



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

**MITIGACIÓN DE PERTURBACIONES RÁPIDAS DE VOLTAJE FLICKER EN  
REDES DE DISTRIBUCIÓN CON CONEXIÓN A GRANJAS EÓLICAS MEDIANTE  
INYECCIÓN DE POTENCIA REACTIVA CONTROLADA POR FACTS.**

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

AUTOR: KEVIN JOEL VELA PALAQUIBAY  
TUTOR: MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE

Quito - Ecuador  
2024

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

Yo, Kevin Joel Vela Palaquibay con documento de identificación No. 1726548363 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.

Quito, 1 de Abril del año 2024

Atentamente,



---

Kevin Joel Vela Palaquibay

1726548363

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

Yo, Kevin Joel Vela Palaquibay con documento de identificación No. 1726548363, 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: “Mitigación de perturbaciones rápidas de voltaje flicker en redes de distribución con conexión a granjas eólicas mediante inyección de potencia reactiva controlada por FACTS”, 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.

Quito, 1 de Abril del año 2024

Atentamente,



---

Kevin Joel Vela Palaquibay

1726548363

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Manuel Darío Jaramillo Monge con documento de identificación No. 1714298005, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MITIGACIÓN DE PERTURBACIONES RÁPIDAS DE VOLTAJE FLICKER EN REDES DE DISTRIBUCIÓN CON CONEXIÓN A GRANJAS EÓLICAS MEDIANTE INYECCIÓN DE POTENCIA REACTIVA CONTROLADA POR FACTS, realizado por Kevin Joel Vela Palaquibay con documento de identificación No. 1726548363, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 1 de Abril del año 2024

Atentamente,



---

Ing. Manuel Darío Jaramillo Monge, MSc

1714298005

## ÍNDICE GENERAL

1	Introducción .....	2
2	Marco teórico.....	3
2.1	Calidad en la red de distribución .....	3
2.2	Perturbaciones rápidas de voltaje.....	4
2.2.1	Causas .....	4
2.2.2	Consecuencias a la percepción del ojo humano.....	5
2.3	Influencia de conexión-desconexión de carga en la presencia de FLICKER. 5	
2.3.1	Entrada y salida repentina de carga.....	6
2.3.2	Ingreso de generación eólica y PV.....	6
2.4	Importancia de la potencia reactiva en el sistema de potencia.....	6
2.4.1	FACTS como alternativa de mejora .....	7
3	Metodología.....	7
3.1	Descripción de la metodología .....	8
3.1.1	Medición de Flicker .....	8
3.1.2	Uso del D-STATCOM .....	10
3.2	Wind Farm.....	10
3.3	Funcionamiento del DSTATCOM.....	11
3.4	D-STATCOM enfocado a la mitigación de Flicker.....	12
3.5	Casos de estudio .....	13
3.5.1	Carga dinámica conectada al sistema. ....	13
3.5.2	Sistema de distribución conectado a granja eólica.....	13
3.5.3	Sistema de distribución conectado a granja eólica y D-STATCOM.....	13
4	Análisis de Resultados .....	14
4.1	Carga Dinámica y su efecto en el sistema de Distribución.....	14
4.1.1	Flicker sin carga dinámica.....	14
4.1.2	Flicker con carga dinámica .....	14
4.1.3	Perfiles de Voltaje – Caso 1.....	15
4.2	Sistema de distribución con conexión a Wind Farm. ....	15
4.2.1	Flicker con el sistema conectado a la WF .....	15
4.2.2	Perfiles de Voltaje – Caso 2.....	16
4.3	Sistema de distribución con conexión a la WF y el D-STATCOM.....	16
4.3.1	Perfiles de Voltaje – Caso 3.....	17
5	Valoración económica del D-STATCOM .....	17
6	Conclusiones.....	18

7	Trabajos Futuros.....	18
8	Referencias.....	18
9	Matriz de Estado del Arte.....	22
9.1	Resumen de Indicadores.....	25

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de simulación lámpara-ojo-cerebro.....	9
Figura 2. Modos de operación del D-STATCOM.....	10
Figura 3. Esquema general de la conversión de potencia de turbinas eólicas.....	10
Figura 4. Diagrama granja eólica conectada a la red. ....	11
Figura 5. Diagrama unifilar simplificado del D-STATCOM conectado a la red.....	12
Figura 6. Diagrama unifilar del sistema de prueba IEEE de 34 barras. ....	13
Figura 7. Caso 1, carga dinámica conectada al sistema. ....	13
Figura 8. Escenario 2, granja eólica conectada al sistema IEEE de 34 barras. ....	13
Figura 9. Escenario 2, esquema de conexión D-STATCOM, con granja eólica en el PCC del sistema de prueba. ....	14
Figura 10. Boxplot de valores Pst del sistema sin carga dinámica. ....	14
Figura 11. Boxplot de valores Pst del sistema con carga dinámica. ....	15
Figura 12. Boxplot de valores Pst del sistema con ambos escenarios del caso 1.....	15
Figura 13. Voltajes en las barras sin y con carga dinámica, caso 1. ....	15
Figura 14. Boxplot de valores Pst del sistema con acople de la granja eólica. ....	16
Figura 15. Boxplot de valores Pst del sistema, comparación de ambos escenarios.....	16
Figura 16. Perfiles de Voltaje en escenario con conexión a WF, caso 2. ....	16
Figura 17. Boxplot de valores Pst del sistema con conexión a la granja eólica y al D-STATCOM.....	17
Figura 18. Boxplot de valores Pst del sistema comparación de ambos escenarios del caso 3. ....	17
Figura 19. Voltajes en los nodos con escenarios sin WF, con WF y conexión del D-STATCOM.....	17
Figura 20. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	
Figura 21. Indicador de formulación del problema – Estado del arte.....	25
Figura 22. Indicador de solución propuesta – Estado del arte. ....	26

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de Boxplots del Pst para el caso de estudio 1. ....	15
Tabla 2. Datos de Boxplots del Pst para caso de estudio 2. ....	16
Tabla 3. Datos de Boxplots del Pst para caso de estudio 3. ....	17
Tabla 4. Matriz de Estado del Arte. ....	22

# MITIGACIÓN DE PERTURBACIONES RÁPIDAS DE VOLTAJE FLICKER EN REDES DE DISTRIBUCIÓN CON CONEXIÓN A GRANJAS EÓLICAS MEDIANTE INYECCIÓN DE POTENCIA REACTIVA CONTROLADA POR FACTS.

## Resumen

El presente escrito tiene como finalidad demostrar la importancia de la compensación de potencia reactiva en los sistemas eléctricos para la mitigación de perturbaciones rápidas de voltaje Flicker que se da comúnmente en sistemas con presencia de generación eólica; y por consiguiente, la mejora de la calidad de los sistemas de distribución. Para llevar a cabo este trabajo se escogió al sistema de prueba IEEE de 34 nodos para ser el sistema base del estudio, se simula el sistema en el software de simulación MATLAB para determinar que el sistema es estable y coincide con el voltaje nominal del sistema de prueba diseñado por la IEEE. Se busca la barra donde se presente la mayor fluctuación de voltaje en todo el sistema, concluyendo en que la barra con mayor fluctuación de voltaje es la barra 27. En esta barra se realizarán los casos de estudio, como son la conexión de la carga dinámica y la granja eólica (WF) de la librería de MATLAB, conformada por 6 turbinas de 1.5 MW. Para comprobar el aumento del índice de severidad de Flicker a corto plazo (Pst) causado por la WF y la carga dinámica, se empleará el Flickermeter del mismo software, cuyo medidor de Flicker ya se encuentra modelado de acuerdo a la IEC-61000 para medición de Pst. Para la mitigación del índice de severidad de Flicker, se utiliza un D-STATCOM de +/- 3MVAR basado en control PID, y que se conectará al sistema IEEE de 34 nodos con el objetivo de reducir las variaciones de voltaje producidas por ambas cargas.

**Palabras clave:** Perturbaciones, FACTS, Flicker, Compensador Estático Síncrono de Distribución, Granja Eólica.

## Abstract

The purpose of this document is to demonstrate the importance of reactive power compensation in electrical systems for the mitigation of fast Flicker voltage disturbances that commonly occur in systems with the presence of wind generation; and consequently, the improvement of the quality of distribution systems. To carry out this work, the 34-node IEEE test system was chosen to be the base system of the study. The system is simulated in the MATLAB simulation software to determine that the system is stable and matches the nominal voltage of the system. test designed by the IEEE. The bus is searched where the greatest voltage fluctuation occurs throughout the system, concluding that the bus with the greatest voltage fluctuation is bus 27. In this bus the study cases will be carried out, such as the connection of the dynamic load and the wind farm (WF) from the MATLAB library, made up of 6 1.5 MW turbines. To check the increase in the short-term Flicker severity index (Pst) caused by WF and dynamic loading, the Flickermeter of the same software will be used, whose Flicker meter is already modeled according to IEC-61000 for measurement. of Pst. To mitigate the Flicker severity index, a +/- 3MVAR D-STATCOM based on PID control is used, which will be connected to the 34-node IEEE system with the objective of reducing the voltage variations produced by both loads.

**Keywords:** Disturbances, FACTS, Flicker, Static Synchronous Compensator for Distribution, Wind farm.



# 1 Introducción

Los sistemas de distribución trifásicos compuestos por cuatro hilos (four-wires) son de mucha utilización dentro del suministro de energía hacia las cargas de bajo voltaje, ya sean de tipo industriales, comerciales o residenciales. Gran parte de dichas cargas son desequilibradas y no lineales, lo cual ocasiona diversos problemas que afectan de manera negativa a la calidad de la energía (PQ) en los sistemas.

Sin dejar de lado que la aparición y el creciente desarrollo que se ha visto con las Smart Grids (SG) también trae consigo muchos nuevos problemas de calidad de energía como mala regulación de voltaje, corrientes armónicas, corrientes considerables en el neutro, alta demanda de potencia reactiva, desequilibrio de cargas, por mencionar algunos [1].

Con el crecimiento de las SG también entra en el tema, la generación distribuida (GD) o en pocas palabras la Generación junto a la carga, que a su vez incluye a las energías renovables con énfasis en la generación eólica y fotovoltaica (PV) debido a la relativa menor inversión y menor emplazamiento necesario (en el caso de la PV) para su puesta en marcha, comparada con otros tipos de generación de la misma índole como la hidroeléctrica.

La expansión de las Smart Grids sumada a la presencia de recursos limitados para la energía convencional ha aumentado la demanda de suministros de energía renovables debido a sus características ventajosas inherentes, como la capacidad de regeneración, disponibilidad constante, propiedades libres de contaminación y bajo costo de mantenimiento después de la puesta en servicio [2].

Sin embargo, existen también desventajas o inconvenientes que generan

las energías renovables en los sistemas eléctricos, con respecto a la energía eólica, esta posee cierto grado de incertidumbre debido al comportamiento inconsistente y estocástico de la velocidad del viento, siendo también la energía eólica la que se da con mayor discontinuidad de entre todas las energías renovables.

Esta discontinuidad dentro de la generación eólica da lugar a la presencia de inestabilidad dinámica en las granjas eólicas interconectadas como microrredes, ya que si se toma en cuenta las variaciones en la carga y a la vez las intermitencias de las turbinas aerogeneradoras como resultado se tiene una red eléctrica propensa a sufrir problemas de estabilidad.

Los problemas de inestabilidades de voltaje ocurren debido a cambios abruptos de carga y es aquí donde se evidencia la importancia de buscar soluciones para evitar estas inestabilidades de voltaje.

El control de la potencia reactiva es esencial para estabilizar el voltaje y el suministro de energía a las líneas eléctricas existentes, ya que una gran cantidad de recursos de energía eólica intermitente descentralizada necesitan una reserva de energía reactiva para entregar energía estable a la carga.

La forma más eficiente de controlar la utilización y generación de potencia reactiva es mediante dispositivos flexibles de transmisión de corriente alterna (FACT) [3]. Con el motivo de solucionar los problemas PQ en los sistemas eléctricos surgen normativas para el control y mejora de este problema, se abren paso también los dispositivos que emplean la electrónica de potencia [1].

Estos dispositivos o equipos basados en electrónica de potencia son comúnmente llamados controladores o Flexible Altern

Current Transmission Systems (FACTS por sus siglas en inglés), son capaces de llevar a cabo un control rápido del voltaje conectados en derivación, además de permitir un control de potencia reactiva PQ. Entre estos dispositivos, el controlador unificado de flujo de energía (UPFC) está equipado con una parte en derivación para el control de voltaje, que básicamente funciona como un STATCOM.

También se tienen FACTS conectados en serie que pueden usarse para el control de voltajes, sin embargo, la razón principal para instalarlos de esta manera, es de controlar la potencia activa, que influye indirectamente en los voltajes.

Los primeros dispositivos introducidos se basaban en tiristores como elementos activos, posteriormente surgieron dispositivos que emplean convertidores de fuente de voltaje (VSC) [4].

Uno de estos dispositivos más populares enfocados en solventar estos problemas para sistemas con niveles de voltaje para distribución son los Compensadores Estáticos de Distribución o DSTATCOM (por su nombre en inglés Distribution STATic COMPensator [1]).

El Static Var Compensator (SVC) también es un dispositivo comúnmente utilizado para regulación de voltaje, con el detalle de que está conformado por tiristores, mientras que el DSTATCOM se basa en VSC en derivación [1], [2], [4].

Sin embargo, los sistemas basados en DSTATCOM son más complejos de controlar y más costosos que los compensadores estáticos de VAR (SVC) considerando la misma clasificación de VA [1], [2].

El DSTATCOM emplean generalmente dos tipos de métodos, uno está intervenido

por inversores, mientras los otros tipos de topología están basados en transformadores [1].

## **2 Marco teórico**

### **2.1 Calidad en la red de distribución**

Cuando se habla de un SEP, una de sus partes o sectores es el de la distribución que está conformado por subestaciones, equipos y alimentadores de red, conectados entre sí, y que cumplen la función principal de proporcionar energía al usuario final, esto garantizando ciertos criterios [5], [6].

La supervisión y el control del sistema de distribución han adquirido cada vez mayor importancia, pues la energía distribuida puede verse afectada de forma negativa por distintos fenómenos propios de los sistemas eléctricos de potencia, como presencia de oscilaciones de tensión, armónicos, cortocircuitos ocasionados en la red y fallas técnicas o naturales de los componentes de la red [5].

Estos fenómenos que pueden llegar a manifestarse dentro del funcionamiento de la red, terminan por influir sobre las cualidades propias de la red de distribución como es la calidad de la energía, y de la cual se tratará en el presente escrito, con énfasis en la mitigación del flicker [5].

Las distorsiones o perturbaciones también se pueden presentar en el sistema de distribución, y están ligadas a la presencia y son proporcionales a la cantidad de generación eólica y solar-fotovoltaica presente en la red [7].

En [7], se presentan dos posibles soluciones a dichas variaciones, siendo estas, reduciendo la generación eólica y solar fotovoltaica, y segunda cambiando el consumo de carga. Sin embargo, esto conllevaría al incremento de gastos en

recursos y la segunda alternativa requiere que el cliente cambie su consumo, lo cual carece de flexibilidad.

El incremento de la presencia de autos eléctricos enchufables PEV en un sistema de distribución, está directamente relacionado con el incremento de generación PV, debido a los beneficios económicos y ambientales que estas dos tecnologías representan [8].

A pesar de los beneficios económico-ambientales, en [8] se explica que mediante probabilidad se ha determinado un inminente aumento en los voltajes provocado por la inclusión de generación PV, ocasionando también problemas PQ en la red por intermitencia solar y el dinamismo de los PEV.

Estos problemas PQ que se pueden dar, se explica en [9], pueden ser armónicos de voltaje, caídas de voltaje, desequilibrio de voltaje y perfil de voltaje de estado estable en cada barra del sistema de distribución.

Actualmente con la presencia de IED's se ha puesto mayor énfasis en la calidad de la energía como protección de equipos y clasificar el estado de la energía. Es necesario identificar con precisión el tipo de perturbaciones en la calidad de la energía y detectar el índice de perturbación al que corresponde [10].

Un reto para conseguir identificar las perturbaciones y clasificarlas es el monitoreo en línea de la calidad, el cual se ha transformado en foco, pero también en una dificultad para los investigadores dentro de la calidad de energía en redes de distribución [10].

En [11] y [12], los autores afirman que la calidad de la energía en una red viene dada exclusivamente por la calidad de la tensión.

## 2.2 Perturbaciones rápidas de voltaje

Como ya se mencionó en el apartado de la calidad de la energía, esta se evalúa como una desviación del voltaje sinusoidal normal y las formas de onda de corriente en la red del sistema de energía. Las afectaciones a la calidad de la energía se pueden dar por parpadeos y distorsiones armónicas [13].

Las perturbaciones son variaciones periódicas de voltaje y frecuencia, por lo general, entre un rango de 0.5 y 25 Hz. Los límites para voltajes superiores a los 132 kV, son una severidad de parpadeo con valores de 0.8 unidades a corto plazo, y 0.6 unidades a largo plazo, respectivamente [13].

Para tensiones inferiores o iguales a los 132 kV una severidad de parpadeo de 1.0 unidades a corto plazo, y una severidad de parpadeo con valores de 0.8 unidades a largo plazo. Aunque estos límites dependerán del código de red local en el que se realice el estudio de flicker [13].

### 2.2.1 Causas

Estas perturbaciones ocurren debido a, como su nombre indica, fluctuaciones rápidas de voltaje, las cuales son causadas por pulsaciones de potencia activa P, o también por cambios en la carga del sistema, que contribuyen a alzas y bajas de los niveles de voltaje, así es como se generan esas "pulsaciones" que producen una especie de parpadeo el lámparas, focos, reflectores [14].

A su vez estas perturbaciones o pulsaciones se originan debido al desequilibrio de voltajes producto de la conexión de cargas desequilibradas en las fases de la red consumiendo corrientes y voltajes desequilibrados, o factores como puntos de contacto defectuosos, defectos en

los dispositivos de accionamiento y devanados de los motores eléctricos [12].

La presencia de Flicker también puede deberse a las condiciones de la red de distribución como la relación SCR y X/R; sin embargo la principal de las razones es la implementación de energía eólica y PV, ya que sus recursos de obtención como son viento e irradiancia, poseen un comportamiento estocástico [13], [15].

Son variaciones periódicas de voltaje y frecuencia, típicamente entre 0,5 y 25 Hz. La potencia de salida oscilatoria producida por los aerogeneradores puede provocar parpadeos en un sistema de potencia. Las fluctuaciones debidas a la sombra de la torre y los efectos de turbulencia en el viento también pueden causar parpadeos [13].

La norma IEC 61400-21 brinda una forma de medición con el fin de calcular el impacto de del parpadeo de las turbinas eólicas. Los armónicos se pueden inyectar en el lado de la generación como en el del usuario final [13].

Hablando del viento como un de las causas del flicker, es una fuerza motriz que cambia muy rápidamente. Para turbinas eólicas de velocidad constante, la fluctuación de la fuerza motriz conducirá directamente a la fluctuación de la  $P_{out}$ , debido a la ausencia de un amortiguador entre la entrada de la  $P_{mec}$  y la  $P_{out-electrica}$  [16].

### **2.2.2 Consecuencias a la percepción del ojo humano**

En la historia del ser humano se ha apoyado de la luz como un agente físico importante ya que hace posible que todos los elementos que nos rodea sean cómodamente visibles, permitiendo así el desenvolvimiento óptimo del ser humano en sus actividades manteniendo un confort visual.

En la vida urbana moderna, ha aumentado la probabilidad de observar patrones visuales que pueden resultar incómodos de mirar y producir efectos aversivos, por lo tanto, comprender los factores relacionados con el malestar visual es una cuestión importante tanto desde el punto de vista científico como práctico [17].

El confort visual, en las sociedades actuales, es imprescindible para el desarrollo de las mismas, siendo este necesario para los ámbitos educativo, laboral, incluso de ocio, donde la fatiga visual producida por distorsión lumínica, puede representar un malestar para el cliente del servicio eléctrico [18].

Ciertos patrones visuales pueden producir afecciones como dolor de cabeza, migraña e incluso convulsiones en observadores con tendencia a sufrir de epilepsia fotosensible, y suelen ser incómodos de visualizar para observadores normales [17].

En [18], se llevó a cabo un estudio de incidencia de flicker sobre 30 estudiantes graduados de la Universidad de Shenzhen de entre 22 y 30 años, BC se puede disminuir reduciendo el brillo de la superficie de la lámpara y aumentando el brillo del fondo, y a distintas frecuencias para cada grupo de personas. Tomando en cuenta que el efecto de flicker depende del número de cambios de luminancia por segundo, la duración total de los cambios, y la relación de la luminancia máxima y mínima dentro de cada periodo de observación.

### **2.3 Influencia de conexión-desconexión de carga en la presencia de FLICKER**

La presencia de Flicker dependerá mucho del contexto o escenario, ya que dependiendo de las condiciones de la red en determinadas zonas, habrá presencia de

Flicker debido a cambios en el flujo de la carga, por “x” razón como conexión y desconexión de carga [14].

### **2.3.1 Entrada y salida repentina de carga**

Cuando en un sistema eléctrico de potencia se da una falla es importante el pronto aislamiento de la misma, es cuando entran los dispositivos de protección, como son los relés que al momento de actuar mediante desconexión, producen perturbaciones de voltaje en el SEP.

De igual forma al restaurar una parte del sistema previamente desconectada por condición de falla, es importante un análisis de la perturbación con el fin de tener la seguridad de que es factible volver a reconectar y que no se está energizando equipos defectuosos hacia el sistema.

Así el análisis de las perturbaciones no sirve únicamente para mejorar la calidad de la energía en la distribución de energía, sino también contribuyen a la mejora de los sistemas de protección aportando así también a la confiabilidad del sistema [3], [14].

Con la implementación progresiva de las microrredes dentro de la distribución de la energía, han surgido nuevos servicios como la respuesta a la demanda (DR), que permite que la carga y otros recursos DER brinden capacidad al sistema de energía en respuesta a las contingencias de la red y las señales de precios del mercado [14].

### **2.3.2 Ingreso de generación eólica y PV**

La generación distribuida se ha extendido en los últimos años debido a la necesidad de llevar energía a zonas con un alcance un tanto complejo con respecto a las centrales generadoras. Como apoyo surgieron las microrredes que se basan en energías renovables y convencionales, siendo en su mayoría del primer tipo.

Sin embargo, las energías renovables constituyen uno de los principales motivos de presencia de perturbaciones debido a la implementación de energía eólica y PV, pues se obtienen a partir del viento y la irradiancia respectivamente, recursos que poseen un comportamiento estocástico y que pueden producir cambios rápidos y repentinos de voltaje dando lugar al parpadeo o Flicker [14], [15].

Las energías renovables son el componente fundamental de la microrred AC. La alta penetración de energía eólica y solar fotovoltaica en la red de distribución provoca tensiones desequilibradas, subidas de tensión, fluctuaciones e incertidumbres internas y externas que provocan perturbaciones poniendo en riesgo la confiabilidad del sistema [19].

## **2.4 Importancia de la potencia reactiva en el sistema de potencia**

Los efectos de la potencia reactiva influyen en el rendimiento del sistema de potencia y el valor nominal de equipos. Además para la transmisión de potencia reactiva a través de líneas y transformadores y el suministro de potencia reactiva por parte de las unidades generadoras en centrales de generación, requieren de una mayor potencia de los equipos [20].

La transmisión de potencia reactiva también provoca una mayor caída de tensión en cualquier equipo, lo que influye de manera significativa en el control de tensión en los sistemas de potencia [20].

Sin embargo, cuando existe generación eólica o solar-fotovoltaica conectada a una red, esta debido a la aleatoriedad del comportamiento de su recurso primario (viento y radiación solar respectivamente), puede afectar de manera negativa en el

voltaje de nodo en el PCC, y también traerá consigo afectaciones en la operación estable y calidad del sistema [21].

#### **2.4.1 FACTS como alternativa de mejora**

Con el desarrollo de la tecnología en la electrónica de potencia, en especial el desarrollo de los semiconductores de alto voltaje y potencia, la electrónica de potencia comenzó a desempeñar un papel importante en los sistemas de potencia, mejorando rendimiento, costo y capacidad de control [22].

Varias han sido las técnicas que se han ido desarrollando y discutiendo en el campo de la compensación para sistemas de transmisión y distribución bajo la denominación de sistemas de transmisión flexibles en corriente alterna (FACTS) [22], [23].

Entre las funciones que pueden cumplir los FACTS, pueden actuar como filtros a la vez que actúan como compensadores. Con enfoque en esta última función de un compensador electrónico de potencia (estático), ya sea que este se encuentre conectado en una línea de transmisión o en una línea de distribución, su objetivo será el de aumentar la capacidad de transferencia de potencia de la línea, maximizar la eficiencia de la transferencia de potencia, mejorar la estabilidad del voltaje y del ángulo, para cumplir con criterios de estabilidad o de calidad de la energía que es recibida por el usuario final.

Como se mencionó anteriormente, los equipos basados en electrónica de potencia, generalmente llamados controladores o dispositivos FACTS, pueden usarse para un control rápido del voltaje y de potencia reactiva.

Los primeros dispositivos FACTS se basaban en tiristores como elementos activos, no obstante, recientemente se han

introducido dispositivos que utilizan convertidores de fuente de voltaje o Voltage Source Converter (VSC por sus siglas en inglés), con el cual se consigue un control más rápido y potente.

Los dispositivos FACTS utilizados para el control de voltaje están conectados en derivación. En [4] se tratan con mayor énfasis, dos de estos dispositivos: el compensador estático de VARS (SVC) y STATCOM.

El SVC está conformado por tiristores, mientras que el STATCOM se basa en un VSC. También hay dispositivos FACTS conectados en serie que, en principio, pueden usarse para el control de voltaje, pero la razón principal para instalar estos dispositivos es controlar la potencia activa, que influye indirectamente en los voltajes [4].

Los FACTS incluyen, entre otros tipos de compensadores, el compensador estático síncrono (STATCOM), el compensador estático síncrono en serie (SSSC), el controlador de flujo de potencia interconexión (IPFC), el controlador de flujo de potencia unificado (UPFC) y el controlador de semiconductores desfasador controlado [23].

El controlador unificado de flujo de energía (UPFC) está equipado con una parte en derivación para el control de voltaje, que básicamente funciona como un STATCOM [4], [23].

El compensador estático síncrono STATCOM conectado en redes de distribución (D-STATCOM), donde el único objetivo es el intercambio de potencia reactiva [24].

### **3 Metodología**

Un sistema de distribución en el que se encuentran presentes las fuentes de energía

PV o generación eólica puede verse afectado en la calidad del producto que ofrece, uno de estos inconvenientes del suministro eléctrico en el área de la distribución corresponde al Flicker o aquellas perturbaciones rápidas de voltaje que pueden afectar en la salud y el desempeño del cliente.

El Medidor de Flicker o, Flickermeter por su nombre en inglés, es un instrumento diseñado con el objetivo de sensar cualquier cantidad representativa de parpadeo o Flicker presente en la red [25].

Es así que la metodología por la que se ha optado es la de comparar la incidencia de severidad de Flicker en el sistema IEEE de 34 barras, en tres casos y que se tratarán con detalle a continuación.

El sistema IEEE de 34 barras corresponde a un alimentador ubicado en el estado de Arizona al suroccidente de los estados Unidos. Posee un voltaje nominal de 24.9 kV, tiene una única unidad generadora, no contiene transformadores y tiene un recuento total de 29 cargas alojadas en los distintos nodos del sistema.

### **3.1 Descripción de la metodología**

El medidor de flicker o flickermeter está diseñado por la norma IEC 61000-4-15 en la que se establece el conjunto de parámetros de medición del índice de severidad de Flicker [26].

#### **3.1.1 Medición de Flicker**

Bajo la normativa antes mencionada, la medición de Flicker se realiza a través de 5 módulos procedimentales, cuyos módulos en conjunto conformarán la simulación de respuesta lámpara-cerebro [26], [27], [28], [29].

Para entenderlo de mejor manera, se puede separar los 5 módulos que conforman la simulación lámpara-ojo-cerebro en tres

etapas de simulación que serán explicados a continuación:

#### ***Etapa 1- Módulo 1.***

Que se encargará de normalizar la señal de entrada y pasarla a una señal de referencia en base a los  $V_{RMS}$  del sistema.

#### ***Etapa 2- Módulos 2, 3, 4.***

Compone la simulación de la percepción humana de perturbaciones ojo-cerebro. Empezando por el Módulo 2 se encarga de aplicar un multiplicador cuadrático para recuperar la fluctuación de voltaje elevando al cuadrado la tensión de entrada escalada al nivel de referencia, logrando así simular el comportamiento que tendría una lámpara.

El Módulo 3 está compuesto por 2 filtros configurados en cascada, el primer filtro es de tipo pasa bajos elimina las componentes de ondulación de frecuencia doble de red en base a una  $f_c$  de 42 Hz para lámparas de 120 V a 60 Hz según la norma. El segundo filtro de tipo pasa altos de 1er orden, con una  $f_c$  de 0.05 Hz que eliminará cualquier componente de voltaje DC.

El Módulo 4 está formado por un multiplicador cuadrático y un filtro pasa bajos de primer orden, que es el último paso de la simulación de la percepción de parpadeo del ojo humano realizado en base a la respuesta de perceptibilidad en cada frecuencia encontrado en el 50% de la población analizada. A la salida del Módulo 4 se obtienen los valores de sensación de Flicker instantáneo ( $P_{inst}$ ), así terminando con la simulación de la percepción lamp-eye-brain.

#### ***Etapa 3- Módulo 5.***

Cuyo objetivo es netamente realizar el análisis estadístico de los  $P_{inst}$ , el cual se llevará a cabo muestreando el nivel del  $P_{inst}$  y subdividiéndolo en muestras de clases, normalmente con una cantidad de 256 muestras.

Una vez clasificados los valores del flicker instantáneo en las 256 clases ya se puede tomar los valores de flicker en distintos instantes de tiempo, lo que permitirá calcular los valores de los percentiles  $P_{0.1s}$ ,  $P_{1s}$ ,  $P_{3s}$ ,  $P_{10s}$  y  $P_{50s}$ , como se muestra en las ecuaciones (1)-(4).

$$P_{50s} = \frac{(P_{30} + P_{50} + P_{80})}{3} \quad (1)$$

$$P_{10s} = \frac{(P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})}{5} \quad (2)$$

$$P_{3s} = \frac{(P_{2.2} + P_3 + P_4)}{3} \quad (3)$$

$$P_{1s} = \frac{(P_{0.7} + P_1 + P_{1.5})}{3} \quad (4)$$

Donde:

$P_{50s}, \dots, P_{1s}$  Niveles de flicker superados por el 0.1, 3, 10 y 50 % durante el tiempo de observación.

Como último paso de la etapa 3 de la simulación ya se puede proceder con el cálculo de el índice de severidad de Flicker a corto plazo, como se muestra en [28] y

[30], a partir de los percentiles de flicker instantáneo cuya formulación lleva también ciertos coeficientes experimentales ( $K_n$ ) especificados en el estándar IEC-61000.

Se cuantifica como la raíz cuadrada de la suma del producto de cada nivel de flicker por su respectivo coeficiente.

$$K_{0.1s} = 0.0314$$

$$K_{1s} = 0.0525$$

$$K_{3s} = 0.0657$$

$$K_{10s} = 0.28$$

$$K_{50s} = 0.08$$

$$P_{st} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 K_{is} * P_{is}} \quad (5)$$

Donde:

$P_{st}$  Índice de severidad de Flicker a corto plazo.

$K_{is}$  Valores de los coeficientes establecidos en el estándar IEC-61000.

$P_{is}$  Valores de los niveles de flicker superados por el 0.1%, 3%, 10% y 50 %

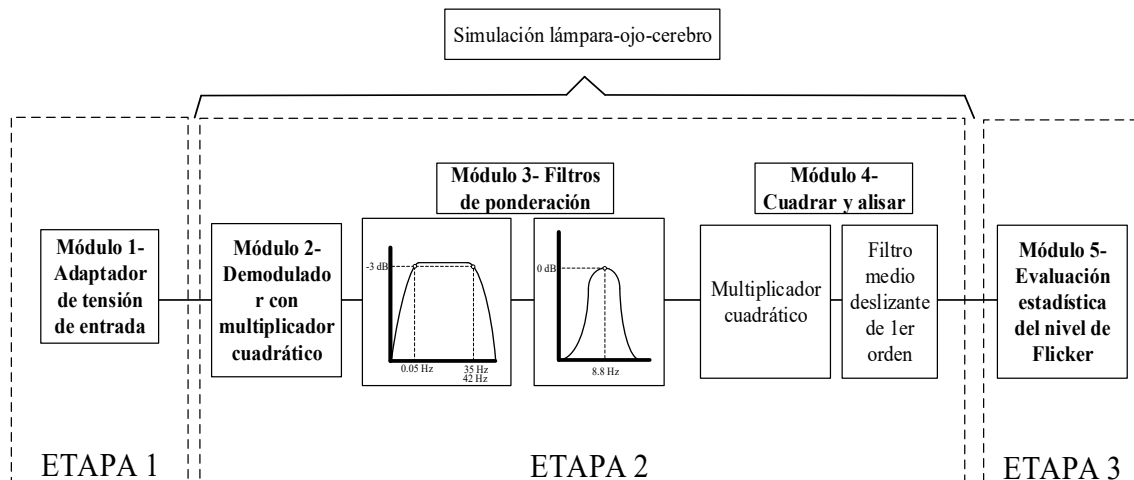


Figura 1. Proceso de simulación lámpara-ojo-cerebro.



### 3.1.2 Uso del D-STATCOM

El STATCOM con conexión a los sistemas eléctricos de distribución es conocido como D-STATCOM.

En el presente trabajo, el papel que juega el D-STATCOM es el de reducir o mitigar las variaciones o perturbaciones rápidas de voltaje que se generan como producto de la inserción de una granja eólica o Wind Farm (WF) a un sistema de distribución, concretamente el sistema IEEE de 34 buses; la WF mencionada está conformada por 6 turbinas eólicas con una potencia nominal de 1.5 MW por cada turbina, aportando al sistema de 34 barras una potencia total de 9 MW [3].

El compensador estático síncrono de potencia reactiva (STATCOM) está en la capacidad de reducir el exceso de potencia reactiva en el sistema para hacer que el sistema de energía local sea más robusto, respetuoso con el medio ambiente y flexible [22].

En [11], se implementa un D-STATCOM basado en un regulador de voltaje donde se logra un control de voltaje en el PCC consiguiendo que los cambios repentinos de carga no tengan un gran impacto en las formas de onda del voltaje.

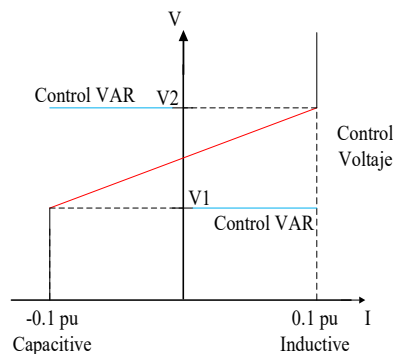


Figura 2. Modos de operación del D-STATCOM

### 3.2 Wind Farm

En los sistemas de energía eólica, la energía cinética del viento es la causante de la producción energía mecánica en las palas de los aerogeneradores (generalmente

compuestas de fibra de vidrio o fibra de carbono recubiertas por resina epoxi).

Los sistemas basados en turbinas aerogeneradoras convierten dicha energía cinética en energía eléctrica, a través del generador que está acoplado a las turbinas eólicas de velocidad variable [31].

Típicamente las turbinas eólicas oscilan su velocidad de rotación en el rango de 5 a 16 rpms, Cuando estas velocidades son bajas debido a la naturaleza, una solución muy eficiente es la de implementar una GearBox o caja de cambios

En la actualidad, el generador de inducción de doble alimentación (o DFIG por sus siglas en inglés), incorporados en conjunto con Gearbox y convertidores de potencia de alta velocidad, ocupa un gran espacio en el mercado de las tecnologías de generación eólica.

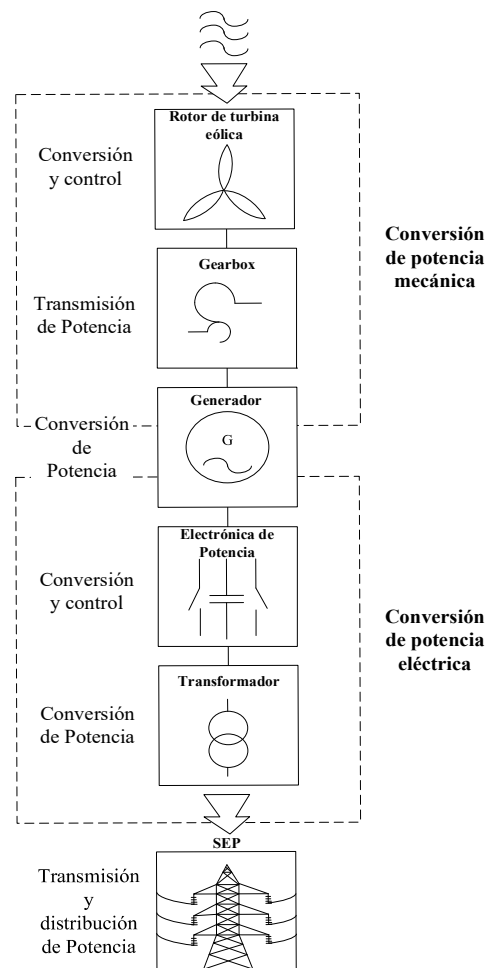


Figura 3. Esquema general de la conversión de potencia de turbinas eólicas.

Para una velocidad del viento específica la velocidad de la turbina se puede variar para llegar a una máxima eficiencia aerodinámica (alcanzar su máxima potencia de suministro) [23].

El par sigue las características convencionales de la ley del cuadrado con la velocidad y la potencia de salida sigue la ley del cubo. La potencia mecánica en el rotor está dada por:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} C_p * \rho * A * v^3 \quad (6)$$

Donde:

- $C_p$  Coeficiente de potencia, resultado del cociente entre la  $P_{mec}$  producida y la  $P_{mec}$  disponible.
- $\rho$  Densidad del aire.
- $A$  Área expuesta al flujo del viento.
- $v$  Velocidad del viento.

De acuerdo con [31], en la actualidad la energía eólica corresponde a la “energía verde” más económica.

Los avances tecnológicos en el área de la generación eólica, han permitido que esta se vuelva más competitiva versus otras generaciones renovables, inclusive casi igualando la de los combustibles fósiles.

Las granjas eólicas acoplados a la red eléctrica provocan problemas de inestabilidad del sistema, esto debido a las intermitencias que se presenta en la generación eólica debido a la naturaleza del viento, dicha estabilidad dificulta la calidad del suministro de la energía hacia el consumidor (residencial, comercial o industrial).

La estabilidad transitoria, y la regulación de voltaje y frecuencia son esenciales para

un funcionamiento estable en los sistemas eléctricos, varios investigadores han puesto su atención en estos aspectos en la literatura científica, como ejemplo, en [3], se plantea solución para el problema de la inestabilidad en los sistemas causada por la fluctuación de las cargas.

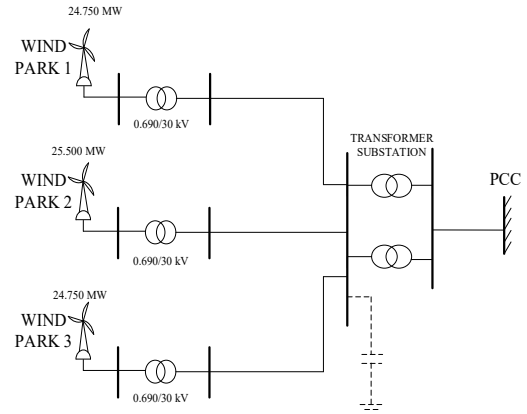


Figura 4. Diagrama granja eólica conectada a la red.

### 3.3 Funcionamiento del DSTATCOM

El comportamiento de un D-STATCOM es parecido al de un compensador síncrono, es decir dado el caso de que el voltaje generado por el D-STATCOM es menor que el voltaje en el PCC (nodo del sistema al cual se encuentra conectado), el D-STATCOM actuará como una carga inductiva extrayendo MVARs del sistema de suministro; caso contrario, actuará como un condensador en derivación generando MVARs en el sistema, cuando el voltaje generado es mayor que el voltaje del sistema.

Las variables utilizadas por el D-STATCOM para el control de potencia reactiva a la red son magnitud de voltaje y ángulo del punto de acople PCC y de magnitud de voltaje y ángulo del VSC.

El DSTATCOM utiliza las ecuaciones de potencia entre dos nodos ( $V_i$  y  $V_j$ ). Siendo  $V_i$  y  $\theta_i$ , los datos de magnitud y ángulo del voltaje en el PCC, mientras  $V_j$  y

$\theta_j$  consistirían en los datos a la salida del convertidor VSC.

Teniendo en mente que  $V_i = V_1 = V_{PCC} \angle \theta_i$ ,  $V_j = V_2 = V_{VSC} \angle \theta_j$  y  $\delta = \theta_i - \theta_j$ ; las ecuaciones de potencia se detallan en la ecuación (7), teniendo mayor relevancia para el estudio la potencia reactiva expuesta en la ecuación (8):

$$P_{DSTAT} = \frac{|V_{PCC}| * |V_{VSC}|}{X_{ij}} \sin(\delta) \quad (7)$$

$$Q_{DSTAT} = \frac{|V_{PCC}|^2}{X_{ij}} - \frac{|V_{PCC}| * |V_{VSC}|}{X_{ij}} \cos(\delta) \quad (8)$$

Donde:

$\delta$  Diferencia angular entre el  $V_{PCC}$  y el  $V_{VSC}$ .

$X_{ij}$  Reactancia correspondiente al transformador de acoplamiento.

$V_{PCC}$  Voltaje en el punto de acople.

$V_{VSC}$  Voltaje en el convertidor VSC del D-STATCOM

En operación permanente, el voltaje  $V_{VSC}$  es generado por el D-STATCOM y está en fase con el voltaje  $V_{PCC}$  ( $\delta = 0$ ), como consecuencia:  $\sin(\delta = 0) = 0$ ; y por ende una  $P_{DSTAT} = 0$ .

Teniendo únicamente flujo de potencia reactiva ( $Q_{DSTAT}$ ) del DSTATCOM hacia la red o viceversa. A partir de la ecuación (9), la cantidad de potencia reactiva se expresa como:

$$Q_{DSTAT} = \frac{|V_{PCC}|^2}{X_{ij}} - \frac{|V_{PCC}| * |V_{VSC}|}{X_{ij}} \quad (9)$$

Donde:

$X_{ij}$  Reactancia del transformador de acople.

$V_{PCC}$  Voltaje en el punto de acople.

$V_{VSC}$  Voltaje en el convertidor VSC del D-STATCOM

El DSTATCOM se conecta a través del punto de acople común al sistema donde compensará la calidad de la energía de acuerdo a la demanda de la carga, para lo que se pueden emplear distintas estrategias de control bajo cuya lógica operará el DSTATCOM, estas estrategias de control pueden ser controlador PI, teoría del marco de referencia síncrono (SRF) o d-q Theory, control por el método de Neurona Lineal Adaptativa (ADALINE), control predictivo de modelos (MPC), por mencionar algunos [32].

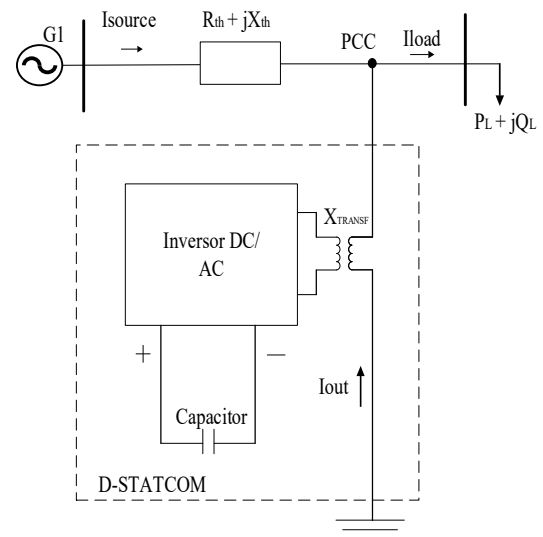


Figura 5. Diagrama unifilar simplificado del D-STATCOM conectado a la red.

### 3.4 D-STATCOM enfocado a la mitigación de Flicker

Las redes distribución al tener distancias entre nodos relativamente cortas comparadas a las conexiones que se tienen en las redes de transmisión, suelen presentar valores pequeños de resistencias e inductancias.

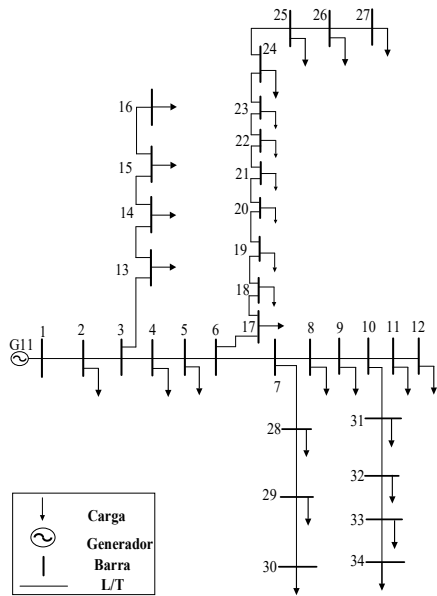


Figura 6. Diagrama unifilar del sistema de prueba IEEE de 34 barras.

### 3.5 Casos de estudio

#### 3.5.1 Carga dinámica conectada al sistema.

Para el primer caso de estudio se optó por realizar el flujo del sistema con el objetivo de encontrar la barra en la que exista una mayor caída de tensión y por ende mayor probabilidad de verse afectada por parpadeo, una vez realizada la observación antes mencionada, se identificó que la barra con mayor caída de tensión corresponde a la barra 27 del sistema.

Posteriormente se agregó un breaker que realice un “switcheo” automático en la carga de dicha barra, esto con la finalidad de simular una carga dinámica como normalmente sería el comportamiento de una granja eólica (WF).

La carga L27 se conecta a su respectiva barra con una potencia de 4.5 MW, para la conexión y desconexión de la carga se definió un escenario en el cual se generaron 100 instancias de switcheo en el breaker, que desconectará en los diez tiempos la carga vinculada al circuit breaker, simulando de esta manera el

comportamiento que tendría una WF debido a la intermitencia de la naturaleza del viento.

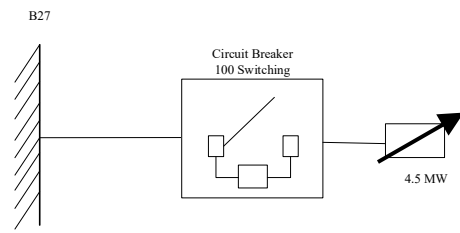


Figura 7. Caso 1, carga dinámica conectada al sistema.

#### 3.5.2 Sistema de distribución conectado a granja eólica

Una vez analizados perfiles de voltaje en las barras, los índices de severidad de Flicker (Pst) del sistema, y concluido cómo influyó la carga dinámica en la barra 27 del sistema; se procederá entonces a conectar al sistema la granja eólica WF de 9 MW (6x1.5 MW), en la barra 27 con el objetivo de comprobar cómo las energías eólica y PV pueden llegar a generar Flicker en el sistema, y cuyo problema se buscará solventar posteriormente con la conexión de un Compensador Estático Síncrono de Distribución (D-STATCOM).

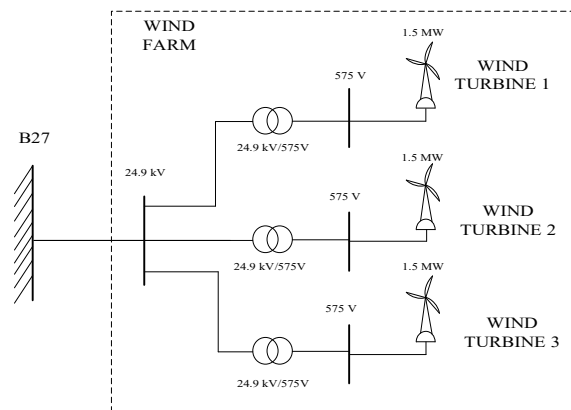


Figura 8. Escenario 2, granja eólica conectada al sistema IEEE de 34 barras.

#### 3.5.3 Sistema de distribución conectado a granja eólica y D-STATCOM.

El caso anterior con la conexión de granja eólica se generó una mayor variación en los voltajes de barra del ramal donde se

encuentra conectada la WF (Barra 27), esto por ende generó un aumento en la medición de los índices de severidad de Flicker a corto plazo Pst en las barras.

Para ello se conectará en dicha barra un DSTATCOM que se encargará de controlar las variaciones de voltaje generadas por la

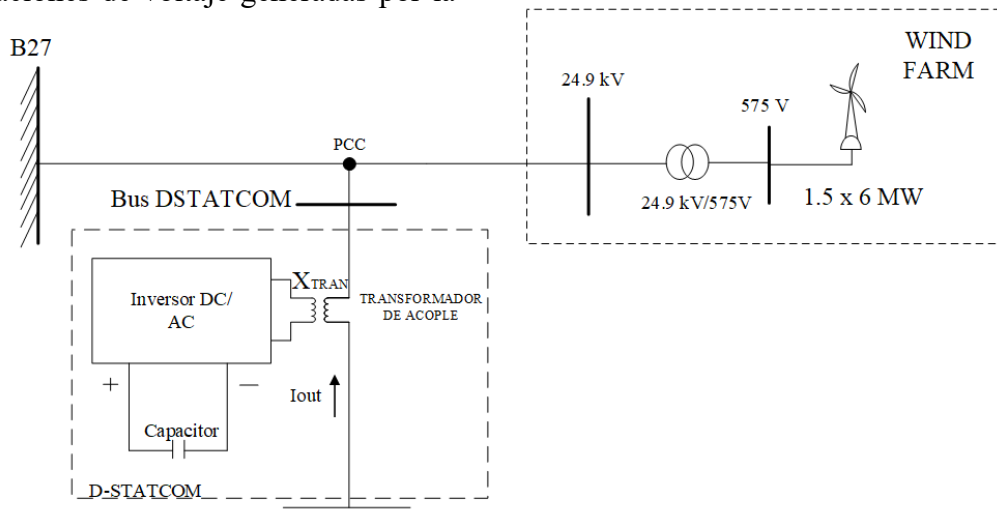


Figura 9. Escenario 2, esquema de conexión D-STATCOM, con granja eólica en el PCC del sistema de prueba.

## 4 Análisis de Resultados

Para cada caso de estudio se presentará el apartado de voltajes RMS en cada una de las barras para corroborar que efectivamente los niveles de tensión indican mayor índice de severidad de flicker Pst dependiendo de la barra del sistema, se presentarán los índices de severidad de flicker para cada una de las barras para completar el análisis antes mencionado y para finalizar se expondrán boxplots para una mejor visualización e interpretación de los resultados.

### 4.1 Carga Dinámica y su efecto en el sistema de Distribución

#### 4.1.1 Flicker sin carga dinámica

En la figura 10 se puede apreciar en la boxplot que el sistema tiene un bajo índice de severidad de Flicker, debido a que no existen grandes cargas cambiantes en el tiempo, teniendo un valor medio de  $Pst=0.4271$  y un extremo superior con un valor

granja eólica y, por consiguiente, reduciendo los índices de severidad de Flicker Pst en las barras del ramal afectado por la incidencia de Flicker a causa de la WF.

de  $Pst=0.4276$ , sin tomar en cuenta los valores atípicos de las mediciones.

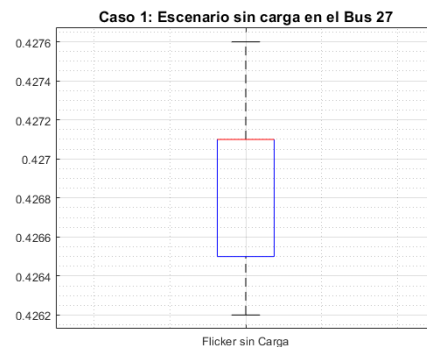


Figura 10. Boxplot de valores Pst del sistema sin carga dinámica.

#### 4.1.2 Flicker con carga dinámica

Por el contrario, cuando conectamos la carga dinámica en la barra 27 del sistema IEEE de 34 barras, en la figura 11 se observa un incremento sustancial de los índices Pst, alcanzando en la boxplot un valor medio de  $Pst=0.6626$  y un valor de  $Pst=1.9532$  para el extremo superior, sin

tomar en cuenta los valores atípicos del diagrama de caja.

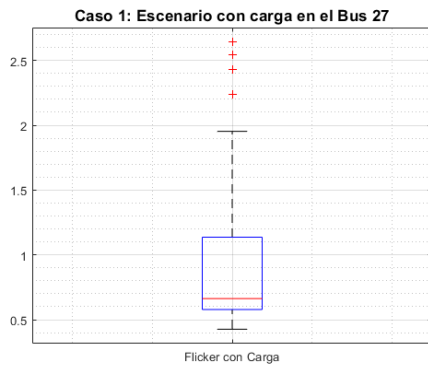


Figura 11. Boxplot de valores Pst del sistema con carga dinámica.

Se adjunta en la figura 12, el gráfico de ambas boxplot, donde se puede observar la escala de crecimiento en el nivel de Flicker para ambos casos en el que se evaluó el sistema con sin la carga dinámica, y con carga dinámica.

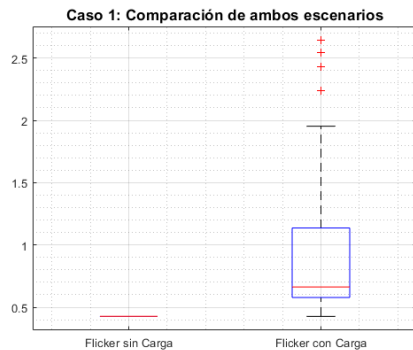


Figura 12. Boxplot de valores Pst del sistema con ambos escenarios del caso 1.

Dando como resultado de la boxplot perteneciente a los dos escenarios del caso de estudio 1 y cuyos los valores se encuentran expuestos en la tabla 1.

Tabla 1. Datos de Boxplots del Pst para el caso de estudio 1.

Datos Boxplot	Sin carga	Con carga
Extremo Superior (LS)	0.4276	2.6428
Mediana	0.4271	0.6626
Extremo Inferior (LI)	0.4262	0.4262

### 4.1.3 Perfiles de Voltaje – Caso 1

En la figura 13 se puede ver que la variación de los perfiles de voltaje para ambos escenarios (con carga dinámica y sin carga dinámica) no es una variación considerable, debido a que solo se generó 10 instancias de conexión y desconexión.

Adicionalmente la carga tiene una potencia de 4.5 MW, que corresponde a la mitad de la potencia conectada al sistema mediante la WF para el caso de estudio 2.

Es así que las variaciones en los voltajes  $dV$ , de cada nodo no terminan quedando tan alejadas del punto de referencia, en este caso un voltaje nominal de 24.9 kV, dando la impresión de que los voltajes en ambos escenarios están sobrepuestos.

Lo cual no pasará en los siguientes escenarios en los que la carga aumentará y con un comportamiento más fluctuante en el tiempo como ocurre con la naturaleza de la energía eólica.

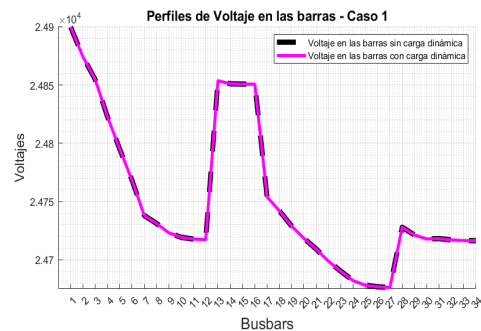


Figura 13. Voltajes en las barras sin y con carga dinámica, caso 1.

## 4.2 Sistema de distribución con conexión a Wind Farm.

### 4.2.1 Flicker con el sistema conectado a la WF

En el segundo caso de estudio, en el que se ingresó la granja eólica de 9MW al sistema, se comprueba el aumento del índice Pst en todo el sistema, ya que las variaciones en la carga (en este caso la WF), afectan a gran parte del sistema y no solo al PCC.

Mediante la figura 14, donde ya se encuentra acoplada la granja eólica al sistema, se obtiene boxplot muestra valores de  $Pst= 1.2506$  y  $Pst= 3.9198$ , para los valores de la media y el extremo superior respectivamente, sin tomar en cuenta los valores atípicos.

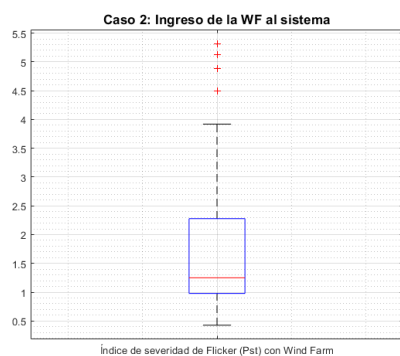


Figura 14. Boxplot de valores Pst del sistema con acople de la granja eólica.

En la figura 15 se puede observar los valores de ambos escenarios, tanto con conexión a la WF como sin ella, se puede notar el crecimiento del nivel de Flicker generado a raíz de la granja eólica y cuyos datos se pueden revisar en la tabla 2.

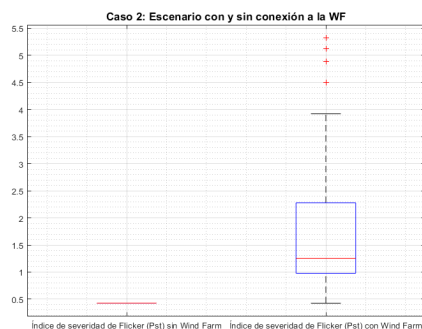


Figura 15. Boxplot de valores Pst del sistema, comparación de ambos escenarios.

Tabla 2. Datos de Boxplots del Pst para caso de estudio 2.

Datos Boxplot	Sin WF	Con WF
Extremo Superior (LS)	0.4276	5.3168
Mediana	0.4271	1.2506
Extremo Inferior (LI)	0.4262	0.4262

#### 4.2.2 Perfiles de Voltaje – Caso 2

En la Figura 16 ya se puede apreciar una diferencia considerable en los voltajes de las barras, concordando con el aumento del Flicker mostrado en la Figura 14 para este caso de estudio en específico.

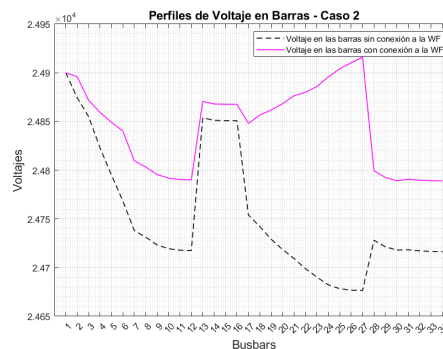


Figura 16. Perfiles de Voltaje en escenario con conexión a WF, caso 2.

### 4.3 Sistema de distribución con conexión a la WF y el D-STATCOM

El tercer caso de estudio conta de un escenario en el que se buscará mitigar el nivel de Flicker generado en caso anterior a causa del ingreso de la WF al sistema de prueba.

Como se explicó el D-STATCOM tendrá una capacidad de  $\pm 3$  MVAR y mediante lógica de control PI se logró mitigar un cierto grado el nivel de Flicker en todo el sistema.

En las figuras 17 y 18 se distingue el decrecimiento de los valores del Pst en el sistema, versus el escenario del caso 2 con el aumento del Flicker a causa de la granja eólica. Para el escenario del DSTATCOM conectado a la red se obtuvo valores de  $Pst= 1.0459$  y  $Pst= 3.2491$  para el límite superior; dichos valores se encuentran en la tabla 3.

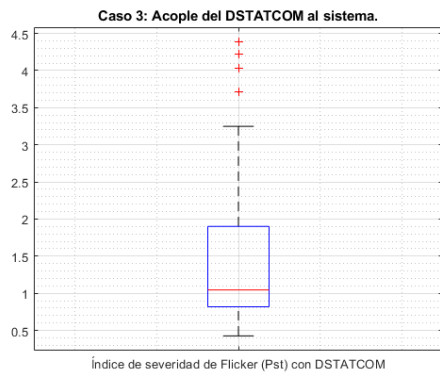


Figura 17. Boxplot de valores Pst del sistema con conexión a la granja eólica y al D-STATCOM.

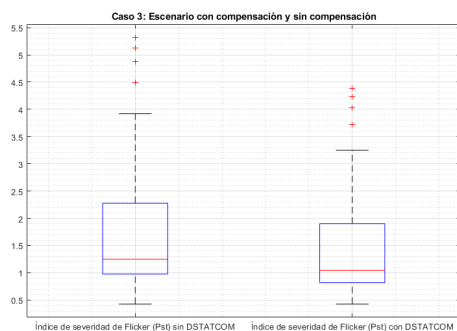


Figura 18. Boxplot de valores Pst del sistema comparación de ambos escenarios del caso 3.

Tabla 3. Datos de Boxplots del Pst para caso de estudio 3.

Datos Boxplot	WF sin DSTATCOM	WF con DSTATCOM
Extremo Superior (LS)	5.3168	4.386
Mediana	1.2506	1.0459
Extremo Inferior (LI)	0.4262	0.4262

#### 4.3.1 Perfiles de Voltaje – Caso 3

En la Figura 18 se muestra los voltajes en barras en los casos 2 y 3 que son la base del estudio, logrando una reducción de las variaciones en las variaciones de voltaje, en especial para las caídas de voltaje que se presenta desde la barra 7 hasta la barra 10 y desde la barra 28 hasta la barra 34.

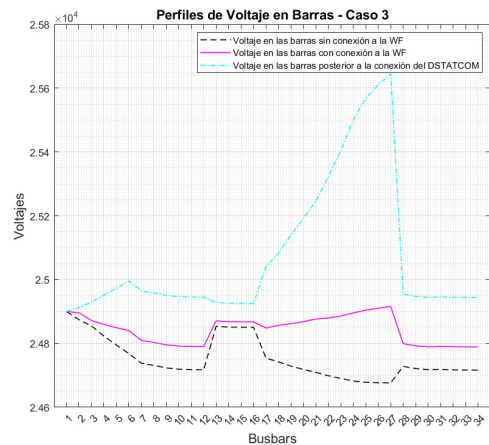


Figura 19. Voltajes en los nodos con escenarios sin WF, con WF y conexión del D-STATCOM.

## 5 Valoración económica del D-STATCOM

Como ya se mencionó en los casos de estudio, el D-STATCOM utilizado para la mitigación del índice de severidad de Flicker, fue de una capacidad de +/- 3 MVAR, para una tensión nominal de 24.9 kV a una frecuencia de 60 Hz.

Se propuso realizar una valoración económica del DSTATCOM, para ello se consultó en empresas fabricantes y proveedoras de máquinas eléctricas y en general dispositivos FACTS.

Como son ABB Group, Hitachi Energy o ZDDQ Electric en base a las especificaciones de referencia expuestas al inicio de esta sección.

Es lógico que los valores de adquisición de un D-STATCOM dependerá del país donde se lo necesito ya que intervendrá costos de exportación y demás.

Se estimó un rango de precios para un D-STATCOM de 10000 – 100000 USD, que dependerá, además de la región, de los niveles de voltaje nominal de trabajo que pueden ir desde 6 kV hasta 35 kV (24.9 kV para nuestro caso) y dependerá además de la capacidad de potencia reactiva que pueda



aportar o consumir de la red, cuyo rango iría desde +/- 1 MVAR hasta los +/- 100 MVAR.

## 6 Conclusiones

Se comprobó a través de la simulación del escenario 1, cómo las fluctuaciones de carga pueden llegar a afectar la calidad de la red, específicamente en el aumento del índice de severidad de Flicker, al escalar de un valor medio de Pst de 0.4271 a 0.6626, teniendo un crecimiento de Pst igual al +55.14%; y escalado del valor máximo de Pst de 0.4276 a 2.6428, representando un incremento del 518.1%.

Para el caso de estudio 2, la mediana del Pst pasa de 0.4271 a 1.2506, con un crecimiento de teniendo un crecimiento del 192.8%; mientras tanto el valor máximo aumentó de 1143.4%.

En el caso de estudio 3, se corroboró, cómo el D-STATCOM mediante lógica de control PI es capaz de reducir las perturbaciones que se puedan presentar en la red por intermitencias en las cargas, ya que logró mitigar un valor medio del Pst (con WF) de 1.2506 y reducirlo hasta 1.0459, siendo un decremento o mitigación de 16.37%; para los valores máximos de Pst de 5.3168 a 4.368, se calculó una reducción del 17.85% en el Pst.

Cabe mencionar que el bus con mayor presencia de Flicker consiste en el bus 27, compartiendo el valor máximo de Pst en todo el sistema igual a 5.3168; y que en el caso de estudio 3 se consiguió mitigar mediante el control de potencia reactiva del D-STATCOM, reduciéndose hasta 4.386.

## 7 Trabajos Futuros

Con la finalidad de complementar el estudio llevado a cabo, se podría realizar un análisis de THD con el objetivo de establecer una relación entre nivel de Pst y el porcentaje de

THD en sistemas eléctricos de distribución. Además, se puede dar lugar a la implementación de otro tipo de dispositivo FACT o la utilización de otra estrategia de control enfocado a la mitigación del Flicker, incluso la incorporación de sistemas de almacenamiento de energía (ESS) que ayudan a contrarrestar la intermitencia de los recursos energéticos renovables y por ende contribuyen a la reducción de la presencia de Flicker.

## 8 Referencias

- [1] S. Das, D. Chatterjee, and S. K. Goswami, "A Reactive Power Compensation Scheme for Unbalanced Four-Wire System Using Virtual Y-TCR Model," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 4, pp. 3210–3219, Apr. 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2758720.
- [2] A. Kumar and P. Kumar, "Power Quality Improvement for Grid-connected PV System Based on Distribution Static Compensator with Fuzzy Logic Controller and UVT/ADALINE-based Least Mean Square Controller," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 9, no. 6, pp. 1289–1299, Nov. 2021, doi: 10.35833/MPCE.2021.000285.
- [3] M. N. Naz, S. Imtiaz, M. K. L. Bhatti, W. Q. Awan, M. Siddique, and A. Riaz, "Dynamic Stability Improvement of Decentralized Wind Farms by Effective Distribution Static Compensator," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 516–525, May 2021, doi: 10.35833/MPCE.2018.00422.
- [4] A. G. Expósito, A. J. Conejo, and C. A. Cañizares, *Electric Energy Systems Analysis and Operation Second Edition*. 2018. [Online]. Available: <https://www.crcpress.com/Electric-Power->

- [5] J. W. Gonzalez Sanchez, "Optimization of Reclosers Placement in Distribution Networks to Improve Service Quality Indices," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 20, no. 2, pp. 241–249, 2022, doi: 10.1109/TLA.2022.9661463.
- [6] F. J. Muros, D. Saracho, and J. M. Maestre, "Improving supply quality in distribution power networks: A game-theoretic planning approach," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 213, no. December 2021, p. 108666, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108666.
- [7] X. Xiao, Z. Li, Y. Wang, Y. Zhou, and K. Liu, "Optimal Power Quality Compensation of Energy Storage System in Distribution Networks Based on Unified Multi-Phase OPF Model," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 13, no. 3, pp. 1873–1887, 2022, doi: 10.1109/TSG.2022.3146464.
- [8] A. Zahedmanesh, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, "An Adaptable Correlated Control for Maintaining Voltage Quality in Low-Voltage Distribution Grids Containing PVs and PEVs," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 18, no. 9, pp. 5804–5814, 2022, doi: 10.1109/TII.2021.3131820.
- [9] M. Bajaj, A. K. Singh, M. Alowaidi, N. K. Sharma, S. K. Sharma, and S. Mishra, "Power Quality Assessment of Distorted Distribution Networks Incorporating Renewable Distributed Generation Systems Based on the Analytic Hierarchy Process," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 145713–145737, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3014288.
- [10] Y. Xu, Y. Gao, Z. Li, and M. Lu, "Detection and classification of power quality disturbances in distribution networks based on VMD and DFA," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 122–130, 2020, doi: 10.17775/CSEEJPES.2018.01340.
- [11] R. T. Hock, Y. R. De Novaes, and A. L. Batschauer, "A Voltage Regulator for Power Quality Improvement in Low-Voltage Distribution Grids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 3, pp. 2050–2060, Mar. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2693239.
- [12] S. Neves Duarte, B. Cortes De Souza, P. MacHado De Almeida, L. Ramos De Araujo, and P. Gomes Barbosa, "A Compensation Strategy Based on Consumer's Voltage Unbalance Assessment for a Distribution Static Synchronous Compensator," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 18, no. 1, pp. 156–164, 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9049473.
- [13] Q. Wu and Y. Sun, *Modeling and Modern Control of Wind Power*. ProQuest Ebook Central, 2018.
- [14] A. Mishra, "Flicker Attenuation Using FACTS Device for DFIG-Based WECS Connected to Distribution Network," vol. 17, no. 1, pp. 282–293, 2023.
- [15] K. Rahimi, S. Omran, M. Dilek, and R. Broadwater, "Computation of Voltage Flicker with Cloud Motion Simulator," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 3, pp. 2628–2636, 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2787621.
- [16] Z. Lu and S. Zhou, *Integration of Large Scale Wind Energy with Electrical Power Systems in China*. ProQuest Ebook Central, 2018.
- [17] S. Yoshimoto, F. Jiang, T. Takeuchi, A. J. Wilkins, and M. A. Webster, "Adaptation and visual discomfort from flicker," *Vision Res.*, vol. 160, pp. 99–107, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.visres.2019.04.010.
- [18] S. Chen, Y. Lin, and H. Zhao, "Effects of flicker with various brightness contrasts on visual fatigue in road lighting using fixed low-

- mounting-height luminaires,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 136, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.tust.2023.105091.
- [19] B. Singh, F. Chishti, and S. Murshid, “Disturbance Rejection Through Adaptive Frequency Estimation Observer for Wind-Solar Integrated AC Microgrid,” vol. 15, no. 11, pp. 6035–6047, 2019.
- [20] W. Hofmann, J. Schlabbach, and W. Just, *Effect of Reactive Power on Electricity Generation, Transmission and Distribution*. 2012. doi: 10.1002/9781119967286.ch3.
- [21] Y. Ai, “The Optimization of Reactive Power for Distribution Network With PV Generation Based on NSGA-III,” *CPSS Trans. Power Electron. Appl.*, vol. 6, no. 3, pp. 193–200, 2021, doi: 10.24295/cpsstpea.2021.00017.
- [22] H. Bai and C. Mi, *Power Electronic Devices, Circuits, Topology, and Control*. 2011. doi: 10.1002/9781119971719.ch1.
- [23] A. Yazdani and R. Iravani, “1.4 Power-electronic Switches,” in *Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications*, ProQuest Ebook Central, 2010, pp. 4–8. [Online]. Available: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/upsal/detail.action?docID=510127>
- [24] A. Yazdani and R. Iravani, “6.5 Averaged model of three-level half-bridge npc,” in *Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications*, 2010, pp. 138–142.
- [25] J. Majchrzak and G. Wiczyński, “Basic characteristics of IEC flickermeter processing,” *Model. Simul. Eng.*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/362849.
- [26] S. Ketabipour, H. Samet, M. Mohammadi, Q. Li, and V. Terzija, “Modelling of Extremely Short-Time Power Variations of Wound Rotor Induction Machines Wind Farms for Flicker Studies,” *IEEE Access*, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3337388.
- [27] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std 1159 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.*, vol. 2009, no. June. IEEE, 2009. doi: 10.1109/IEEESTD.2009.5154067.
- [28] D. Committee, I. Power, and E. Society, *IEEE Std 1453-2011, IEEE Recommended Practice,,Adoption of IEC 61000-4-15:2010, Electromagnetic compatibility (EMC),,Testing and measurement techniques,,Flickermeter,,Functional and design specifications*. 2011.
- [29] IEC, “Flickermeter-Functional and Design Specifications, Standard 61000-4-15, IEC,” *Basic Emc Publ.*, vol. 2003, pp. 1–24, 2003.
- [30] V. Bećirović, B. Nikolić, I. Turković, and I. Pavić, “The development of flickermeter according to standard IEC61000-4-15 and modeling consumers which produce flickers in the power network,” *SPEEDAM 2012 - 21st Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, pp. 1012–1016, 2012, doi: 10.1109/SPEEDAM.2012.6264487.
- [31] H. Abu-Rub, M. Malinowski, and K. Al-Haddad, *Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications*. John Wiley & Sons, 2014.
- [32] K. Chenchireddy, V. Kumar, K. R. Sreejyothi, and P. Tejaswi, “A Review on D-STATCOM Control Techniques for Power Quality Improvement in Distribution,” in *Proceedings of the 5th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace*

*Technology, ICECA 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 201–208.  
doi:  
10.1109/ICECA52323.2021.9676019.

## 9 Matriz de Estado del Arte

Tabla 4. Matriz de Estado del Arte.

<b>MITIGACIÓN DE PERTURBACIONES RÁPIDAS DE VOLTAJE FLICKER EN REDES DE DISTRIBUCIÓN CON CONEXIÓN A GRANJAS EÓLICAS MEDIANTE INYECCIÓN DE POTENCIA REACTIVA CONTROLADA POR FACTS.</b>																				
ITEM	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CTAS	Calidad de la energía	Granja eólica (WF)	Perturbaciones rápidas de voltaje flicker	Compensación reactiva	FACTS	Calidad de energía	Perturbaciones debido a variación en las cargas	Perturbaciones rápidas de voltaje	Factor de potencia	Filtros	Total harmonic distortion (THD)	Implementación de estrategias de control	Compensación reactiva	Simulación del sistema de prueba	Conexión de granja eólica al sistema	Análisis de los Pst y voltajes en los nodos	Implementación del DST/ATCOM
1	2018	A Reactive Power Compensation Scheme for Unbalanced Four-Wire System Using Virtual Y-TCR Model	19	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X
2	2021	Power Quality Improvement for Grid-connected PV System Based on Distribution Static Compensator with Fuzzy Logic Controller and UVT/ADALINE-based Least Mean Square Controller	58	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X
3	2011	Dynamic Stability Improvement of Decentralized Wind Farms by Effective Distribution Static Compensator	10	X	X	<input type="checkbox"/>	X	X	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X
4	2018	<i>Electric Energy Systems Analysis and Operation Second Edition.</i>	969	X	X	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	2022	Optimization of Reclosers Placement in Distribution Networks to Improve Service Quality Indices	5	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	2022	Improving supply quality in distribution power networks: A game-theoretic planning approach	5	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	2022	Optimal Power Quality Compensation of Energy Storage System in Distribution Networks Based on Unified Multi-Phase OPF Model	6	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	2022	An Adaptable Correlated Control for Maintaining Voltage Quality in Low-Voltage Distribution Grids Containing PVs and PEVs	10	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

9	2020	Power Quality Assessment of Distorted Distribution Networks Incorporating Renewable Distributed Generation Systems Based on the Analytic Hierarchy Process	77	X	X	□	X	□	X	X	□	□	□	X	X	□	X	X	□	□
10	2020	Detection and classification of power quality disturbances in distribution networks based on VMD and DFA	37	X	□	X	□	□	X	X	X	□	□	□	□	□	□	X	X	□
11	2018	A Voltage Regulator for Power Quality Improvement in Low-Voltage Distribution Grids	51	X	□	□	X	X	X	X	□	□	X	X	X	X	X	□	X	X
12	2020	A Compensation Strategy Based on Consumer's Voltage Unbalance Assessment for a Distribution Static Synchronous Compensator	7	X	□	□	X	X	X	X	□	□	X	□	X	X	□	□	□	X
13	2018	<i>Modeling and Modern Control of Wind Power</i>	58	□	X	X	X	□	□	X	X	□	□	□	X	□	□	□	□	□
14	2023	Flicker Attenuation Using FACTS Device for DFIG-Based WECS Connected to Distribution Network	7	□	X	X	X	X	□	X	X	□	X	□	X	X	□	X	□	X
15	2018	Computation of Voltage Flicker with Cloud Motion Simulator	14	□	□	X	□	□	□	X	X	X	X	□	X	□	□	□	X	□
16	2018	<i>Integration of Large Scale Wind Energy with Electrical Power Systems in China</i>	7	□	X	X	□	□	□	X	X	□	□	□	X	□	□	X	□	□
17	2019	Adaptation and visual discomfort from flicker	13	X	□	X	□	□	□	□	X	□	X	□	□	□	□	□	□	□
18	2023	Effects of flicker with various brightness contrasts on visual fatigue in road lighting using fixed low-mounting-height luminaires	4	X	□	X	□	□	□	□	X	□	□	□	□	□	□	□	□	□
19	2019	Disturbance Rejection Through Adaptive Frequency Estimation Observer for Wind-Solar Integrated AC Microgrid	21	X	X	□	X	□	X	X	□	□	X	X	X	□	□	X	□	□
20	2012	<i>Effect of Reactive Power on Electricity Generation, Transmission and Distribution</i>	87	□	□	□	X	X	□	□	□	X	□	□	□	X	□	□	□	□
21	2021	The Optimization of Reactive Power for Distribution Network With PV Generation Based on NSGA-III	29	X	□	□	□	□	X	X	X	□	X	□	X	□	X	□	□	□
22	2011	<i>Power Electronic Devices, Circuits, Topology, and Control.</i>	31	X	□	X	X	X	X	□	□	□	□	□	X	X	X	□	□	X

23	2010	1.4 Power-electronic Switches," in <i>Voltage-Sourced Converters in Power Systems : Modeling, Control, and Applications</i>	3069	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	
24	2010	6.5 Averaged model of three- level half-bridge npc	3069	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	
25	2012	Basic characteristics of IEC flickermeter processing	18	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
26	2023	Modelling of Extremely Short- Time Power Variations of Wound Rotor Induction Machines Wind Farms for Flicker Studies	0	X	X	X	X	X	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
27	2009	<i>IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality</i>	15	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	X	X	X	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	
28	2011	<i>IEEE Recommended Practice., Adoption of IEC 61000-4-15:2010, Electromagnetic compatibility (EMC)., Testing and measurement techniques., Flickermeter., Funct ional and design specifications.</i>	6	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>
29	2003	Flickermeter-Functional and Design Specifications, Standard 61000-4-15, IEC	2	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>
30	2012	The development of flickermeter according to standard IEC61000-4-15 and modeling consumers which produce flickers in the power network	3	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>
31	2014	<i>Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications</i>	672	X	X	<input type="checkbox"/>	X	X	X	X	<input type="checkbox"/>	X	X	X	X	X	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X
32	2021	A Review on D-STATCOM Control Techniques for Power Quality Improvement in Distribution	20	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	X	X	<input type="checkbox"/>	X	X	X	X	X	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X
<b>CANTIDAD</b>				24	9	14	20	14	21	18	14	9	17	9	20	13	9	7	9	11	

## 9.1 Resumen de Indicadores

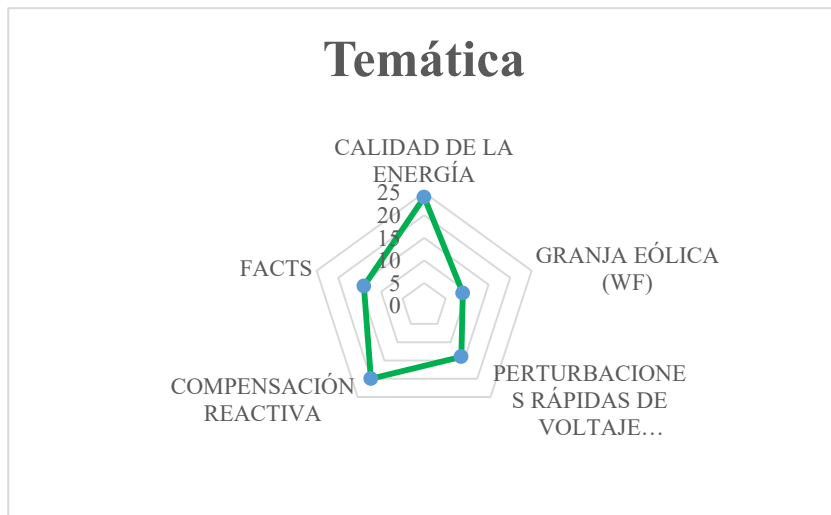


Figura 20. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

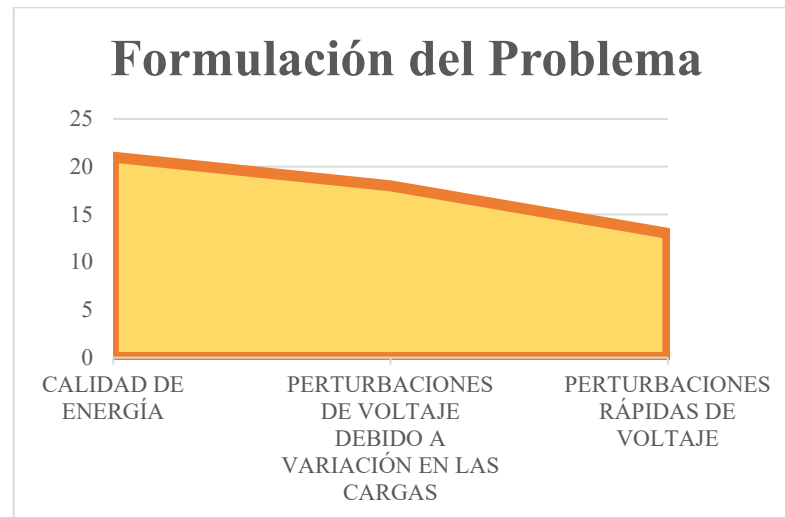


Figura 21. Indicador de formulación del problema – Estado del arte.



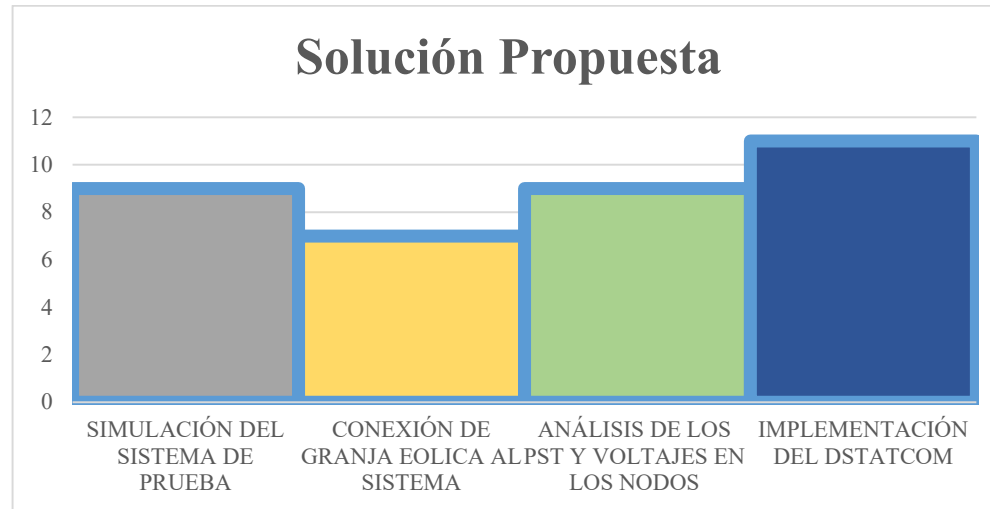


Figura 22. Indicador de solución propuesta – Estado del arte.