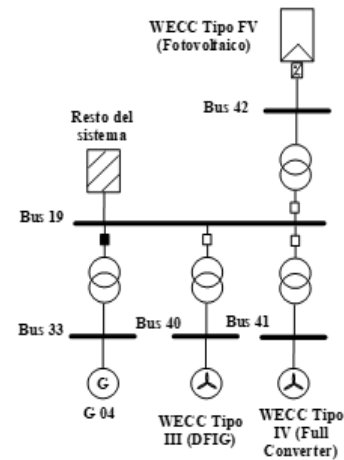


Figura 23. Implementación de generación renovable WECC en la barra 19.

Tabla 1. Datos de generación WECC

Sistema WECC	Conexión paralelo [u]	Potencia [MW]	Potencia total [MW]
Tipo III	350	2	700
Tipo IV	350	2	700
FV	1	700	700

4.3 Metodología de estudio

La metodología para la ejecución del estudio de estabilidad de frecuencia con la característica renovable expuesta en este trabajo se indica en el diagrama de flujo de la Figura 24.

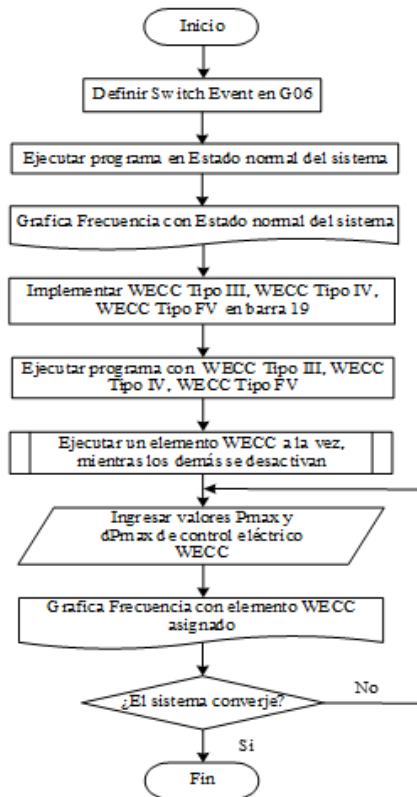


Figura 24. Diagrama de flujo de la metodología de estudio.

5 Análisis de resultados

La metodología de estudio provee los pasos necesarios para la simulación en el modelo de prueba, el resultado de esta simulación determina la caída de

frecuencia y su recuperación ante una falla del sistema. En el momento en que ocurre la falla (desconexión del generador) comienzan las respuestas del sistema.

- Respuesta inercial y primaria
- Respuesta secundaria: control de velocidad de los generadores.
- Respuesta terciaria: cambio en las consignas de los generadores.

Las gráficas a continuación son el resultado de la simulación de la estabilidad de frecuencia utilizando las distintas tecnologías propuestas por WECC que permiten conocer su reacción ante un evento. Por lo expuesto, la respuesta inercial varía en comparación con una tecnología convencional. Mediante la variación de los parámetros de control de potencia máxima de referencia (P_{max}) y la rampa de potencia máxima de referencia (dP_{max}) asociados a los modelos empleados en la generación renovable conectada en la barra 19.

Para llevar a cabo la simulación se toma en cuenta el rango de valores nominales y mínimos de P_{max} y dP_{max} como lo indica la Tabla 2.

Tabla 2. Datos de control eléctrico WECC.

Sistema WECC	Valores nominales		Valores mínimos para converger	
	P_{max} [pu]	dP_{max} [pu/s]	P_{max} [pu]	dP_{max} [pu/s]
Tipo III	1	2	0.95	0.575
Tipo IV	1	2	0.91	0
FV	1	999	0.91	0

- a) Caso 1: Tomando en cuenta los valores de la Tabla 3 se obtiene la respuesta de la frecuencia que muestra la Figura 25.

Tabla 3. Datos de control eléctrico WECC Caso 1.

Sistema WECC	Pmax [pu]	dPmax [pu/s]
Tipo III	1	2
Tipo IV	1	2
FV	1	999

b) Caso 2: Tomando en cuenta los valores de la Tabla 4 se obtiene la respuesta de la frecuencia que muestra la Figura 26. Figura 26. Resultado de estabilidad de frecuencia Caso 2.

Tabla 4. Datos de control eléctrico WECC Caso 2.

Sistema WECC	Pmax [pu]	dPmax [pu/s]
Tipo III	0.95	0.575
Tipo IV	0.91	0
FV	0.91	0

c) Caso 3: Tomando en cuenta los valores de la Tabla 5 Tabla 3 se obtiene la respuesta de la frecuencia que muestra la Figura 27.

Tabla 5. Datos de control eléctrico WECC Caso 3.

Sistema WECC	Pmax [pu]	dPmax [pu/s]
Tipo III	0.95	1.5
Tipo IV	1	2
FV	0.91	500

d) Caso 4: Tomando en cuenta los valores de la Tabla 6 se obtiene la respuesta de la frecuencia que muestra la Figura 28.

Tabla 6. Datos de control eléctrico WECC Caso 4.

Sistema WECC	Pmax [pu]	dPmax [pu/s]
Tipo III	0.95	2
Tipo IV	0.97	2
FV	0.99	999

e) Caso 5: Tomando en cuenta los valores de la Tabla 7 se obtiene la respuesta de la frecuencia que muestra la Figura 29.

Tabla 7. Datos de control eléctrico WECC Caso 5.

Sistema WECC	Pmax [pu]	dPmax [pu/s]
Tipo III	1	2
Tipo IV	0.95	1
FV	0.91	0

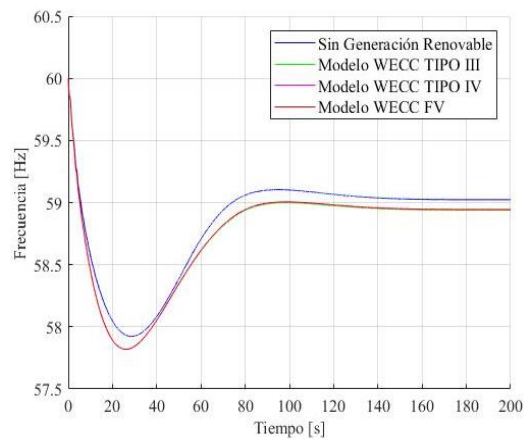


Figura 25. Resultado de estabilidad de frecuencia Caso 1.

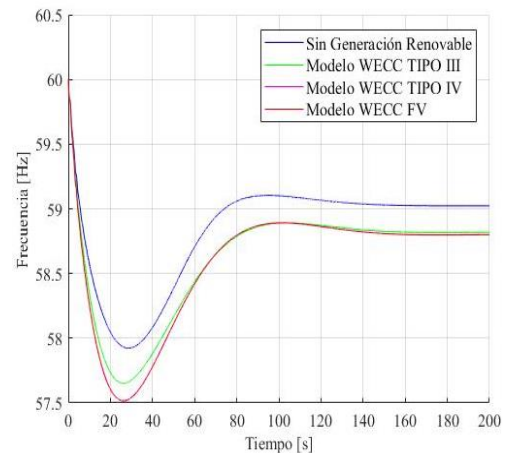


Figura 26. Resultado de estabilidad de frecuencia Caso 2.

Teniendo en cuenta que la frecuencia es un punto crítico para el sistema, los valores mínimos de frecuencia se presentan en la Tabla 8. Encontrándose que en todos los casos analizados la frecuencia retoma un valor estable luego

de sufrir la perturbación que modifica la condición operativa del SEP.

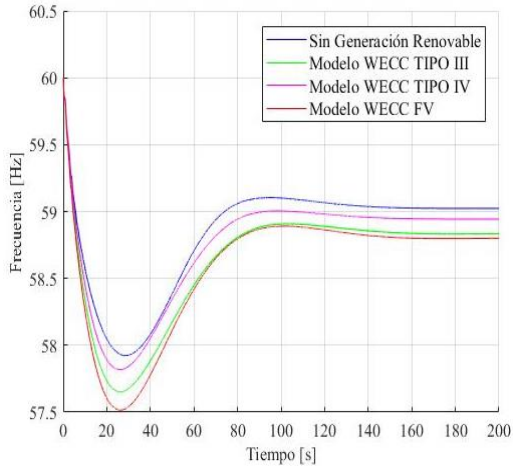


Figura 27. Resultado de estabilidad de frecuencia Caso 3.

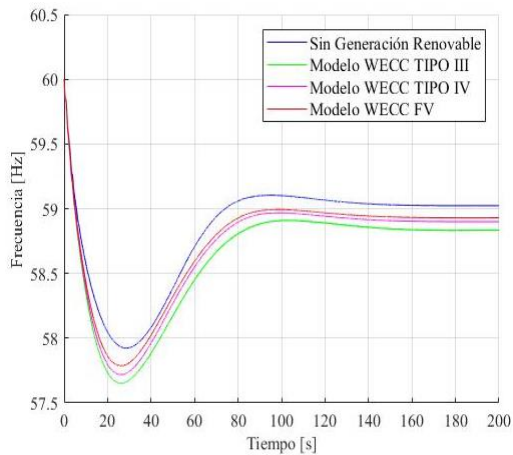


Figura 28. Resultado de estabilidad de frecuencia Caso 4.

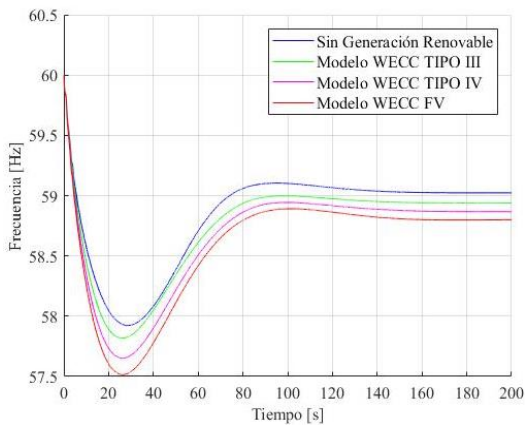


Figura 29. Resultado de estabilidad de frecuencia Caso 5.

Tabla 8. Resultado de frecuencia y tiempo del Caso 1 al Caso 5.

Sistema WECC	Frecuencia mínima		Frecuencia estable	
	f	Tiempo	f	Tiempo
	[Hz]	[s]	[Hz]	[s]
CASO 1				
Estado normal	57.923	28.592	59.021	173.002
Tipo III	57.818	26.082	58.939	171.599
Tipo IV	57.819	26.112	58.940	171.602
FV	57.821	26.122	58.941	171.603
CASO 2				
Estado normal	57.923	28.592	59.021	173.002
Tipo III	57.818	26.212	58.821	164.946
Tipo IV	57.819	26.252	58.801	167.214
FV	57.821	26.262	58.801	167.220
CASO 3				
Estado normal	57.923	28.592	59.021	173.002
Tipo III	57.818	26.212	58.835	169.824
Tipo IV	57.819	26.112	58.942	167.508
FV	57.821	26.262	58.805	170.512
CASO 4				
Estado normal	57.923	28.592	59.021	173.002
Tipo III	57.818	26.212	58.839	167.694
Tipo IV	57.819	26.182	58.910	161.741
FV	57.821	26.142	58.934	161.549
CASO 5				
Estado normal	57.923	28.592	59.021	173.002
Tipo III	57.818	26.082	58.941	167.806
Tipo IV	57.819	26.212	58.872	170.917
FV	57.821	26.262	58.822	171.302

Como era de esperarse, la frecuencia tiene valores mínimos más pequeños cuando interviene la generación renovable, esto asociado a falta de respuesta inercial de este tipo de generación.

Para los casos estudiados, los parámetros de control definidos permiten la convergencia de la simulación; además de que el sistema es estable, quedando a la espera de la actuación de la respuesta secundaria de frecuencia que permita eliminar el error de la misma.

Los casos estudiados tienen una característica teórica, es por eso que la frecuencia es demasiado baja y la respuesta es algo lenta; pero el análisis de parámetros puede ser empleado en estudios con propósitos más centrados en sistemas reales.

6 Conclusiones

Para que el sistema de potencia pueda garantizar la estabilidad de su frecuencia, se debe tomar en cuenta las respuestas inerciales de las máquinas rotativas del sistema. Cuando este sistema sufre perturbaciones ya sean internas o externas, la recuperación a estado estable de la frecuencia dependerá de la operación inicial; por lo tanto, la inercia de un sistema eléctrico de potencia es una respuesta natural giratoria de los generadores del sistema entorno a un punto de equilibrio.

Las simulaciones realizadas en el presente trabajo permiten conocer el comportamiento de la frecuencia ante un evento de desbalance entre pares eléctricos y mecánicos en el SEP de alto componente renovable, siendo esta una característica que en el futuro será una realidad nivel mundial.

Los modelos WECC son genéricos y permiten de manera extendida analizar la estabilidad de un SEP donde estos sean implementados, necesitando modificar ciertos parámetros para conseguir convergencia en las simulaciones.

Es de suma importancia el estudio de la implementación de energía renovable eólica y fotovoltaica en el sistema, ya

que este tipo de generación no consume combustibles fósiles, por lo tanto, se lo implementa cada vez más en los sistemas eléctricos de los países, lo cual es un punto positivo para el medio ambiente y varios aspectos más.

El caso de estudio resuelto permite conocer que los sistemas de generación que no poseen inercia, siempre tendrán una caída de frecuencia mayor a los sistemas de generación que sí poseen inercia.

6.1 Trabajos futuros

En base a los resultados obtenidos en el presente documento estos pueden ser la base para trabajos relacionados a:

- Implementación de energías renovables considerando la generación no inercial la eólica y fotovoltaicas en redes aisladas.
- Estabilidad de voltaje en un SEP con alta cantidad de potencia renovable instalada.
- Estabilidad de ángulo en un SEP con alta cantidad de potencia renovable instalada.

7 Referencias

- [1] M. Marinelli, S. Massucco, A. Mansoldo, and M. Norton, "Analysis of Inertial Response and Primary Power-Frequency Control Provision by Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines in a Small Power System," *17th Power Syst. Comput. Conf.*, pp. 1–7, 2011.
- [2] C. A. Ramírez and A. J. Saavedra-Montes, "Cálculo de parámetros del modelo de una turbina eólica (160 w)," *2012 IEEE 4th Colomb. Work. Circuits Syst. CWCAS 2012 - Conf. Proc.*, no. 3, 2012.
- [3] UPM, "Gráficos significativos energía solar fotovoltaica," 2017.
- [4] C. Robles and O. Rodríguez, "Un panorama de las energías renovables en el Mundo , Latinoamérica y

- Colombia,” 2018.
- [5] B. Griffa and L. Marcó, “Actualidad de la energía eólica a nivel mundial : generación , fabricantes , comercio exterior y precios .,” 2017.
- [6] P. G. A. Arenas, P. Mediavilla, F. García, “Estabilidad en los Sistemas Eléctricos de Potencia con Generación Renovable,” *OLADE*, 2013.
- [7] L. Arcos and I. Flores, “Análisis de estabilidad transitorio del sistema nacional interconectado del ecuador,” 2007.
- [8] P. Ledesma, “Regulación de frecuencia y potencia,” 2008.
- [9] R. Larrea, “Análisis de la respuesta en frecuencia en sistemas de potencia con altos niveles de generación variable sin inercia,” 2015.
- [10] L. M. R. Romo-Fernández, V. P. Guerrero-Bote, and F. Moya-Anegón, “Análisis de la producción científica española en energías renovables, sostenibilidad y medio ambiente (Scopus, 2003- 2009) en el contexto mundial,” *Investig. Bibl.*, vol. 27, no. 60, pp. 125–151, 2013.
- [11] E. Vera, “Modelación de aerogeneradores en digilent power factory para el análisis de transitorios electromecánicos,” no. mayo, 2014.
- [12] IPCC, *Fuentes de energía renovables y Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático*. 2011.
- [13] W. Vásquez, “Modelación, simulación y control de aerogeneradores con generador de inducción doblemente alimentado utilizando matlab,” no. marzo, 2014.
- [14] S. E. Reza, P. Zaman, A. Ahammad, I. Z. Ifty, and M. F. Nayan, “A study on data accuracy by comparing between the Weibull and Rayleigh distribution function to forecast the wind energy potential for several locations of Bangladesh,” *ICDRET 2016 - 4th Int. Conf. Dev. Renew. Energy Technol.*, no. July, pp. 1–5, 2016.
- [15] J. Machowski, J. W. Bialek, and J. R. Bumby, *Power system dynamics: stability and control* John Wiley & Sons,. 2011.
- [16] A. S. Fuentefria, M. C. Fernández, J. Gualberto, and B. Valerino, “La integración de la energía eólica a los sistemas eléctricos de potencia : estudio de caso en la Isla de la Juventud,” no. September 2016, 2013.
- [17] E. Gago, *Use of photovoltaic solar energy the as an energy source in the residential housing sector*. 2011.
- [18] J. Sanjuan Cigales, “Estudio y simulación de un sistema fotovoltaico de conexión a red,” p. 88, 2013.
- [19] G. F. Velasco and E. Cabrera, “Generación solar fotovoltaica dentro del esquema de generación distribuida para la provincia de Imbabura,” *Esc. Politécnica del Ejercito-Maestría en Energías Renov.*, pp. 1–7, 2009.
- [20] M. A. Mantilla, F. J. Petit, and G. O. Plata, “Control directo de potencia aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados a la red Direct power control in grid-tied photovoltaic systems,” vol. 2377, pp. 47–60, 2014.
- [21] C. A. Torres, “Conexión de un sistema fotovoltaico a la red eléctrica. Connecting photovoltaic systems to the power grid,” no. 44, pp. 31–36, 2010.
- [22] O. P. Lamigueiro, “Energía solar Fotovoltaica,” 2018.
- [23] E. E. Valencia, “Análisis de estabilidad en sistemas de potencia considerando alta penetración de generación eólica,” 2016.
- [24] P. Ledesma, “Análisis Dinámico de Sistemas Eléctricos con Generación Eólica,” 2001.
- [25] P. Pourbeik, “Model User Guide for Generic Renewable Energy System Models,” 2015.

7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 9. Matriz de estado del arte.

ESTABILIDAD DE FRECUENCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA CONSIDERANDO GENERACIÓN NO INERCIAL																						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA					RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN		SOLUCIÓN PROPUESTA				
				Estabilidad de Frecuencia	Generación Eólica	Generación Fotovoltaica	Modelos WECC	Implementación PowerFactory	Variación de frecuencia en el sistema eléctrico de potencia	Características de las diferentes tecnologías de generación eólica	Fallas internas o externas en el sistema	Inercia en el sistema eléctrico de potencia	Implementación de grandes cantidades de energía eólica y fotovoltaica	Condiciones del control eléctrico de la generación	Tiempo de falla	Potencia de inyectada en el sistema eléctrico	Flujos de potencia	Simulación Iterativa	Control de voltaje y potencia en la generación	Simulación de la estabilidad de frecuencia	Análisis del tiempo de falla en el sistema	Estudio de la inercia de las maquinas
1	2011	Analysis of Inertial Response and Primary Power-Frequency Control Provision by Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines in a Small Power System	15	X	X			X			X			X	X		X		X	X	X	
2	2012	Cálculo de parámetros del modelo de una turbina eólica (160 w)	3		X										X							X
3	2017	Gráficos significativos energía solar fotovoltaica	7		X					X												
4	2018	Un panorama de las energías renovables en el Mundo , Latinoamérica y Colombia	5			X				X												
5	2017	Actualidad de la energía eólica a nivel mundial : generación , fabricantes , comercio exterior y precios	23		X					X												
6	2013	Estabilidad en los Sistemas Eléctricos de Potencia con Generación Renovable	11	X	X	X		X	X	X			X		X		X	X				X
7	2007	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIO DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DEL ECUADOR	56	X	X	X		X	X					X	X		X	X			X	
8	2008	Regulación de frecuencia y potencia	12											X	X	X			X		X	X
9	2015	ANÁLISIS DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA EN SISTEMAS DE POTENCIA CON ALTOS NIVELES DE GENERACIÓN VARIABLE SIN INERCIA	7	X	X			X		X	X				X			X			X	X

10	2013	Análisis de la producción científica española en energías renovables, sostenibilidad y medio ambiente (Scopus, 2003- 2009) en el contexto mundial	113		X	X				X	X	X	X							X			
11	2014	MODELACIÓN DE AEROGENERADORES EN DIGSILENT POWER FACTORY PARA EL ANÁLISIS DE TRANSITORIOS ELECTROMECAÑICOS	0	X			X	X	X					X	X			X		X	X	X	
12	2011	Fuentes de energía renovables y Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático	56		X	X				X				X		X						X	
13	2014	MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y CONTROL DE AEROGENERADORES CON GENERADOR DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADO UTILIZANDO MATLAB	35		X						X	X		X		X	X		X		X	X	
14	2016	A study on data accuracy by comparing between the Weibull and Rayleigh distribution function to forecast the wind energy potential for several locations of Bangladesh	4		X																		
15	2011	Power system dynamics: stability and control John Wiley & Sons	23	X				X						X	X	X		X	X		X		
16	2013	La integración de la energía eólica a los sistemas eléctricos de potencia : estudio de caso en la Isla de la Juventud	31		X		X	X	X			X									X	X	
17	2011	USE OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY THE AS AN ENERGY SOURCE IN THE RESIDENTIAL HOUSING SECTOR	17			X					X							X					
18	2013	Estudio y simulación de un sistema fotovoltaico de conexión a red	4			X			X					X	X			X		X	X	X	
19	2009	Generación solar fotovoltaica dentro del esquema de generación distribuida para la provincia de Imbabura	1			X																X	
20	2014	Control directo de potencia aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados a la red	16			X		X						X		X							
21	2010	CONEXIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO A LA RED ELÉCTRICA	15			X										X	X						
22	2018	ENERGIA SOLAR Fotovoltaica	0			X				X												X	
23	2016	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN SISTEMAS DE POTENCIA CONSIDERANDO ALTA PENETRACIÓN DE GENERACIÓN EÓLICA	96			X						X		X		X					X		
24	2001	Análisis Dinámico de Sistemas Eléctricos con Generación Eólica	177	X	X			X		X	X		X	X			X	X		X	X		
25	2015	Model User Guide for Generic Renewable Energy System Models	81				X	X				X	X		X					X		X	
CANTIDAD				7	14	11	3	6	8	8	7	6	7	10	9	9	5	7	6	6	9	6	12

7.2 Resumen de Indicadores

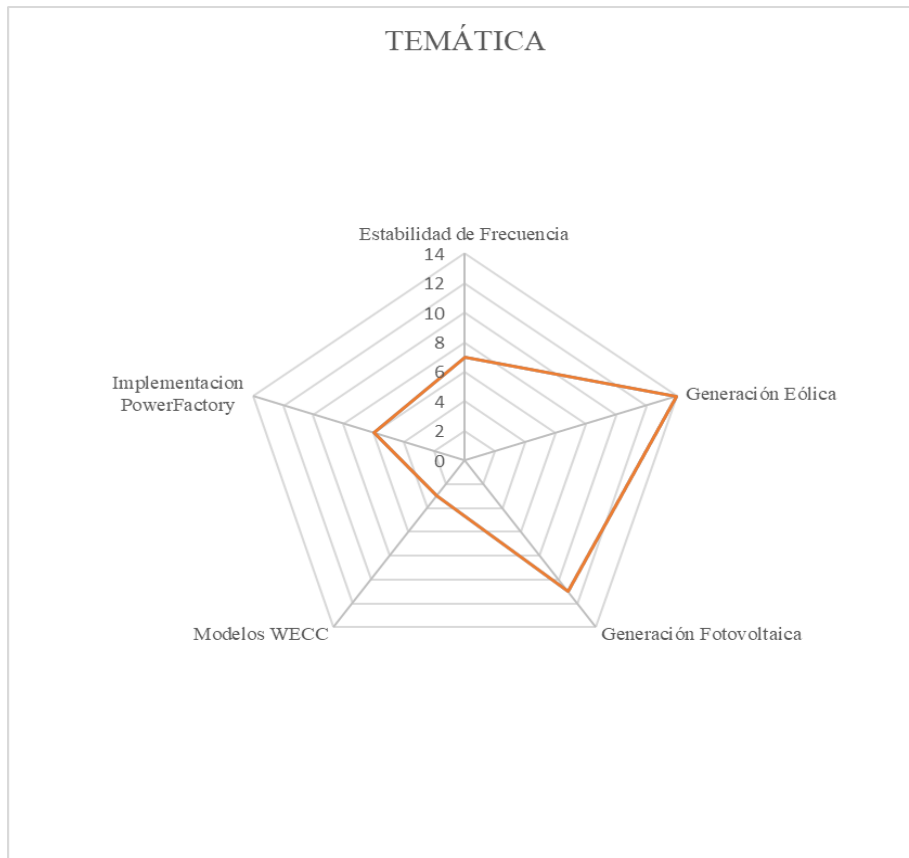


Figura 30. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

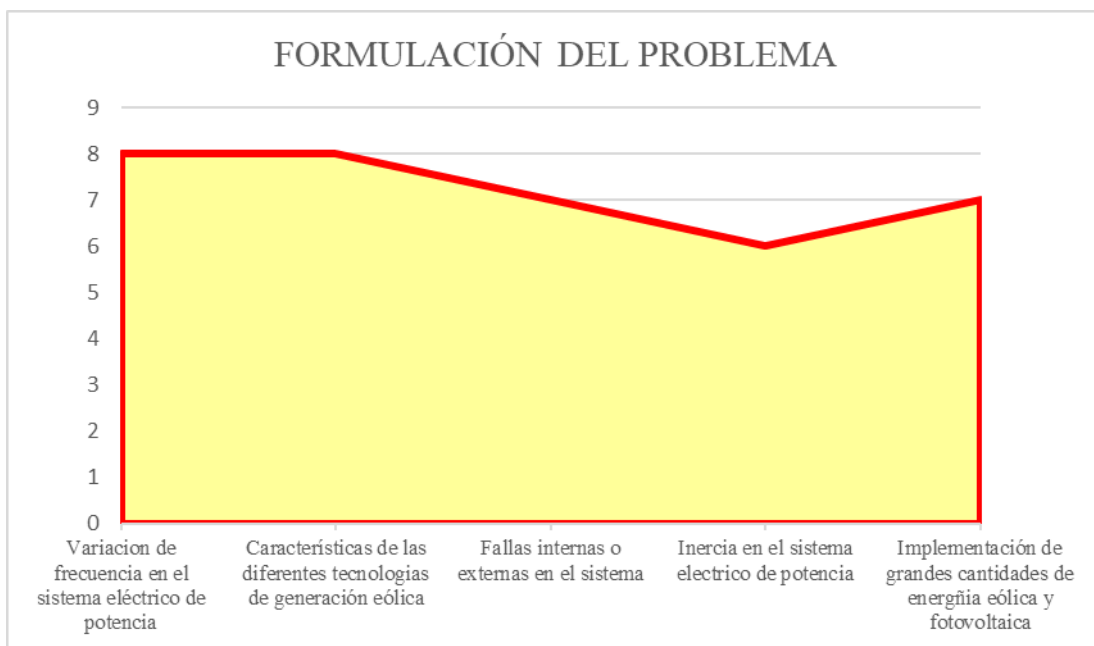


Figura 31. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

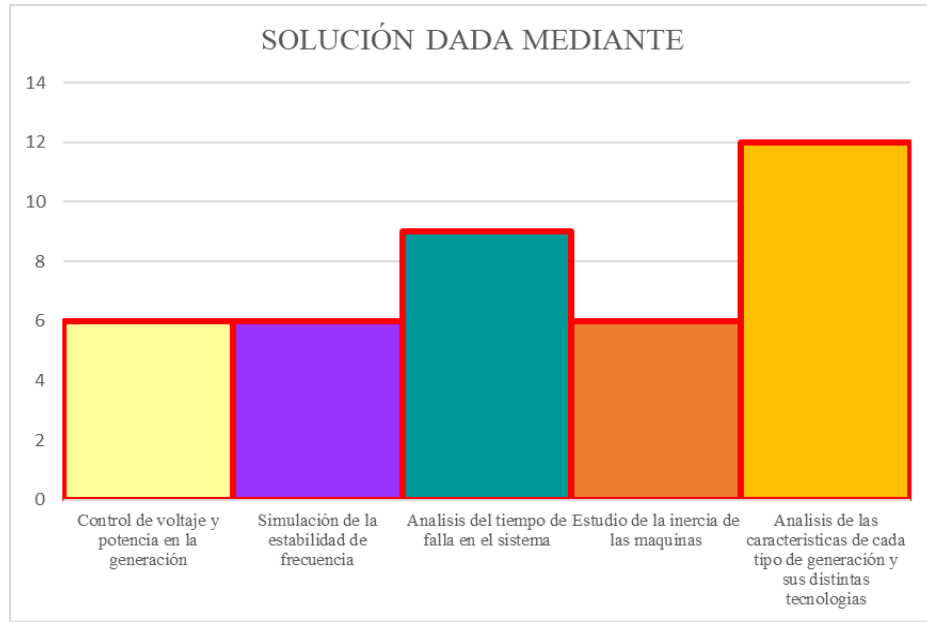


Figura 32. Indicador de solución - Estado del arte.