



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

TÍTULO:

**Simulación de una micro red eléctrica con las características de calidad de
la energía.**

AUTOR:

Nelson Mauricio Suarez Mendoza

DIRECTOR:

Edison Andrés Caicedo Peñaranda

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA N. DE S. – COLOMBIA
26-MAYO-2021**

TÍTULO

**Simulación de una micro red eléctrica con las características de
calidad de la energía.**

AUTOR:

Nelson Mauricio Suarez Mendoza

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

DIRECTOR:

Edison Andrés Caicedo Peñaranda

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PAMPLONA N. DE S. – COLOMBIA
26-MAYO-2021**

DEDICATORIA

El éxito no se mide por lo que haces comparado con lo que hacen los demás; se mide por lo que haces con las habilidades que Dios te dio."

Zig Ziglar

"El verdadero buscador crece y aprende, y descubre que siempre es el principal responsable de lo que sucede"

Jorge Buca

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanas por brindarme su ayuda y confianza en el desarrollo de mi carrera, por su comprensión y apoyo en todo momento que con sus palabras de motivación no me dejaron desfallecer para que siguiera adelante y siempre sea perseverante y cumpliera mis metas.

A mi amada hija Danna por ser mi fuente de inspiración y motor para poder superarme cada día más y así poder darle una mejor vida en el futuro.

A mi director de trabajo de grado por su orientación y compartir sus conocimientos.

A todos esos docentes que durante el transcurso de la carrera me han guiado, aconsejado y enseñado tanto para la vida como a la hora de ejercer la carrera.

Finalmente, a todas aquellas personas que de una u otra manera estuvieron brindándome su apoyo y comprensión en los momentos que más los necesitaba.

CONTENIDO

	Pág.
2. OBJETIVOS.....	13
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
3.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	14
3.2. JUSTIFICACIÓN.....	14
4. MARCO TEORICO.....	15
4.1. Tipos de carga.....	15
4.2. Micro red.....	16
4.3. Generación eólica.....	18
4.4. Generación fotovoltaica.....	20
4.5. Clasificación y características típicas de los fenómenos electromagnéticos.....	22
5. PARÁMETROS RELEVANTES PARA LA SIMULACIÓN DE UNA MICRO RED ELÉCTRICA.....	25
5.1. Sistema eléctrico interconectado.....	25
5.2. Recursos de energía distribuida.....	25
5.2.1. Generación fotovoltaica.....	26
5.2.2. Generación eólica.....	27
5.2.3. Red eléctrica.....	29
5.3. Modo conectado a la red.....	30
5.4. Modo isla.....	30
6. MODELO DE SIMULACIÓN QUE SATISFAGA LOS PARÁMETROS NECESARIOS DE UNA MICRO RED ELÉCTRICA.....	30
6.1. Sistema de generación solar.....	30
6.2. Sistema de generación eólica.....	31
6.3. Sistema de la red.....	32
6.4. Carga.....	33
6.5 Resultados de la simulación de la micro red.....	33
7. EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA EN LA MICRO RED ELÉCTRICA....	38
7.1. Perturbaciones de la calidad de la energía.....	38
7.1.1. Falla entre líneas y/o tierra:	39

7.1.2. Falla permanente trifásico.	39
7.1.3. Arranque de un motor de inducción.	40
7.1.4. Energización de una carga capacitiva.	40
7.1.5. Energización de un transformador.	41
7.1.6. Energización de un banco de capacitores	41
7.1.7. Carga no lineal.....	42
8. IMPACTOS DE LOS EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA EN LA MICRO RED ELÉCTRICA.....	43
8.1 Falla entre líneas y/o tierra.	43
8.2. Falla permanente trifásico.	44
8.3. Arranque de un motor de inducción.	44
8.4. Energización de una carga capacitiva.	45
8.5. Energización de un transformador.	47
8.6. Energización de un banco de capacitores.	48
8.7. Carga no lineal.....	49
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
BIBLIOGRAFÍA.....	53

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1. Comparación de los ejes de los aerogeneradores [11].</i>	20
<i>Tabla 2. Ventajas y desventajas de la generación eólica [13].</i>	20
Tabla 3. Ventajas y desventajas de la generación fotovoltaica [14].	22

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Imagen 1. Curva de comportamiento de una carga lineal [1].</i>	15
<i>Imagen 2. Curva de comportamiento de una carga no lineal [1].</i>	16
Imagen 3. micro red.	16
<i>Imagen 4 Diagrama esquemático del sistema de micro red con tres DERs [8].</i>	18
<i>Imagen 5. A turbina tipo savonius, B turbina tipo Darries [11].</i>	19
<i>Imagen 6. tipos de molinos de eje horizontal [11].</i>	19
<i>Imagen 7. componentes de una instalación fotovoltaica [12].</i>	21
<i>Imagen 8. Fenómenos electromagnéticos.</i>	22
<i>Imagen 9. Transitorio impulsivo y oscilante.</i>	23
<i>Imagen 10. Sag y swell de la onda de tensión.</i>	23
<i>Imagen 11. Variaciones de larga duración.</i>	24
<i>Imagen 12. Superior forma de onda ideal. Inferior onda desbalanceada.</i>	24
<i>Imagen 13. Distorsión de la forma de onda.</i>	25
<i>Imagen 14. Bloque de generación fotovoltaico.</i>	26
<i>Imagen 15. Curvas de corriente y potencia de los paneles en función del voltaje</i>	27
Imagen 16. bloque de generación eólica.	28
<i>Imagen 17. Relación de la velocidad del viento con la potencia generada.</i>	29
<i>Imagen 18. Bloque que representa la red eléctrica.</i>	29
<i>Imagen 19. Valores de simulación del sistema fotovoltaico.</i>	30
<i>Imagen 20. comportamiento de los paneles solares durante la simulación.</i>	31
<i>Imagen 21. Modelo de simulación sistema fotovoltaico.</i>	31
<i>Imagen 22. Valores de simulación del sistema eólico.</i>	32
<i>Imagen 23. Modelo del sistema eólico.</i>	32
<i>Imagen 24. Valores del modelo de la red.</i>	33
<i>Imagen 25. Modelo del modelo de la carga.</i>	33
<i>Imagen 26. Modelo de simulación.</i>	34
<i>Imagen 27. Comportamiento de las tensiones de la micro red.</i>	35
<i>Imagen 28. Visualización de la forma de onda del sistema.</i>	35
<i>Imagen 29. Visualización de sincronización de las fases interpuestas de cada parte del sistema.</i>	36
<i>Imagen 30. comportamiento de la potencia activa de la micro red.</i>	36
<i>Imagen 31. Comportamiento de la potencia reactiva de la micro red.</i>	37
<i>Imagen 32. Modelo para la medición de potencias y factor de potencia.</i>	37
<i>Imagen 33. Factor de potencia de la micro red.</i>	38
<i>Imagen 34. Bloque de falla trifásica.</i>	39

<i>Imagen 35. Parámetros de la falla permanente trifásica.</i>	40
<i>Imagen 36. Swicheo de un motor de inducción.</i>	40
<i>Imagen 37. Energización de una carga capacitiva.</i>	41
<i>Imagen 38. Energización de un transformador.</i>	41
<i>Imagen 39. Energización banco de capacitores.</i>	42
<i>Imagen 40. Carga no lineal.</i>	42
<i>Imagen 41. simulación de la tensión en P.U ante caída de tensión de múltiple etapa.</i>	43
<i>Imagen 42. Simulación de la tensión ante un estado permanente.</i>	44
<i>Imagen 43. Simulación de la tensión P.U debido al arranque de un motor de inducción.</i>	45
<i>Imagen 44. simulación de la forma de onda de la tensión debido a la energización de una carga capacitiva.</i>	46
<i>Imagen 45. Simulación del valor RMS de la tensión y la corriente debido a la energización de una carga capacitiva.</i>	46
<i>Imagen 46. Simulación de la tensión P.U debido a la energización de un transformador.</i>	47
<i>Imagen 47. Simulación del fp del sistema debido a la energización de un transformador.</i>	47
<i>Imagen 48. Simulación de la forma de onda de la tensión de la energización de un banco de capacitores.</i>	48
<i>Imagen 49. Simulación del fp al energizarse un banco de condensadores.</i>	49
<i>Imagen 50. Simulación de la izquierda P. activa, simulación de la derecha P. reactiva.</i>	49
<i>Imagen 51. Simulación de la forma de onda de una carga no lineal.</i>	50
<i>Imagen 52. Simulación del THD por interacción de una carga no lineal.</i>	51
<i>Imagen 53. Simulación del THD respecto al tiempo con interacción de una carga no lineal.</i>	51

INTRODUCCIÓN

Como ya sabemos a medida que pasa el tiempo se necesita más energía a causa de las nuevas tecnologías o al aumento de la población, e igualmente se ha buscado que el servicio eléctrico mejore también su calidad dado que al mejorar este aspecto mejora su eficiencia, su continuidad y seguridad. Como bien sabemos el aumento de usuarios puede causar que la red se vea afectada negativamente por eso actualmente se usa micro redes que lo que hacen es disminuir el impacto de las cargas a las redes de energía y disminuir costos de cobro de la energía consumida de la red.

En este proyecto se pretendió desarrollar una simulación para una micro red eléctrica que cuente con múltiples fuentes de generación, se incluyó fuentes de energía renovable interconectadas con cargas eléctricas considerando la integración de un modelo que contemple los eventos de calidad de la energía presentes en el sistema. Iniciando por la selección de parámetros relevantes para la simulación de una micro red eléctrica, se desarrolló un modelo de simulación que satisfaga los parámetros necesarios de una micro red eléctrica, se programaron los eventos de calidad de la energía en la micro red eléctrica y por último se establecieron los impactos de los eventos de calidad de energía en la micro red eléctrica.

A medida que los recursos energéticos distribuidos (DER) se integran progresivamente en los sistemas de energía eléctrica, han también surgido estudios donde ven la micro red como un circuito cerrado. Las herramientas de prueba adecuadas con esencialmente para diseñar e investigar las micro redes y también evaluar los sistemas de control correspondientes, uno de estos estudios se llevó a cabo en la universidad de Manitoba Canadá en donde se simuló en tiempo real un sistema de micro red con múltiples (DER) y cargas, se tomaron en cuenta los esquemas de control típicos para la detección de isla, deslastre de carga y conmutación de banco de condensadores asociados con la operación en isla y conectada a la red se implementado en el controlador físico, que se interconecta con RTDS utilizando varios protocolos de comunicación [8].

En la división de ingeniería de la universidad de Saint Mary, Halifax, Canadá se desarrolló una plataforma de simulación, para una micro red fotovoltaica con almacenamiento de batería, utilizando el software Matlab/ simulink. La micro red tiene un bus de CA para conectar generadores solares distribuidos y elementos de almacenamiento de baterías con la capacidad de funcionar en modo conectado a la red y en isla. Las unidades de control local operan los convertidores de la electrónica de potencia en función de las referencias proporcionadas por la unidad de control de supervisión y el sistema de gestión de energía. El propósito es desarrollar una micro red solar virtual que se pueda utilizar para probar algoritmos de sistema de gestión de energía. A micro red es reconfigurable para modelar cualquier sistema real con almacenamiento y generación solar distribuida. Se ha probado

diferentes escenarios para verificar la flexibilidad y la capacidad de la plataforma de micro redes solares fotovoltaicas [22].

Todas las simulaciones se realizarán en Matlab, también en dicha simulación se tomará ciertos valores como ideales o constantes en donde se observará como los diferentes fenómenos afectan a la micro red .

2. OBJETIVOS.

2.1. OBJETIVO GENERAL.

- Simular una micro red eléctrica con la integración de eventos de calidad de la energía.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Seleccionar los parámetros relevantes para la simulación de una micro red eléctrica.
- Desarrollar un modelo de simulación que satisfaga los parámetros necesarios de una micro red eléctrica.
- Programar los eventos de calidad de la energía en la micro red eléctrica.
- Establecer los impactos de los eventos de calidad de la energía en la micro red eléctrica.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

3.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

A medida que pasa el tiempo el consumo de energía eléctrica va creciendo ya sea debido a las nuevas tecnologías o al aumento de la población, las empresas de generación y distribución tiene que afrontar dos importantes retos: el primero aumentar la capacidad de generación y distribución de energía eléctrica es hay en donde las micro redes eléctricas llegan a mitigar un poco este panorama utilizando energías renovables que incluyan electrónica de potencia que puede modificar las formas de onda, de voltaje y corriente; el segundo reto es la calidad de la energía eléctrica suministrada a los clientes ya que en los últimos años se ha tomado conciencia de la importancia que tiene “la calidad de la energía eléctrica” ya que esta contribuye al desarrollo tecnológico correspondiendo así a las expectativas de los clientes [1][2].

3.2. JUSTIFICACIÓN.

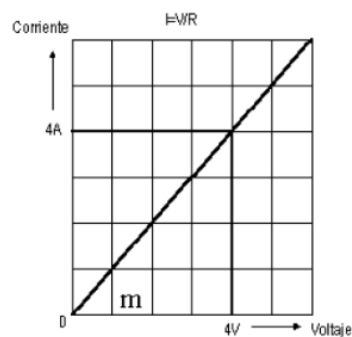
Este proyecto pretende simular una micro red y observar cómo es el panorama de la calidad de la energía ante los diferentes casos que se van a presentar ya que el comportamiento de esta en los diferentes casos puede variar afectando la red, la carga o los elementos presentes en la micro red y la idea es ver como esos casos afectan el comportamiento del voltaje y la corriente en los diferentes elementos.

4. MARCO TEORICO.

4.1. Tipos de carga.

4.1.1. Carga lineal.

Las cargas lineales, la corriente de la carga es completamente proporcional al voltaje, lo que hace que la tensión y la corriente estén relacionadas por un factor constante. Si el voltaje de alimentación es sinusoidal la corriente también es sinusoidal, las ondas de voltaje no se ven afectadas por las ondas de corriente [3].



m = Angulo con respecto al eje de voltaje

Imagen 1. Curva de comportamiento de una carga lineal [1].

“Este tipo de carga no representa un problema en la distorsión de la forma de onda por el hecho de comportarse de manera lineal” [1].

4.1.2. Carga no lineal.

Las cargas no lineales, la corriente de la carga no es proporcional al voltaje, aunque la carga se alimente con una onda sinusoidal la corriente no puede ser sinusoidal y esta puede distorsionar la onda de tensión [3].

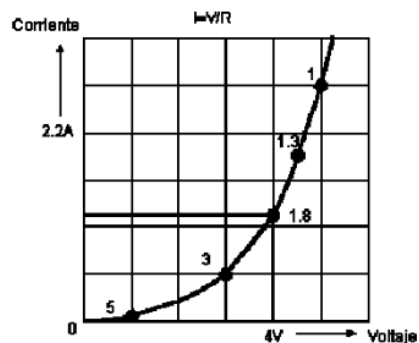


Imagen 2. Curva de comportamiento de una carga no lineal [1].

Las cargas no lineales pueden producir en los sistemas eléctricos altas distorsiones en la forma de onda afectando negativamente los equipos y a los clientes [1].

4.2. Micro red.

La definición de una micro red según la comisión electrotécnica internacional la define como: “Sistema eléctrico interconectado con cargas y recursos de energía distribuida con límites eléctricos definidos que actúan como una única entidad controlable a un nivel de media y baja tensión y es capaz de operar tanto en modo conectado a la red como en modo isla.”(IEC, 2017).

Mientras que la unidad de planeación minero energética la define como: “Una pequeña red en baja o media tensión capaz de integrar diversas fuentes de generación, almacenamiento de energía y cargas gestionables que potencialmente pueden funcionar como pequeñas islas de energía, esto es, unidades energéticamente autosuficientes, aunque conectadas a la red de distribución. Pueden estar compuestas de cualquiera de los elementos de una red convencional o tecnología relacionada con Redes Inteligentes, pero inevitablemente, deben contener sistemas de generación y poseer la capacidad de trabajar en modo aislado, sin conexión a la red eléctrica.”(UPME, 2016).

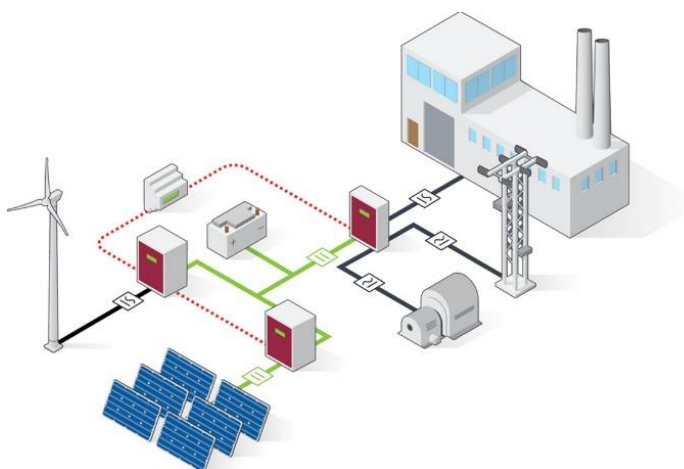


Imagen 3. micro red.

Fuente: www.eseki.com

4.2.1. Capacidad de una micro red eléctrica en Colombia.

En Colombia se suele usar otro término como la autogeneración a pequeña escala y gran escala, donde la autogeneración a pequeña escala va hasta una potencia de 1 MW según la resolución 281 del 2015 [4] y la autogeneración a gran escala es superior a 1 MW y

es inferior o igual a 20 MW [5].

4.2.2. Tipos de tensión de una micro red eléctrica.

Las tensiones usadas en una micro red eléctrica son baja y media tensión y dependiendo del nivel de tensión se puede clasificar en 3:

- **Micro red DC:** las fuentes de generación y sistemas de almacenamiento de energía se conectan a un barraje DC donde van conectadas las cargas que funcionan con CD o se le puede conectar un convertidor DC/DC que iría a otro barraje DC donde estén conectadas las cargas [3].
- **Micro red AC:** En estas las fuentes de energía generan AC que directamente irán conectadas a un barraje en alterna que alimentara las cargas o bien se emplea convertidores [3].
- **Micro red híbrida:** Es aquella donde se manejan tanto barrajes en DC como AC a la cual ira conectada una serie de cargas [3].

La fuente de alimentación de micro red de CC no solo puede resolver el problema de la perdida excesiva de línea de la gran red eléctrica de manera efectiva, sino que también aumenta la fiabilidad de la fuente de alimentación, es ecológica y también ayuda a mejorar la eficiencia en el uso de energía [6].

En los casos de que las principales fuentes de energía de una micro red sean fuentes de energía renovables los problemas de estabilidad de voltaje pueden volverse críticos y deben tratarse adecuadamente. Para este propósito se han propuesto diferentes métodos para la estabilización de voltaje de CC entre ellos podemos encontrar uno donde se emplea dos tipos de almacenamiento de energía de EDLC y batería en donde se han elaborados estrategias de control cooperativo a estos almacenamientos de energía y tanto en estudios experimentales como los resultados de simulación han ilustrado que la estabilidad del voltaje de CC en la micro red híbrida puede regularse adecuadamente mediante el control cooperativo [7].

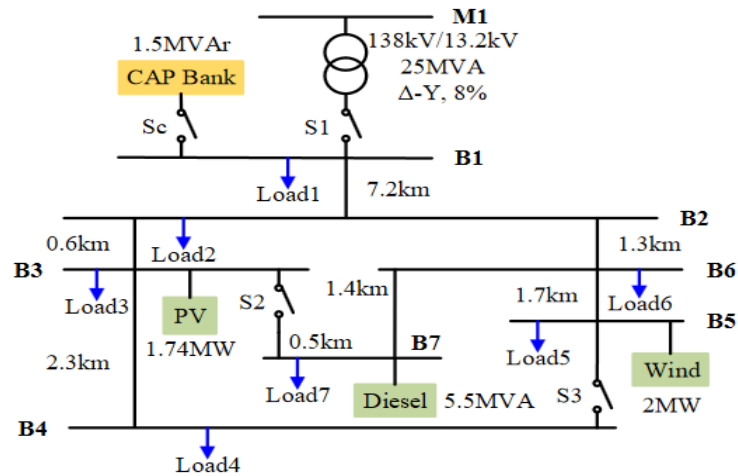


Imagen 4 Diagrama esquemático del sistema de micro red con tres DERs [8].

Como podemos ver en la **Imagen 4** se presentó gran flexibilidad para los distintos escenarios de prueba. La plataforma de pruebas demostró una solución adecuada y práctica para evaluar el rendimiento de una micro red y su sistema de control en un entorno de tiempo real. Con esto la plataforma de simulación presentada demuestra la flexibilidad de la simulación HIL (hardware-in-the-loop) para estudios de micro redes y aplicaciones relacionadas en el simulador digital en tiempo real RTDS [8].

4.3. Generación eólica.

Para hablar de la energía eólica primero habría que hablar sobre su principal fuente de energía, el viento; donde el viento es una “corriente de aire que se produce en la atmosfera al variar de presión” [9]. La energía eólica se aprovecha de estos movimientos de aire haciendo que este impacte con las aspas, que por acción de estas generaran movimiento en las instalaciones que llamamos aerogeneradores.

Un aerogenerador, es un generador eléctrico capaz de transformar la energía cinética producida por el viento en las aspas a energía mecánica rotacional que va a un alternador donde se convierte en energía eléctrica, esta energía puede trabajar de manera aislada para pequeñas aplicaciones o comunidades, esta puede estar conectada a la red y suministrar la potencia que estas generan, hay que recalcar que la potencia de los aerogeneradores dependen de la intensidad del viento y del generador conectada a esta [10].

4.3.1. Clasificación.

Los generadores eólicos se pueden clasificar de muchas maneras, ya sea por la potencia de generación, el tipo de sistema implementado en este para la generación entre otros una manera de clasificarlos es según la posición de su eje [11].

4.3.1.1. Eje vertical.

Son los que su eje está perpendicular a la superficie, normalmente se usa para potencia menores de 10 KW.

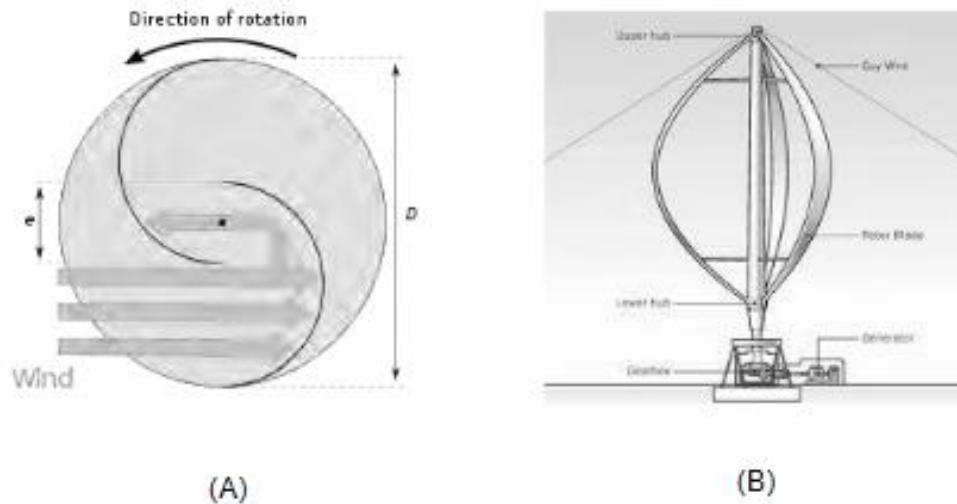


Imagen 5. A turbina tipo savonius, B turbina tipo Darries [11].

4.3.1.2.Eje horizontal.

Son los más implementados en parques eólicos, tiene mejor eficiencia y capacidad que las de eje vertical y tiene capacidades de hasta 1 MW.

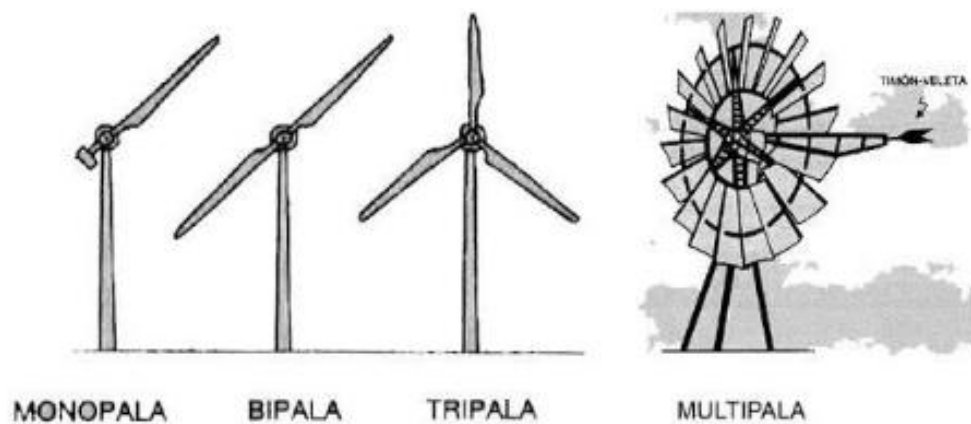


Imagen 6. tipos de molinos de eje horizontal [11].

4.3.2.Comparación entre generadores de eje vertical y horizontal:

	Aerogenerador de eje vertical	Aerogenerador de eje horizontal
Ventajas	• No necesita un mecanismo de orientación. • Producen energía a bajas velocidades de viento. • No necesitan de una torre. • Su mantenimiento es más fácil.	• Presenta mayor eficiencia. • Se puede ubicar a grandes alturas. • Menor intactiva visual. • Menor costo de adquisición. • Costo KW/h menor. • Son de arranque automático. • Soportan altas velocidades de viento.
desventajas	• La velocidad en la parte baja del rotor es baja. • Poca eficiencia. • Necesita estar conectada a una red eléctrica para arrancar. • Necesita cables tensores para mantener la posición. • Para su mantenimiento es necesario el desmonte de toda la turbina.	• Necesita sistema de orientación. • Requiere de una torre. • Produce mayor ruido. • Mantenimiento completo en generadores de mayor potencia.

Tabla 1. Comparación de los ejes de los aerogeneradores [11].

4.3.3. Ventajas y desventajas de la generación eólica:

ventajas	desventajas
• Bajo costo de mantenimiento. • Fuente de energía alternativa. • Fuente de energía renovable. • Asequible en sitios apartados. • No produce desechos contaminantes.	• Puede requerir sistema de almacenamiento. • Ruido molesto. • Efectos en la salud humana. • Impacto ambiental por la extensión de tierra. • Las hélices son susceptibles a daños. • Depende del clima.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de la generación eólica [13].

4.4. Generación fotovoltaica.

En esta generación se aprovecha la energía solar, en donde convierte la energía solar en electricidad empleando el efecto fotoeléctrico. Se trata de un tipo de energía renovable, inagotable y no contamina.

4.4.1. Componentes de un sistema de generación fotovoltaico.

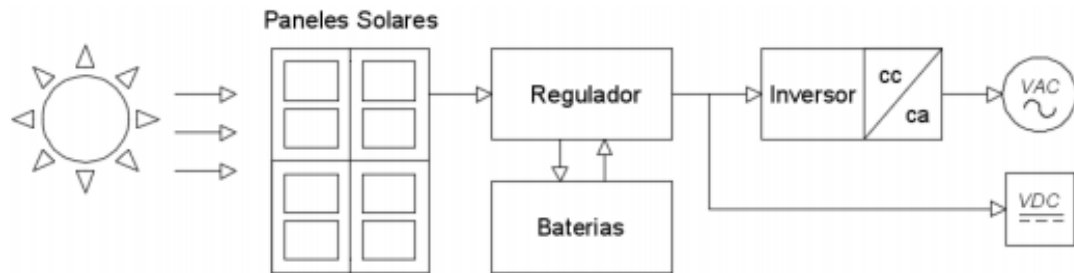


Imagen 7.componentes de una instalación fotovoltaica [12].

4.4.1.1. Paneles solare: También llamadas celda o célula fotovoltaica, su función es captar los fotones provenientes de la radiación emitida por el sol y transformarlos en energía eléctrica (DC). las celdas están compuestas normalmente por la unión de materiales semiconductores como el silicio, y estas se agrupan en serie o paralelo para obtener un nivel de tensión o intensidad acorde a nuestras necesidades. Para un óptimo aprovechamiento de la radiación solar se recomienda que se instale algún tipo de control de posición para extraer la máxima potencia disponible [12].

4.4.1.2. Regulador de carga: su función principal es para evitar sobrecargas y descargas fuera del rango normal de la batería, por medio del ciclo de carga y descarga sacarles el mejor provecho a las baterías evitando desgastes y daños prematuros. El regulador debe ser capaz de brindar información sobre el estado de carga de las baterías y de realizar el control del flujo de energía [12].

4.4.1.3. Baterías: También llamadas acumuladores y se encarga de almacenar la energía generada por los paneles solares. Compuestos de elementos químicos como el plomo, níquel, cadmio entre otros elementos. Entre las aplicaciones podemos encontrar, dar continuidad de energía en el caso de que no haya generación por parte de los paneles solares [12].

4.4.2. Ventajas y desventajas de la generación fotovoltaica.

ventajas	desventajas
----------	-------------

• Su recurso es ilimitado. • No produce desechos contaminantes. • Costos de operación bajos. • El mantenimiento es sencillo y de bajo costo. • Los módulos tienen un periodo de vida de hasta 20 años. • Se puede integrar a las estructuras. • Se puede hacer módulos de todos los tamaños. • Los paneles fotovoltaicos son limpios y silenciosos pudiéndose instalar en cualquier parte sin generar molestia.	• A mayor potencia mayor extensión de terreno. • Alto costo de inversión • Dependiente del clima. • Requiere sistema de almacenamiento.
--	--

Tabla 3. Ventajas y desventajas de la generación fotovoltaica [14].

4.5. Clasificación y características típicas de los fenómenos electromagnéticos.

Son aquellos fenómenos los cuales hacen que los valores eficaces o la forma de onda varia como podemos ver en la imagen 8.

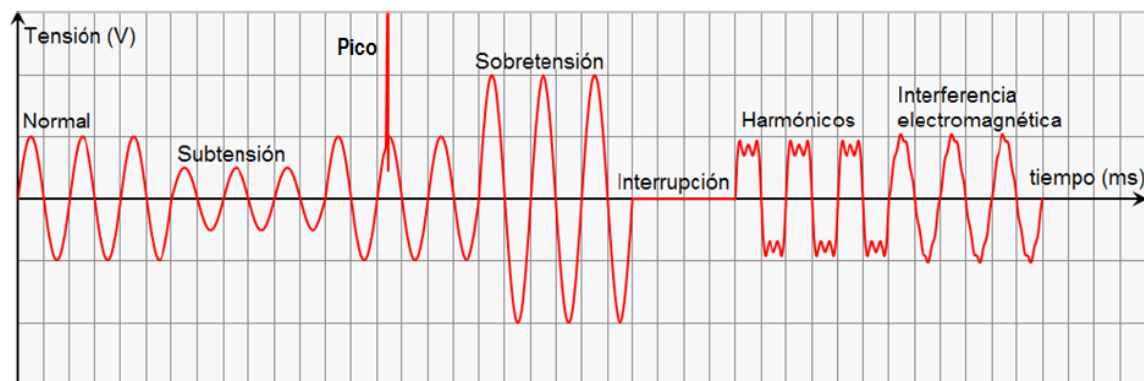


Imagen 8. Fenómenos electromagnéticos

Fuente: <https://docplayer.es/44931859-Calidad-de-energia-electrica.html>.

- **Transitorio**
 - **Transitorio impulsivo:** Es un cambio repentino de frecuencia no energética en la condición de estado estacionario del voltaje, corriente o ambos, que es unidireccional en polaridad [15].
 - **Transitorio oscilatorio:** Consiste en un voltaje o corriente cuyo valor instantáneo cambia de polaridad rápidamente y se describe por su contenido espectral duración y magnitud [15].

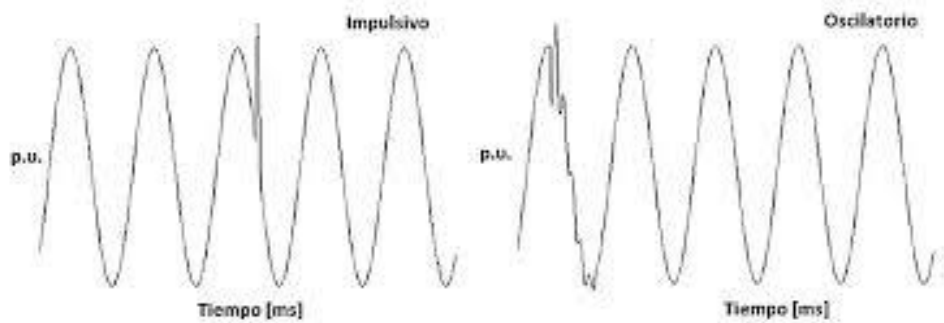


Imagen 9. Transitorio impulsivo y oscilante.

- **Variación de corta duración:** cada tipo de variación se puede designar como instantánea, momentánea o temporal, dependiente de su duración [15].
 - **Instantánea:** ocurre cuando el voltaje de suministro o la corriente de carga disminuye a menos de 0.1 pu durante un periodo de tiempo que no exceda 1 min [15].
 - **Sag:** También conocida como hundimiento es cuando el voltaje y se encuentra entre 0.1 y 0.9 pu de los valores nominales por un tiempo inferior a 1 min [15].
 - **Swell:** Son aumentos súbitos del valor eficaz de la tensión por encima del 1.1 pu de la tensión declarada por un periodo de tiempo que no exceda 1 min [15].

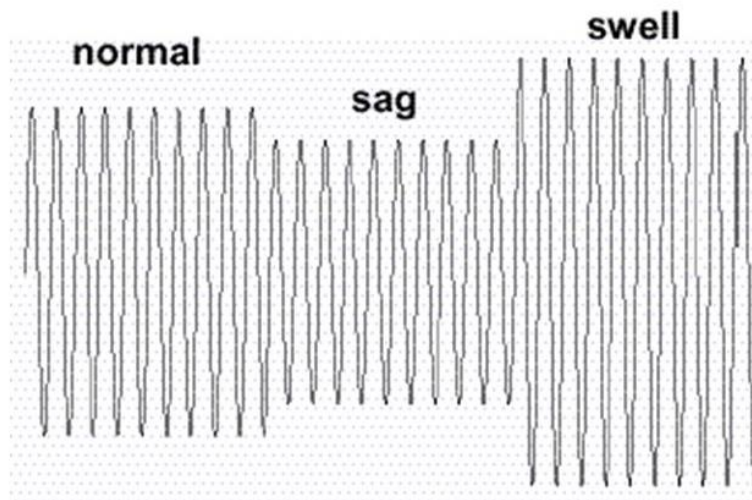


Imagen 10. Sag y swell de la onda de tensión.
Fuente: <https://slideplayer.es/slide/1588169/>

- **Variación de larga duración:** Son aquellas desviaciones del valor eficaz de la tensión con una duración superior a 1 min [15].
 - **Interrupción sostenida:** Son aquellas donde el valor eficaz baja a 0 pu y se prolonga por un tiempo superior a 1 min [15].
 - **Baja tensión:** Son cuando el valor eficaz se reduce y se encuentra entre 0.8 y 0.9 pu y que se prolonga por un tiempo superior a 1 min [15].

- **Sobretensión:** Son los que su valor eficaz está por encima de 1.1 pu con una duración superior a 1min [15].

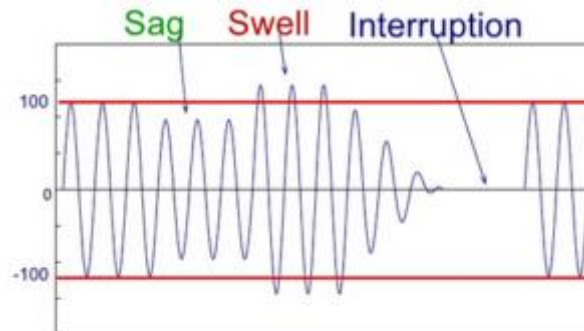


Imagen 11. Variaciones de larga duración.

Fuente: <http://www.sectorelectricidad.com/17410/que-tan-confiable-es-tu-red-electrica-power-system-reliability/>

- **Desbalance en el voltaje:** se define como la relación entre el componente de secuencia negativo o cero y el componente de secuencia positiva, los voltajes de secuencia negativa o cero en un sistema generalmente son el resultado de cargas desequilibradas que causa el flujo de corrientes de secuencia negativa o cero según la norma este desbalance no puede ser superior a 2% [15].

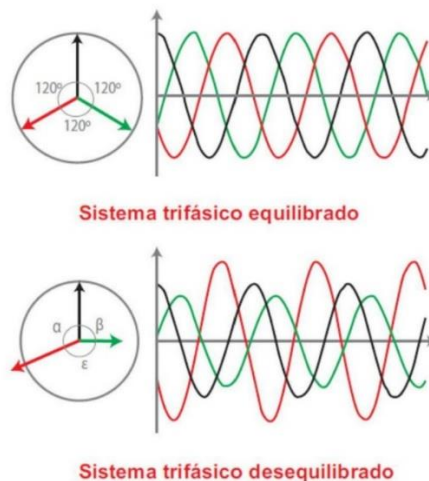


Imagen 12. Superior forma de onda ideal. Inferior onda desbalanceada.

Fuente: <https://mecfi.es/equilibrio-trifasico>

- **Distorsión de la forma de onda:** La distorsión es una desviación de estado estable de una onda sinusoidal ideal de frecuencia de potencia caracterizada principalmente por el contenido espectral de la desviación [15].

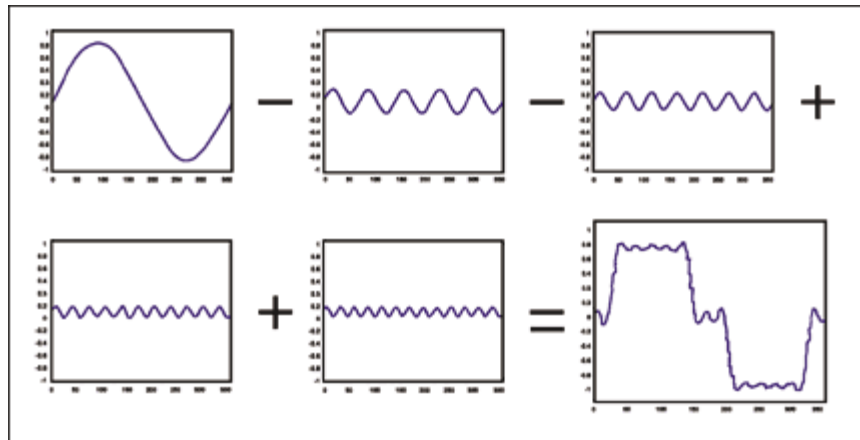


Imagen 13. Distorsión de la forma de onda.

Fuente: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=567&tip=7.&xit=conceptos-basicos-de-armonicas>

- **Fluctuación de voltaje:** Son variaciones sistemáticas de la envolvente de la tensión o una serie de cambios aleatorios cuya magnitud no excede los rangos de tensión especificados también llamado Flicker [15].
- **Variación de la frecuencia:** Está directamente relacionada con la velocidad de rotación de los generadores en el sistema. La frecuencia depende del equilibrio entre la carga y la capacidad de generación disponible [15].

5. PARÁMETROS RELEVANTES PARA LA SIMULACIÓN DE UNA MICRO RED ELÉCTRICA.

Para simular una micro red tendremos en cuenta las características definidas en el concepto que nos da la comisión electrotécnica internacional (IEC); “Sistema eléctrico interconectado con cargas y recursos de energía distribuida con límites eléctricos definidos que actúan como una única entidad controlable a un nivel de media y baja tensión y es capaz de operar tanto en modo conectado a la red como en modo isla.”

5.1. Sistema eléctrico interconectado.

En la resolución No. 70 del 28 de mayo de 1994 definen el sistema interconectado nacional (SIN) partiendo de ese concepto podemos decir que un sistema interconectado es un sistema compuesto por varios elementos conectados entre sí: las plantas generadoras, las redes por las cuales se transmite la energía y las cargas eléctricas de los usuarios.

5.2. Recursos de energía distribuida.

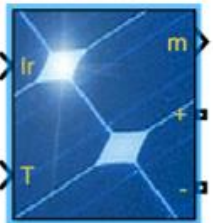
El grupo EPM en la norma de conexión de autogeneradores y generadores distribuidos a los sistemas de distribución de energía eléctrica, definen recursos energéticos distribuidos

(DER) como; “Se refiere a aquellos sistemas de generación y almacenamiento de energía instalados cerca de los puntos de demanda y que puede o no conectarse a una red de distribución de energía” [16].

5.2.1. Generación fotovoltaica.

El bloque PV Array implementa una matriz de módulos fotovoltaicos (PV). La matriz está formada por cadenas de módulos conectados en paralelo, y cada cadena consta de módulos conectados en serie. Este bloque le permite modelar módulos fotovoltaicos preestablecidos del modelo de asesor de sistemas del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL), así como los módulos fotovoltaicos que defina. El bloque de matriz fotovoltaica es un modelo de cinco parámetros que utiliza una fuente de corriente generada por luz (IL), diodo, resistencia en serie (R_s) y resistencia en derivación (R_{sh}) para representar las características I-V dependientes de la irradiancia y la temperatura de los módulos [17].

Para la generación de energía se ha de considerar 2 factores externos la irradiancia y la temperatura para nuestra simulación se tomaron estos valores como constantes, ahora podemos ver en la imagen 14 estos valores son de irradiancia de 1000 y temperatura de 25 °C los cuales los mejores valores posibles para un máximo aprovechamiento del ambiente y de la radiación solar.



PV Array
Implementar módulos de matriz fotovoltaica

Biblioteca: Simscape / Electricidad / Sistemas de energía especializados / Fuentes



Descripción

El bloque PV Array implementa una matriz de módulos fotovoltaicos (PV). La matriz está formada por cadenas de módulos conectados en paralelo, y cada cadena consta de módulos conectados en serie. Este bloque le permite modelar módulos fotovoltaicos preestablecidos del Modelo de asesor del sistema del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) (2018), así como módulos fotovoltaicos que usted defina.

El bloque de matriz fotovoltaica es un modelo de cinco parámetros que utiliza una fuente de corriente generada por luz (I_L), un diodo, una resistencia en serie (R_s) y una resistencia en derivación (R_{sh}) para representar las características IV dependientes de la irradiancia y la temperatura de los módulos.

Imagen 14. Bloque de generación fotovoltaico.
Fuente: Centro de ayuda de simulink MathWorks.

Ahora bien, como vemos en la imagen 15 a la temperatura de 25 °C se le está sacando el máximo provecho haciendo que esta suministra la máxima potencia posible del sistema de paneles solares.

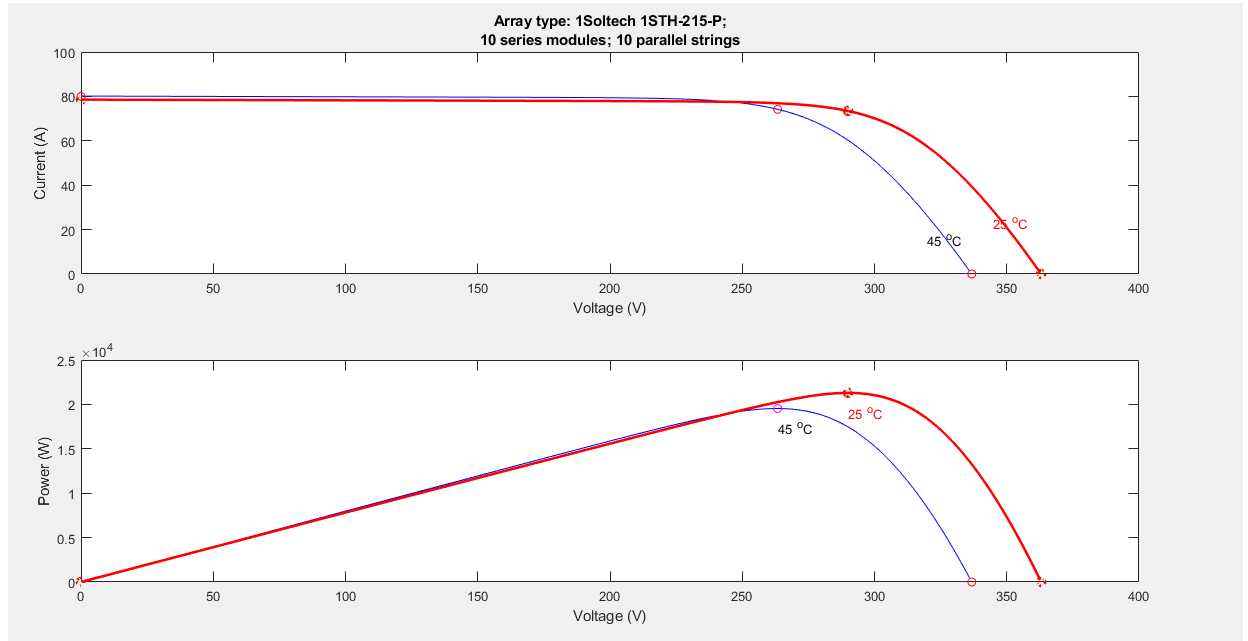


Imagen 15. Curvas de corriente y potencia de los paneles en función del voltaje
Fuente: autor.

5.2.2. Generación eólica.

La turbina eólica y el generador de inducción (WTIG) se muestran a continuación: el devanado del estator está conectado directamente a la red y el rotor es impulsado por la turbina eólica, la energía captada por la turbina eólica es convertida en energía eléctrica por el generador de inducción y es transmitida a la red por el devanado del estator. El ángulo de inclinación se controla para limitar la potencia de salida del generador a su valor nominal para altas velocidades del viento. Para generar energía, la velocidad del generador de inducción debe estar ligeramente por encima de la velocidad síncrona, pero la variación de velocidad es típicamente tan pequeña que el WTIG se considera un generador eólico de velocidad fija. La potencia reactiva absorbida por el generador de inducción es proporcionada por la red o por algunos dispositivos como bancos de condensadores, SVC, STATCOM o condensador síncrono [18].

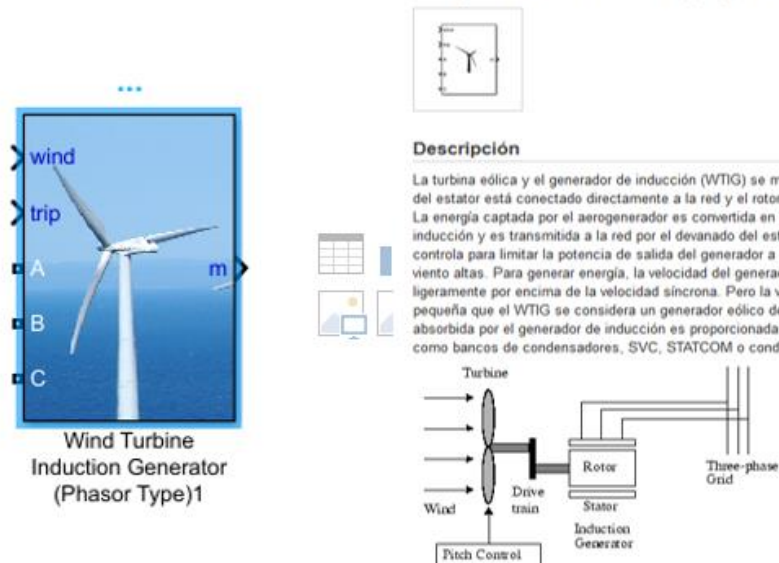


Imagen 16. bloque de generación eólica.

Fuente: Centro de ayuda de simulink MathWorks.

En la imagen 16 vemos que el bloque de Matlab consta de 2 parámetros de entrada para su funcionamiento; el primero es el WIND que es la velocidad del viento en m/s este parámetro será tomado como un valor constante de 12 y el segundo parámetro es TRIP en la que recibe entradas lógicas de 0 o 1 en donde dependiendo del valor de entrada se puede usar como protección o desconexión para nuestra simulación se tomara el valor de 0 que representa pleno funcionamiento. Ahora bien, en la imagen 17 podemos observar que ante una velocidad de viento de 12 m/s se puede suministrar la máxima potencia de generación de la turbina y también de como sería sus respectivas potencias ante los diferentes posibles cambios de velocidad del viento.

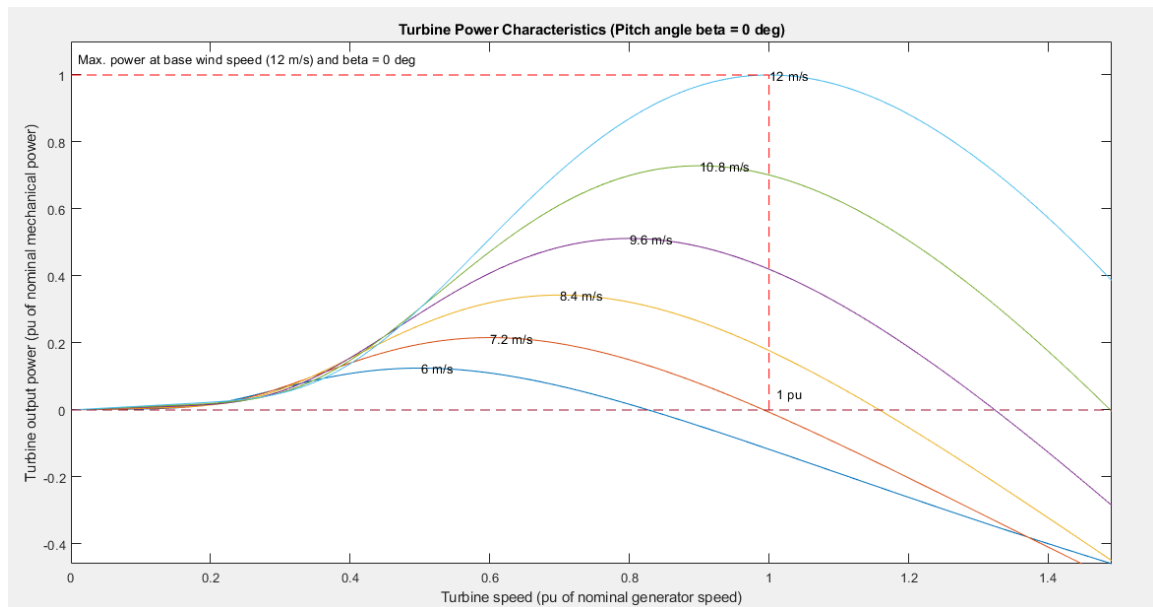
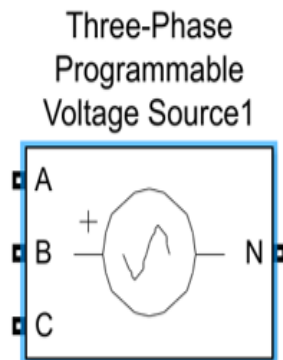


Imagen 17. Relación de la velocidad del viento con la potencia generada.
Fuente: autor

5.2.3. Red eléctrica.

Se usó un bloque de Matlab llamado three-phase programmable voltage source que será el encargado de definir el nivel de tensión de la micro red.

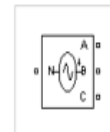


Three-Phase Programmable Voltage Source

Implementar fuente de tensión trifásica con variación temporal programable de amplitud, fase, frecuencia y armónicos

Biblioteca

Simscape / Electricidad / Sistemas de energía especializados / Fuentes



Descripción

Utilice este bloque para generar una tensión sinusoidal trifásica con parámetros variables en el tiempo. Puede programar la variación de tiempo para la amplitud, fase o frecuencia del componente fundamental de la fuente. Además, se pueden programar dos armónicos y superponerlos a la señal fundamental.

Imagen 18. Bloque que representa la red eléctrica.
Fuente: autor.

5.3. Modo conectado a la red.

“Se refiere a aquellos sistemas DER que para su funcionamiento deben estar conectados a la red del OR ”[16].

5.4. Modo isla.

“Se refiere a aquellos sistemas DER que operan de forma aislada, es decir, que no requieren conectarse a la red del OR para su funcionamiento” [16].

6. MODELO DE SIMULACIÓN QUE SATISFAGA LOS PARÁMETROS NECESARIOS DE UNA MICRO RED ELÉCTRICA.

Para nuestro modelo de simulación se tendrá en consideración la información ya vista en el capítulo anterior nuestras diferentes fuentes de energía se unirán en un nodo el cual alimentara una carga. Explicaremos brevemente los valores de cada generación y la función de los diferentes elementos que estas puedan tener.

6.1. Sistema de generación solar.

En la imagen 19 vemos los valores que nos da el bloque PV array que representaría la generación de los paneles solares, para este caso usamos los valores que trae por defecto el bloque y lo único que modificamos fue la cantidad de paneles que se encuentran en serie y en paralelo entre ellos, estos valores fueron modificados a 10 paneles en serie y 10 paneles en paralelo capaces de producir hasta unos 20 KW de energía, y en la imagen 20 vemos el comportamiento de la tensión corriente y potencia a través del tiempo suministrando la máxima potencia posible del arreglo de los paneles solares propuestos.

Block Parameters: PV Array1

PV array (mask) (link)

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series. Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters: Advanced

Array data

Parallel strings: 10

Series-connected modules per string: 10

Module data

Module: Soltech 15TH-215-P

Maximum Power (W)	213.15	Cells per module (Ncell)	60
Open circuit voltage Voc (V)	36.3	Short-circuit current Isc (A)	7.84
Voltage at maximum power point Vmp (V)	29	Current at maximum power point Imp (A)	7.35
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	-0.36099	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	0.102

Display: array, Irradiance, Model parameters, Light-g, Diode s, Diode k, Shunt r, Series r

Imagen 19. Valores de simulación del sistema fotovoltaico.

Fuente: autor.

En Matlab el bloque de generación eólica ya automáticamente da a la salida una tensión en alterna, y las únicas modificaciones que se hicieron fueron especificar el nivel de tensión y la potencia que este genera con un factor de potencia de 0,9 en este caso nuestro modelo de generación eólica suministrara 10 KW de potencia.

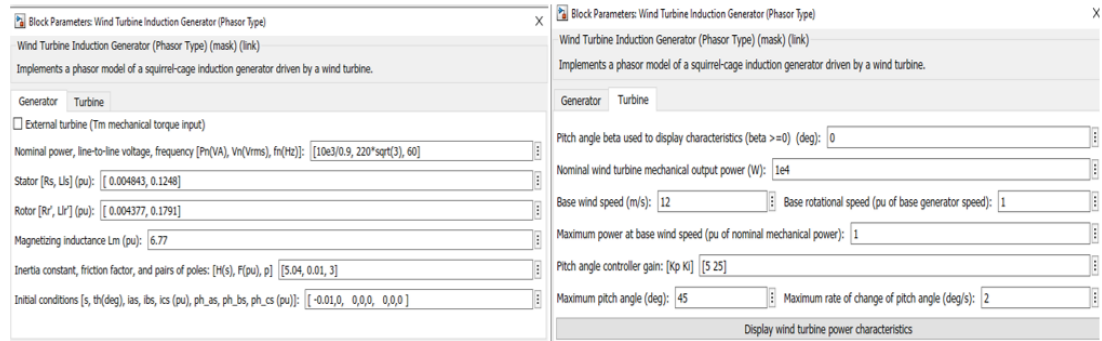


Imagen 22. Valores de simulación del sistema eólico.

Fuente: autor.

Ahora bien, como ya se especificó Matlab cuenta con un bloque que ya nos simula todo el sistema de generación eólica, por lo que solo tuvimos que conectar sus salidas al nodo común, dicho sistema de generación lo podemos ver en la imagen 23.

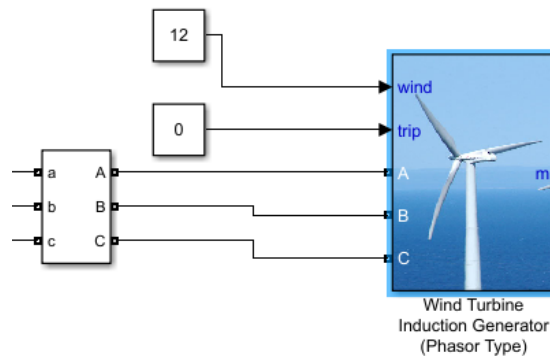


Imagen 23. Modelo del sistema eólico.

Fuente: autor.

6.3. Sistema de la red.

En Matlab el bloque de generación de tensión en su interior el único valor que se definirá será el de la tensión, en la imagen 24 solo tiene 3 valores a modificar el cual no tocaremos la de la fase de las tensiones, la frecuencia se mantiene en 60 Hz y la tensión a la que la simulación opera.

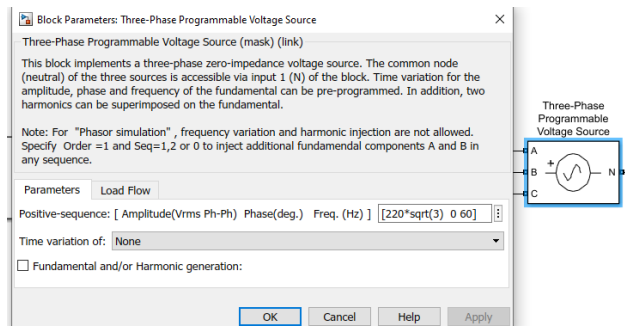


Imagen 24. Valores del modelo de la red.
Fuente: autor.

6.4. Carga.

Para la representación de la carga se usó un bloque llamado Three-Phase Parallel RLC Load en donde el bloque de carga RLC en paralelo trifásico implementa una carga equilibrada como una combinación en paralelo de elementos RLC. A la frecuencia especificada, la carga presenta una impedancia constante. Las potencias activa y reactiva absorbidas por la carga son proporcionales al cuadrado de la tensión aplicada. Solo los elementos asociados con un valor distintos de cero se muestran en el icono de bloque [19]. En la imagen 25 el valor de la reactancia capacitiva es cero por lo tanto su figura no se muestra en el bloque.

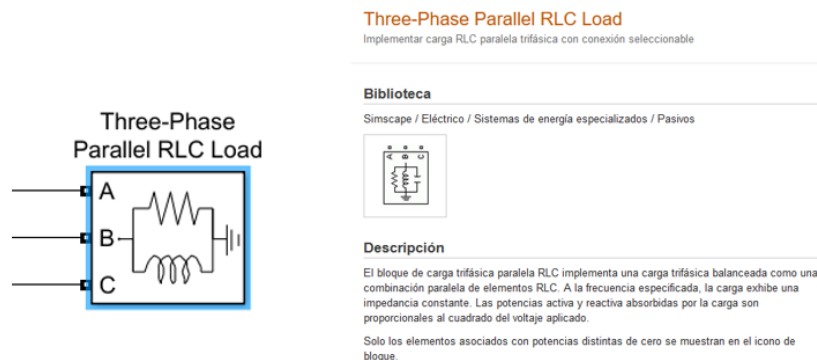


Imagen 25. Modelo del modelo de la carga.
Fuente: Centro de ayuda de simulink MathWorks.

6.5 Resultados de la simulación de la micro red.

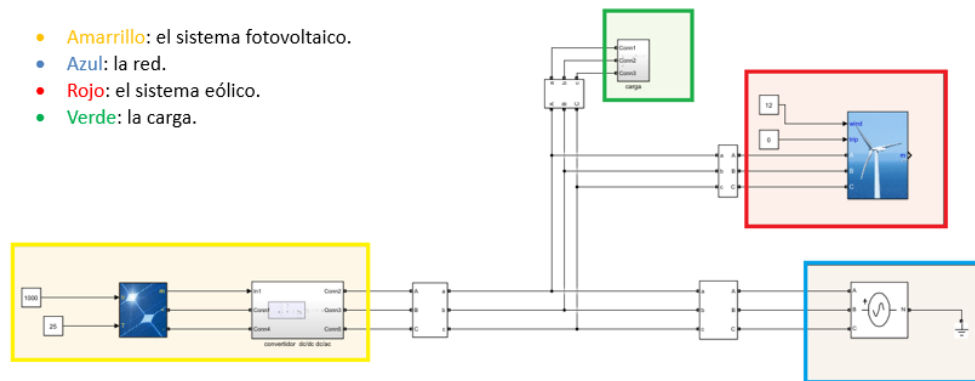


Imagen 26. Modelo de simulación.

Fuente: Autor.

En vez de analizar el comportamiento por separado de cada generación y de las cargas, observaremos los datos en conjunto, por este motivo hay que resaltar en caso en que se omita señalar cual grafica representa que sistema se dará una introducción de ello:

Esto se aplica cuando hay más de una señal visualizada en la misma grafica al menos de que se diga lo contrario se usara esta información.

- **Amarillo:** representa el sistema fotovoltaico.
- **Azul:** representa la red.
- **Rojo:** representa el sistema eólico.
- **Verde:** representa el sistema de cargas o el grupo de cargas.

En los casos donde se muestren más de una gráfica por separado se tendrá en cuenta lo siguiente al menos que se diga lo contrario y en el orden que se presenta a continuación será el orden de las gráficas empezando de arriba hacia abajo:

1. Representa el sistema fotovoltaico.
2. Representa la red.
3. Representa el sistema eólico
4. Representa el sistema de cargas o grupo de cargas.

• Tensiones de los sistemas:

Observamos en la imagen 27 los perfiles de tensión de cada sistema son los mismos al tomar las medidas a la salida de cada sistema, pero siendo el mismo nodo por lo que esta es la tensión del sistema de generación cuyo valor es 220 V rms.

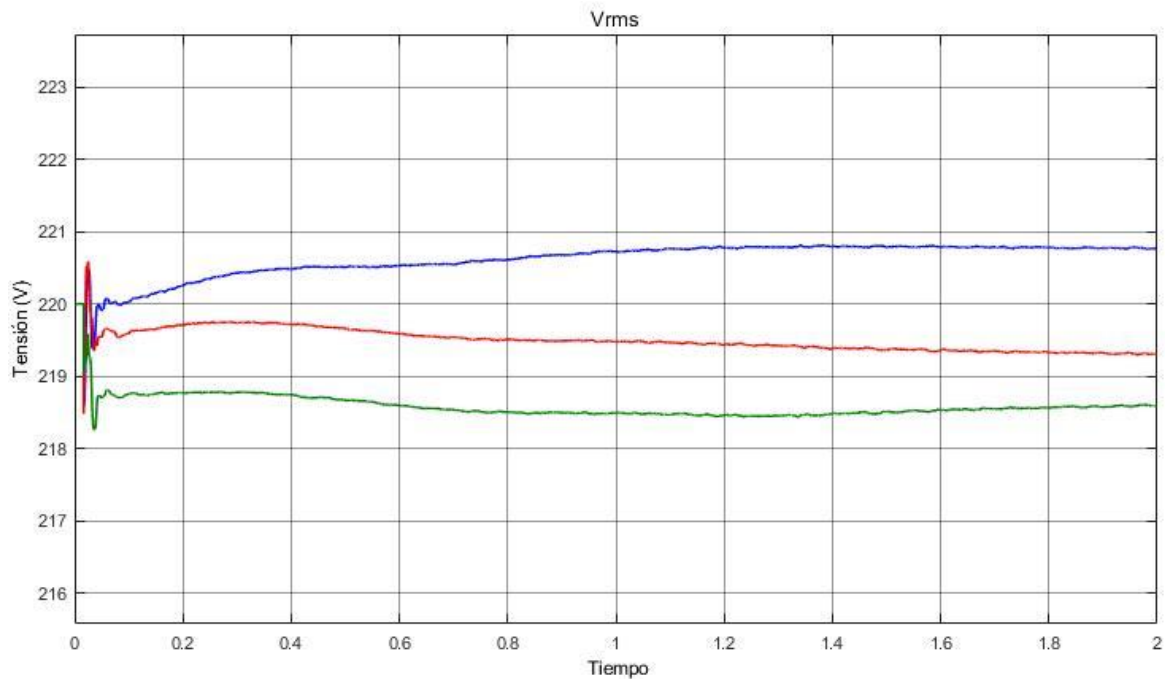


Imagen 27. Comportamiento de las tensiones de la micro red.
Fuente: autor.

En la imagen 28 vemos como las señales de las diferentes fuentes de generación y la carga están sincronizadas y en la imagen 29 observamos como las fases de todo el sistema también siendo el comportamiento de estas el mismo en todo el modelo.

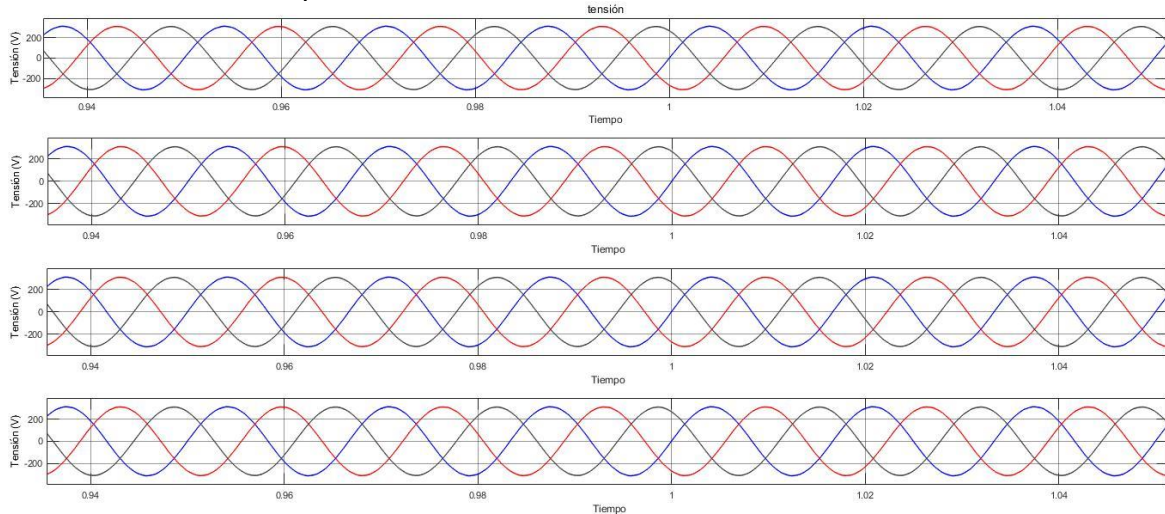


Imagen 28. Visualización de la forma de onda del sistema.
Fuente: autor

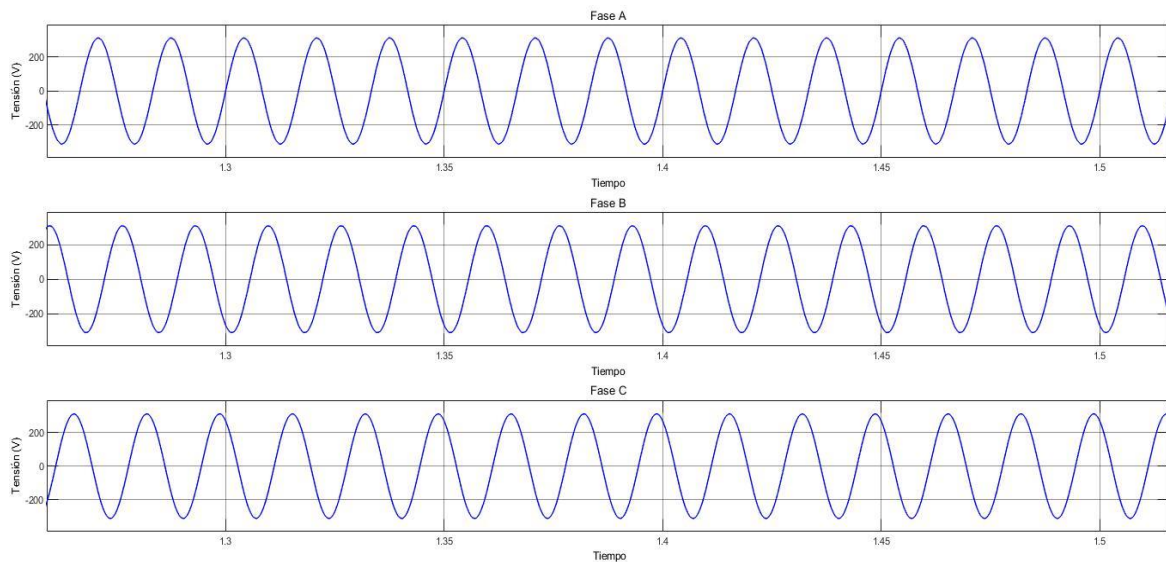


Imagen 29. Visualización de sincronización de las fases interpuestas de cada parte del sistema.
Fuente: autor.

- **Potencia activa.**

Como vemos en la imagen 30 a causa de que la generación eólica le toma un tiempo en llegar al funcionamiento óptimo el sistema, llega a la estabilidad de funcionamiento alrededor de 1 segundo en la simulación en el que después cada generación suministra una potencia activa ya estable.

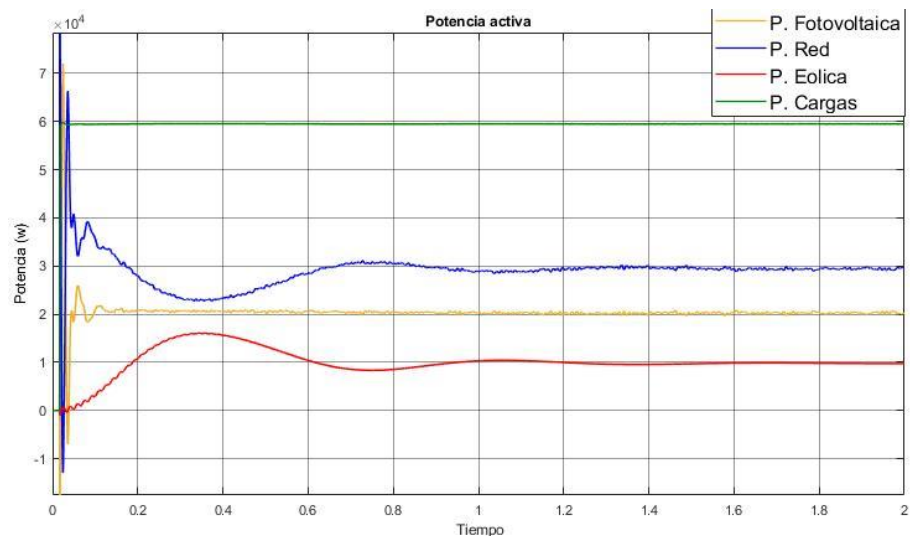


Imagen 30.comportamiento de la potencia activa de la micro red.
Fuente: autor.

- **Potencia reactiva.**

Del mismo modo viendo la imagen 31 de la potencia reactiva de la micro red y vemos que eventualmente tiende a tener el mismo comportamiento que se ve con la potencia activa, algo a mencionar aquí es que la gráfica representada con la línea roja como ya lo mencionamos antes representa la generación eólica tiene un valor negativo de potencia reactiva, siendo esto dado que al ser un generador está consumiendo reactivos para su óptimo funcionamiento en vez de generarlos.

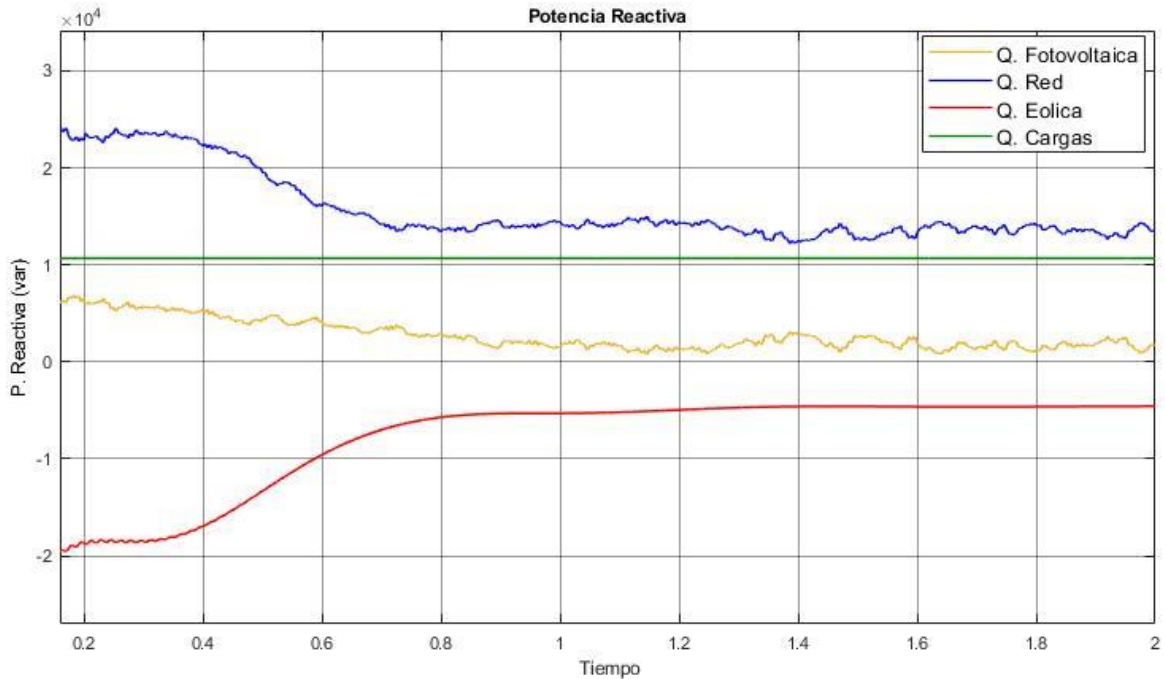


Imagen 31. Comportamiento de la potencia reactiva de la micro red.
Fuente: autor.

En la imagen 32 vemos el modelo usado para el cálculo de las potencias y del factor de potencia, se hizo de este modo de tal forma de que los valores obtenidos sean valores promedio y los más reales posibles teniendo en consideración los parámetros usados.

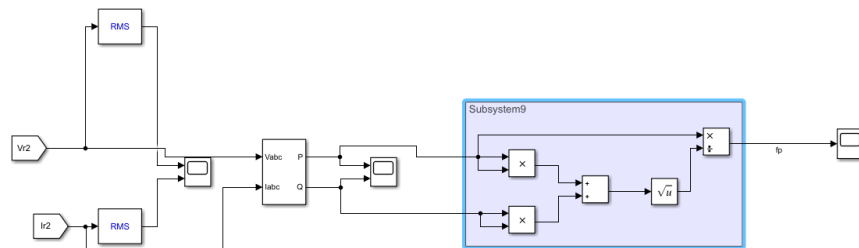


Imagen 32. Modelo para la medición de potencias y factor de potencia.
Fuente: Autor.

- **Factor de potencia.**

Del mismo modo ya mencionado con las potencias la fuente de generación eólica tiende a comenzar con un factor de potencia de 0 dado que parte de un estado en donde no produce energía y mientras la generación eólica llega a sus valores establecidos de potencia activa de generación, esta partirá absorbiendo una gran cantidad de reactivos que eventualmente irán disminuyendo a un valor constante en donde la generación funcione en optimo estado de acuerdo a los parámetros y valores establecidos, en la imagen 33 vemos como son los valores de factor de potencia durante el tiempo de inicio del sistema hasta la estabilización de esta.

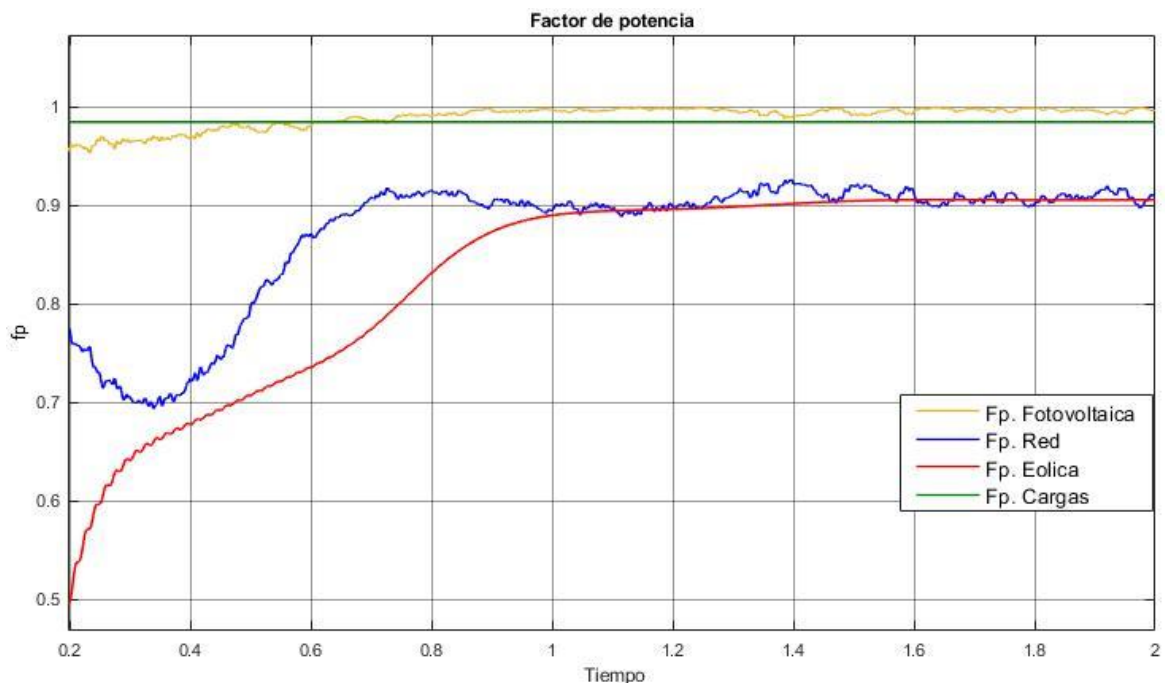


Imagen 33. Factor de potencia de la micro red.
Fuente: autor.

7. EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA EN LA MICRO RED ELÉCTRICA.

7.1. Perturbaciones de la calidad de la energía.

Hay diferentes tipos de perturbaciones que afectan la calidad de la energía de nuestras instalaciones eléctricas como: caída de tensión, aumento de tensión, transitorios, armónicos, conexión y desconexión de cargas o equipos, interrupciones entre otras. A continuación, se mencionará algunos eventos que generan perturbaciones en la red.

7.1.1. Falla entre líneas y/o tierra:

El bloque de falla trifásica en la imagen 34, implementa un disyuntor trifásico donde los tiempos de apertura y cierre se pueden controlar desde una señal externa Simulink® (modo de control externo) o desde un temporizador de control interno (modo de control interno) [20].

El bloque de fallas trifásicas utiliza tres bloques de interruptores que se pueden encender y apagar individualmente para programar fallas de fase a fase, fallas de fase a tierra o una combinación de fallas de fase a fase y a tierra. El proceso de extinción del arco del bloque de falla trifásica es el mismo que para el bloque de disyuntor. Consulte el bloque de interruptores para obtener detalles sobre el modelado de los interruptores monofásicos [20].

La resistencia de tierra R_g se establece automáticamente en 106 ohmios cuando la opción de falla a tierra no está programada. Por ejemplo, para programar una falla entre las fases A y B, solo necesita seleccionar los parámetros de bloque Fase A y Fase B. Para programar una falla entre la fase A y tierra, debe seleccionar los parámetros Fase A y Tierra y especificar un valor pequeño para la resistencia de tierra [20].



Imagen 34. Bloque de falla trifásica.
Fuente: Centro de ayuda de simulink MathWorks.

7.1.2. Falla permanente trifásico.

Para este caso se usará el mismo bloque de simulink empleado en el punto 7.1.1 falla entre línea y/o tierra con las características mostradas en la imagen 35.



Imagen 35. Parámetros de la falla permanente trifásica.
Fuente: Centro de ayuda de simulink MathWorks.

7.1.3. Arranque de un motor de inducción.

Para este evento se simulará la energización de un motor de inducción y una carga resistiva con el fin de visualizar que pasa con la tensión cuando la micro red este en pleno funcionamiento y ver como esto puede afectar los niveles de tensión de esta. En la imagen 36 vemos cómo será el modelo para este evento.

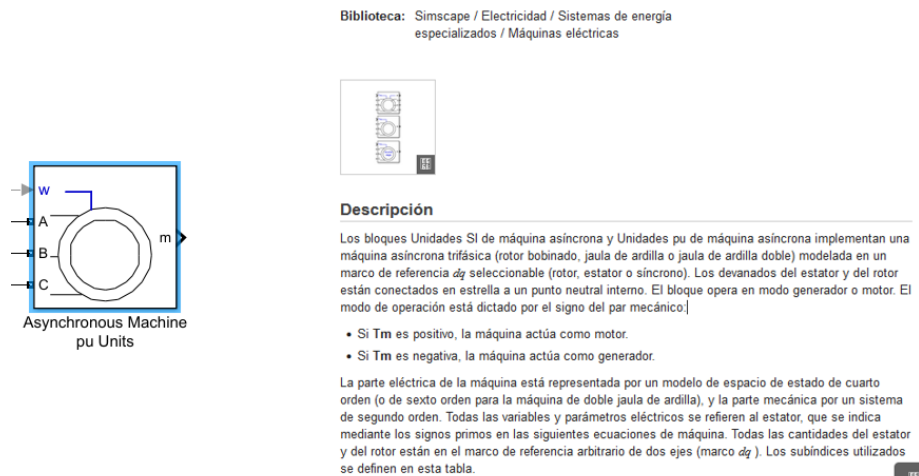


Imagen 36. Swicheo de un motor de inducción.
Fuente: Centro de ayuda de simulink MathWorks.

7.1.4. Energización de una carga capacitiva.

Para este evento se simulará la energización de una carga capacitiva con el fin de visualizar que pasa con la tensión cuando la micro red este en pleno funcionamiento y ver como esto

puede afectar los niveles de tensión de esta. En la imagen 37 vemos cómo será el modelo para este evento.

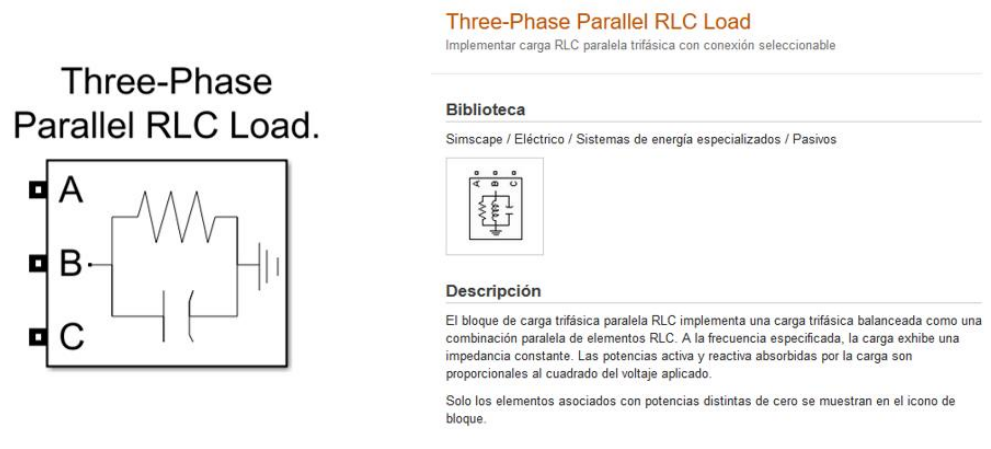


Imagen 37. Energización de una carga capacitiva.
Fuente: Centro de ayuda de simulink MathWorks.

7.1.5. Energización de un transformador.

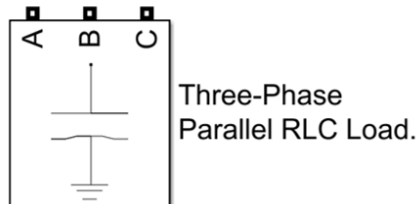
Igual que en el caso del inciso 7.1.3 energizaremos un equipo, pero en este caso será un transformador y sin carga y observaremos que ocurre con la onda de tensión y su valor por unidad durante este evento, se utilizará un Three-Phase Breaker para el swicheo del transformador.



Imagen 38. Energización de un transformador.
Fuente: Centro de ayuda de simulink MathWorks.

7.1.6. Energización de un banco de capacitores

En la imagen 39 observamos el modelo para la energización de un banco de capacitores en donde después de que el sistema esté operando a los valores establecidos se swicheara el banco de condensadores y observaremos lo que este modelo puede causar en la micro red.

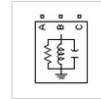


Three-Phase Parallel RLC Load

Implementar carga RLC paralela trifásica con conexión seleccionable

Biblioteca

Simscape / Eléctrico / Sistemas de energía especializados / Pasivos



Descripción

El bloque de carga trifásica paralela RLC implementa una carga trifásica balanceada como una combinación paralela de elementos RLC. A la frecuencia especificada, la carga exhibe una impedancia constante. Las potencias activa y reactiva absorbidas por la carga son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado.

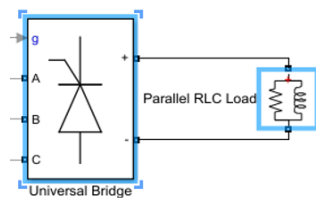
Solo los elementos asociados con potencias distintas de cero se muestran en el icono de bloque.

Imagen 39. Energización banco de capacitores.

Fuente: Centro de ayuda de simulink MathWorks.

7.1.7. Carga no lineal

Ahora bien, en los casos anteriores se usaron cargas lineales y para este último evento usaremos el modelo que vemos en la imagen 40 para modelar un sistema de cargas no lineales, este modelo se usa para simular muescas y armónicos causados por rectificadores trifásicos controlados por pulsos conectados a una carga inductiva resistiva monofásica, miramos las afectaciones que este modelo causa en la micro red.



Universal Bridge

Implementar convertidor de potencia universal con topologías seleccionables y dispositivos electrónicos de potencia

Biblioteca: Simscape / Electricidad / Sistemas de potencia especializados / Electrónica de potencia



Descripción

El bloque Universal Bridge implementa un convertidor de potencia trifásico universal que consta de hasta seis interruptores de potencia conectados en una configuración de puente. El tipo de interruptor de alimentación y la configuración del convertidor se pueden seleccionar en el cuadro de diálogo.

El bloque Universal Bridge permite la simulación de convertidores que utilizan dispositivos electrónicos de potencia (diodos o tiristores) conmutados naturalmente (o conmutados por línea) y dispositivos conmutados forzadamente (GTO, IGBT, MOSFET).

El bloque Universal Bridge es el bloque básico para construir convertidores de fuente de voltaje (VSC) de dos niveles.

Imagen 40. Carga no lineal.

Fuente: autor.

8. IMPACTOS DE LOS EVENTOS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA EN LA MICRO RED ELÉCTRICA.

8.1 Falla entre líneas y/o tierra.

La caída de tensión en múltiples etapas puede ser debido a problemas de sincronización de los múltiples mecanismos de eliminación de fallas, lo que puede causar cambios temporales de los valores de impedancia del sistema.

En la imagen 41 podemos observar la caída de tensión de múltiples etapas siendo la primera una falla asimétrica de la línea A-tierra con una impedancia de falla de 0.00001 y una impedancia de tierra de 0.0005 antes del autotransformador propagándose aguas abajo de este y después de 0.05 segundos sufrió un cambio presentándose ahora una falla doble línea (A-B) a tierra cambiando la impedancia de falla a 0.0001 pero manteniendo la impedancia a tierra de 0.0005.

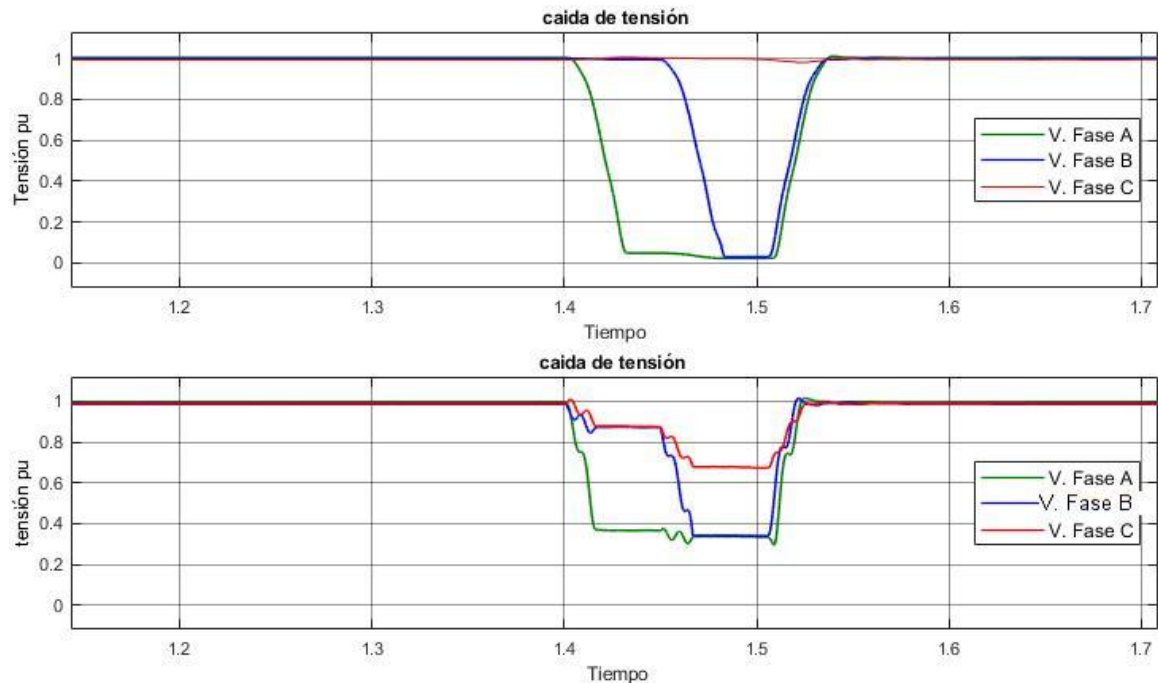


Imagen 41. simulación de la tensión en P.U ante caída de tensión de múltiple etapa.

Fuente: autor.

8.2. Falla permanente trifásico.

Durante la falla permanente trifásica el voltaje en el sistema no está presente y esta interrupción será prolongada hasta que se elimine la falla que la genero.



Imagen 42. Simulación de la tensión ante un estado permanente.
Fuente: autor.

8.3. Arranque de un motor de inducción.

En la imagen 43 se muestra la caída de tensión trifásica causada por el arranque de un motor de inducción al cerrar el contacto de arranque del motor, la magnitud de la caída de tensión del motor de inducción es determinada por la potencia nominal del motor de inducción. Cuanto mayor sea la potencia nominal del motor de inducción, menor será la magnitud del hundimiento.

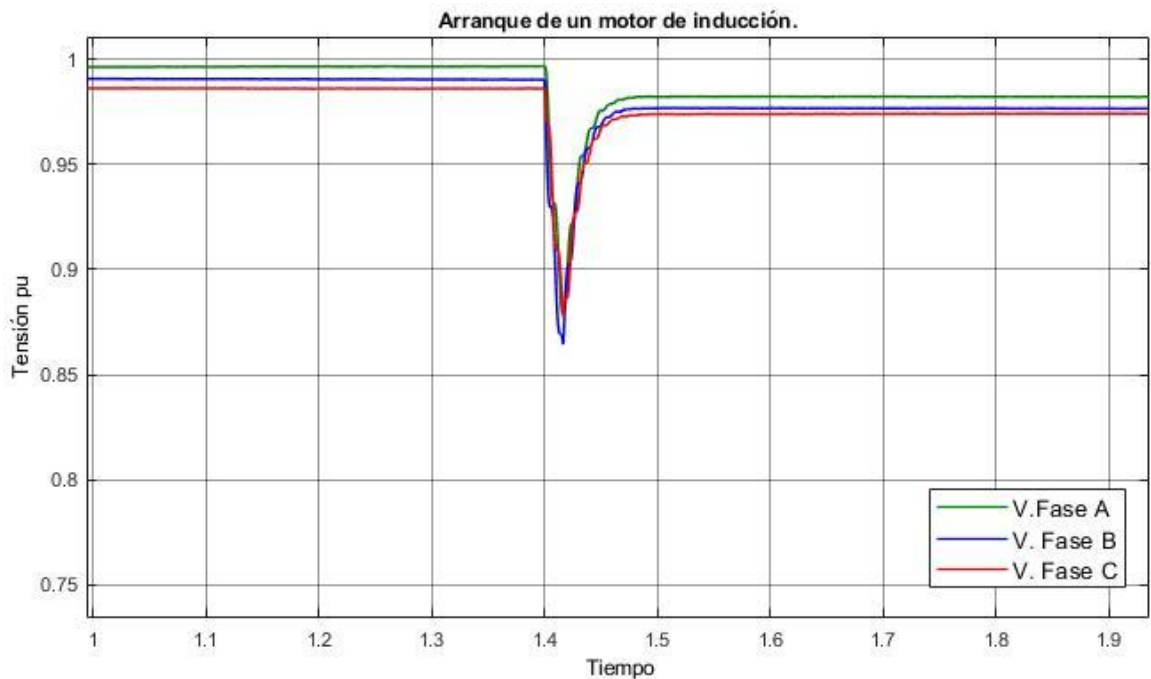


Imagen 43. Simulación de la tensión P.U debido al arranque de un motor de inducción.
Fuente: autor.

8.4. Energización de una carga capacitiva.

En la imagen 44 observamos lo que le ocurre a la onda de tensión en el momento de la energización de una carga capacitiva, dependiendo del tamaño de la carga esta perturbación se puede prolongar un poco más de lo que se muestra en la gráfica, y en la imagen 45 vemos dicha carga hace que la tensión rms y su corriente de operación del sistema cambie de un valor inicial de aproximadamente 220 voltios a casi 230 V haciendo una variación de 10 voltios y permaneciendo en el tiempo en lo que la carga este en operación.

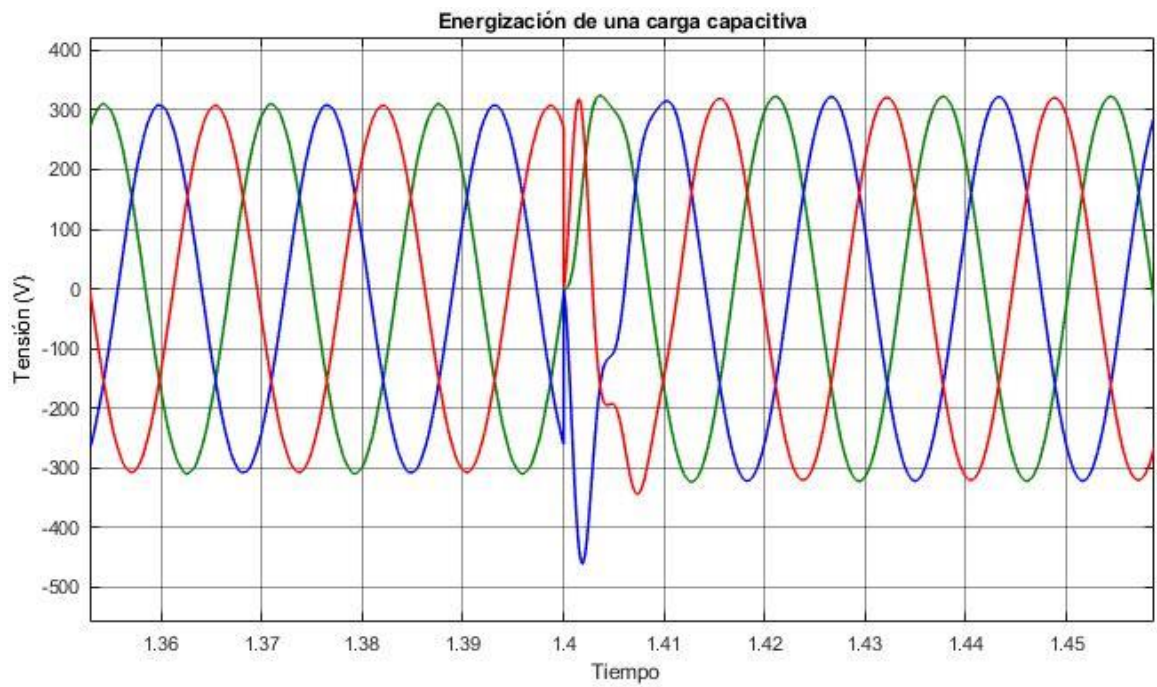


Imagen 44. simulación de la forma de onda de la tensión debido a la energización de una carga capacitiva.

Fuente: autor.

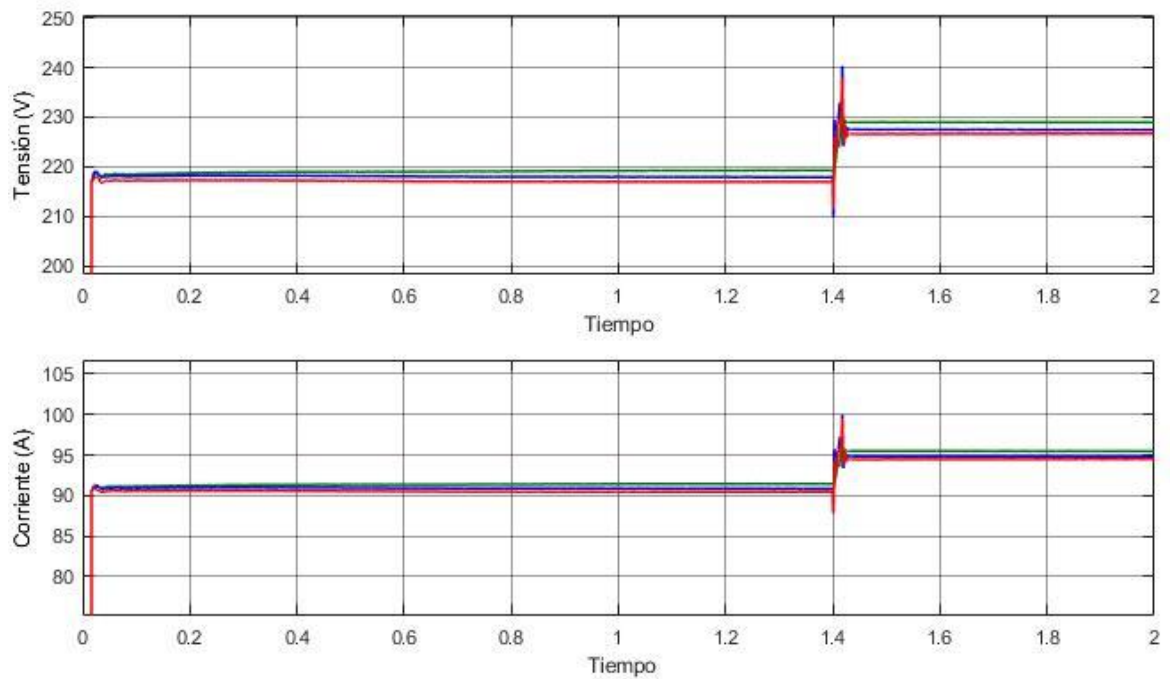


Imagen 45. Simulación del valor RMS de la tensión y la corriente debido a la energización de una carga capacitiva.

Fuente: autor.

8.5. Energización de un transformador.

En la imagen 46 se muestra la caída de tensión debido a la energización del transformador, las 3 fases experimentan caídas de voltaje diferentes en magnitud a medida que se propaga la corriente a través del transformador alterando la falla. La magnitud de la caída de tensión al energizar el transformador es determinada por la potencia nominal del transformador, cuanto mayor sea la potencia nominal del transformador menor será la magnitud del hundimiento.

En la imagen 47 vemos como es el comportamiento del factor de potencia del sistema en donde se ve un cambio súbito en la carga en donde la red eléctrica suplirá esta nueva potencia manteniendo el comportamiento de la generación eólica y fotovoltaica.

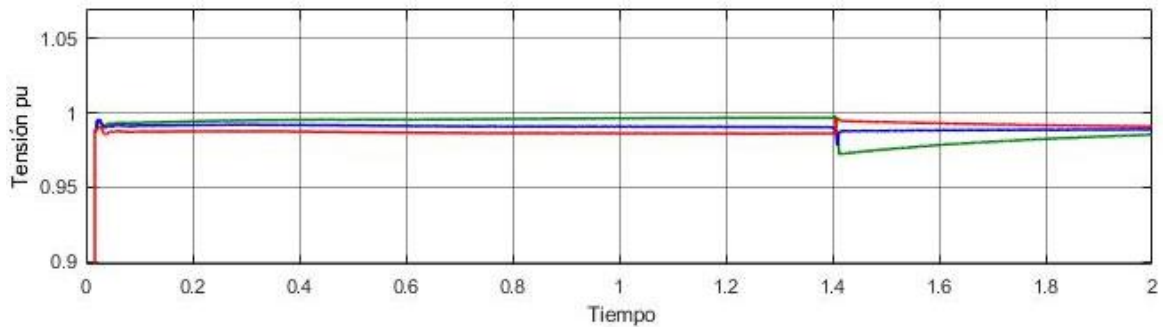


Imagen 46. Simulación de la tensión P.U debido a la energización de un transformador.

Fuente: autor.

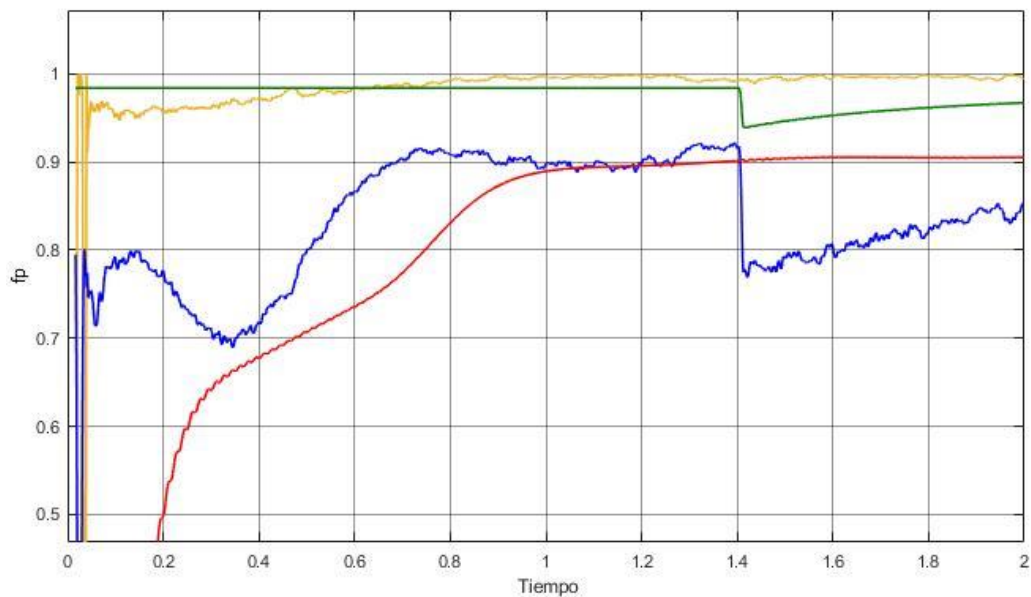


Imagen 47. Simulación del fp del sistema debido a la energización de un transformador.

Fuente: autor.

8.6. Energización de un banco de capacitores.

En la imagen 48 podemos observar el comportamiento de la onda ante la energización del banco de capacitores, lo que provoca que se presente una tensión transitoria que disminuye a medida que se propaga la corriente aguas arriba. La frecuencia transitoria de voltaje está determinada por el tamaño del banco de capacitores, cuanto mayor sea el tamaño del banco de capacitores, menor será la frecuencia transitoria del voltaje. La velocidad del transitorio depende del tamaño de la carga, una carga mayor proporciona un factor de amortiguamiento más alto.

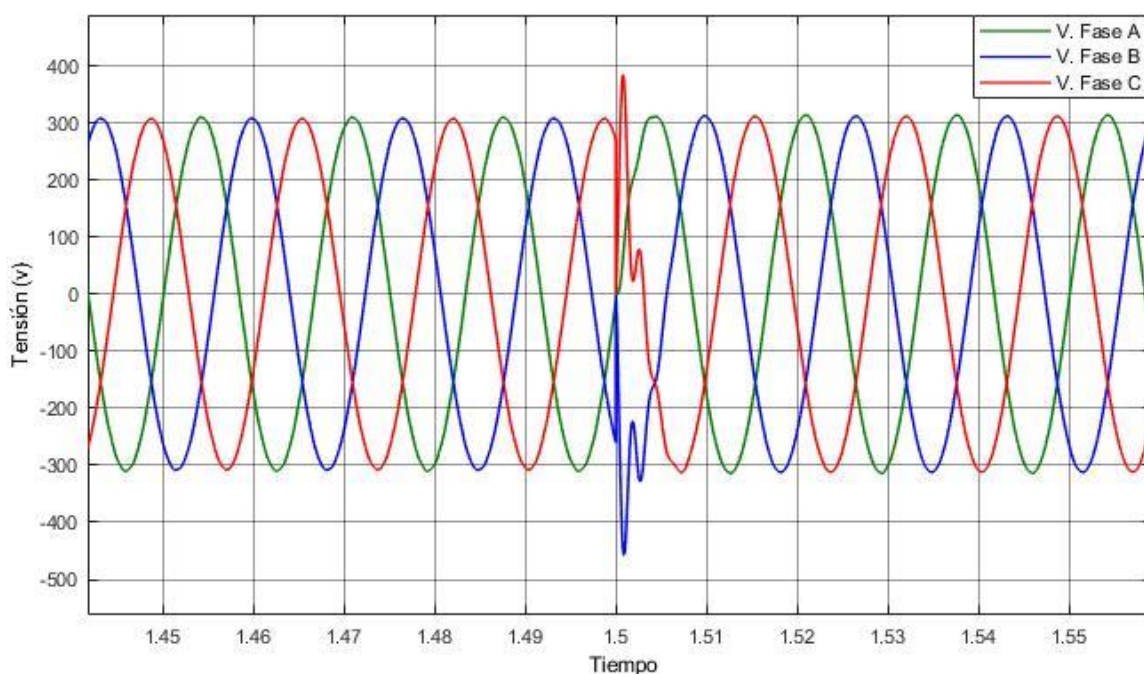


Imagen 48. Simulación de la forma de onda de la tensión de la energización de un banco de capacitores.

Fuente: autor.

Como podemos ver en la imagen 49 mejora en gran medida el factor de potencia de la red eléctrica y un poco el de la carga, pero como también podemos observar en la imagen 50 la potencia activa del sistema no se ha modificado pero el de la potencia reactiva si haciendo que la carga comience a generar reactivos y que a su vez la red los comience a absorber tratando entre estas dos mantener un equilibrio sin afectar en gran medida la generación fotovoltaica y le eólica.

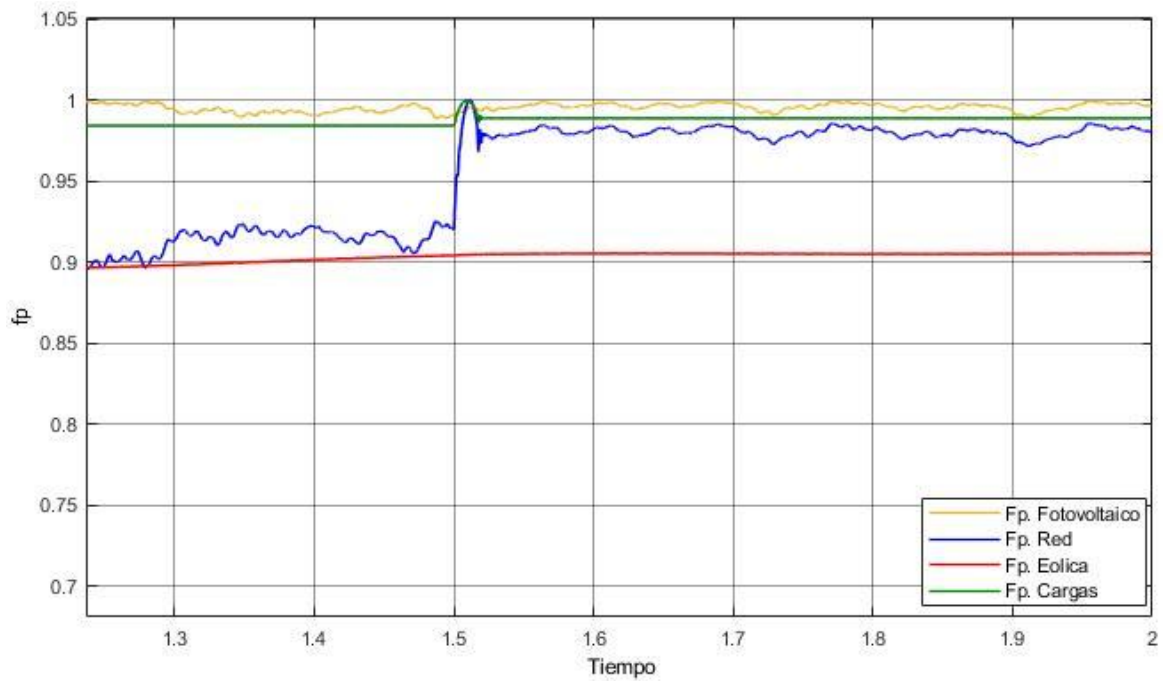


Imagen 49. Simulación del fp al energizarse un banco de condensadores.
Fuente: autor.

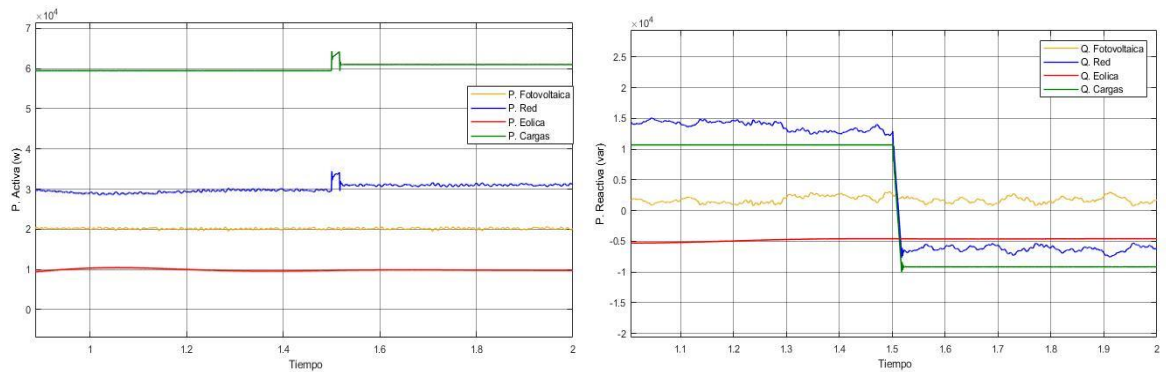


Imagen 50. Simulación de la izquierda P. activa, simulación de la derecha P. reactiva.
Fuente: autor.

8.7. Carga no lineal.

En la imagen 51 vemos las muescas generadas por un rectificador trifásico, la profundidad de la muesca del voltaje disminuye significativamente aguas arriba por el transformador, la profundidad de la muesca se determina por medio del ángulo de disparo del rectificador trifásico y el ancho por la carga inductiva monofásica. Cuanto mayor sea la carga inductiva

más ancha será la muesca de la onda de tensión no solo distorsionándola, sino que también introduciendo armónicos al sistema.

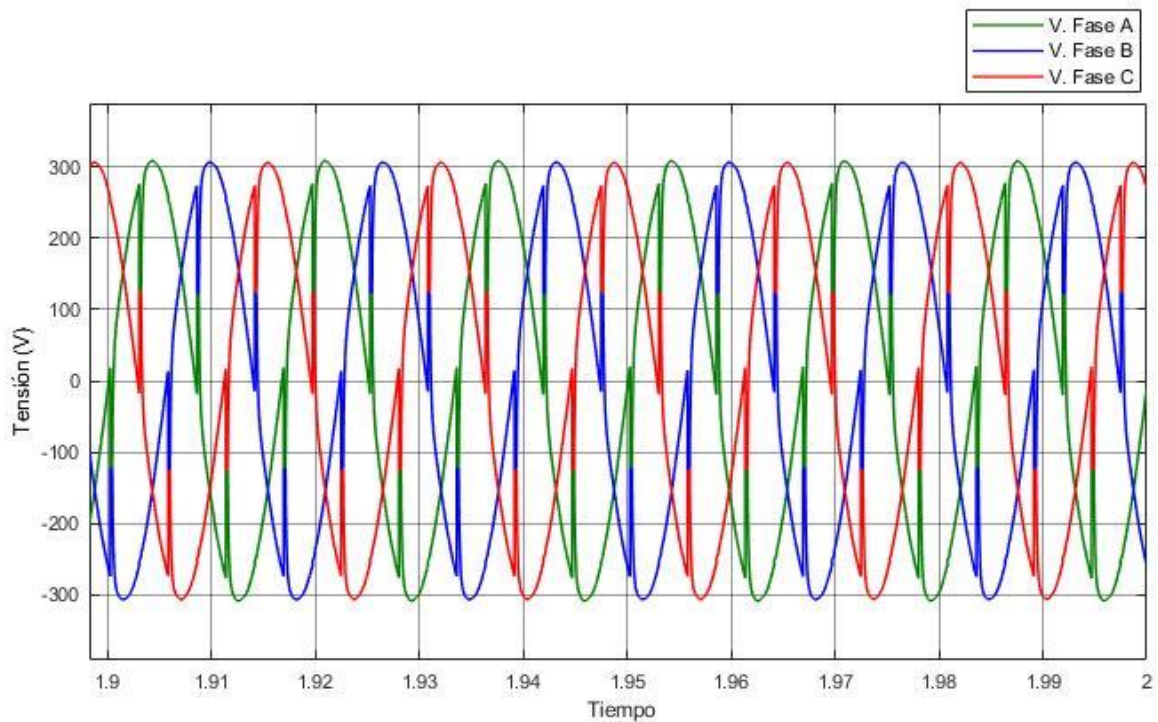


Imagen 51. Simulación de la forma de onda de una carga no lineal.
Fuente: autor.

En la imagen 52 por medio de una de las funciones que tiene Matlab se analizó los últimos ciclos de la onda evidenciando en gran medida el porcentaje de distorsión armónica total estando este alrededor del 16%, a su vez se hizo un modelo que midiera el THD del modelo a través del tiempo pudiéndose ver en la imagen 53 como la distorsión de la onda a medida que se efectúa la simulación arrojando un valor similar en el mismo lapso de tiempo que la función que tiene Matlab llamada FFT análisis.

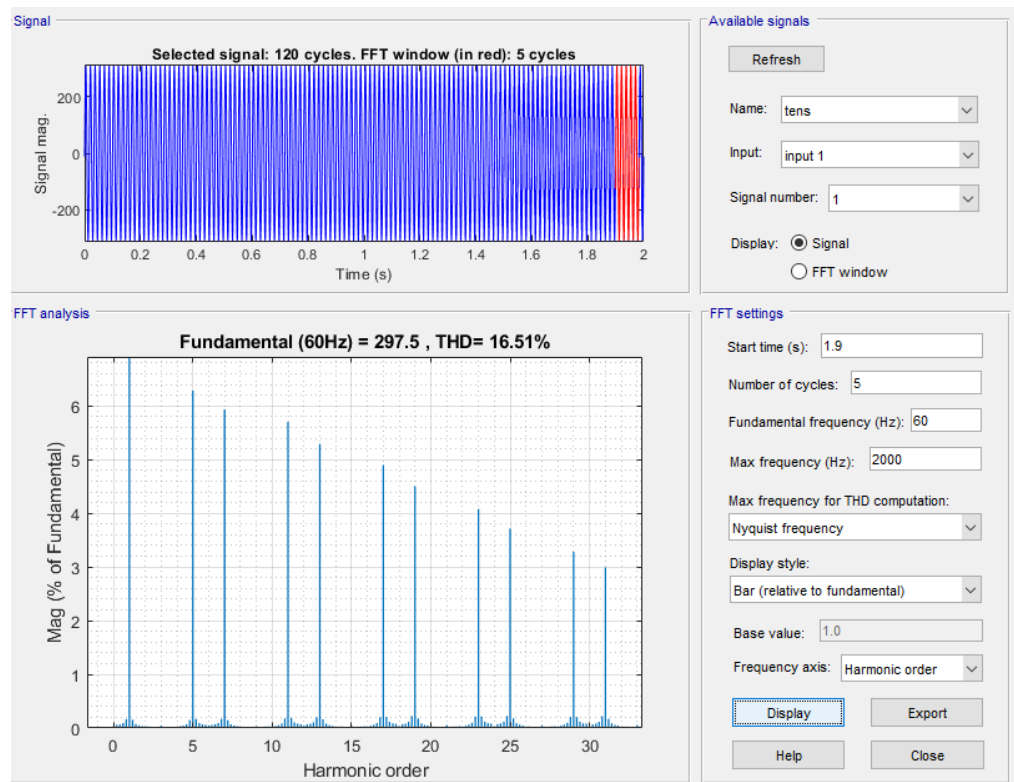


Imagen 52. Simulación del THD por interacción de una carga no lineal.
Fuente: autor.

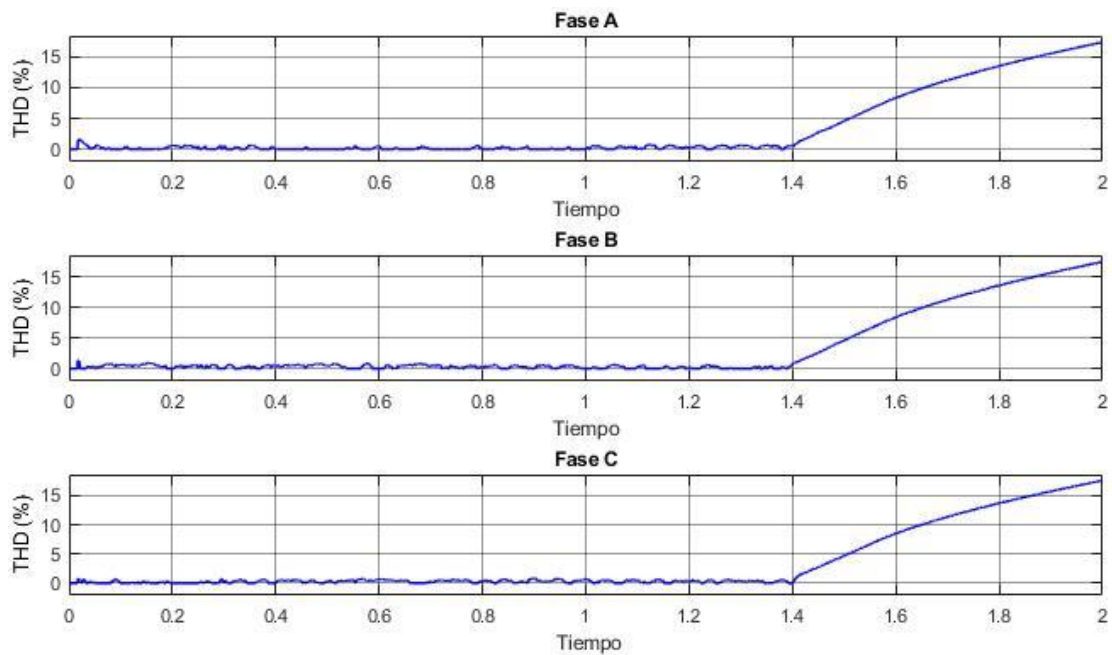


Imagen 53. Simulación del THD respecto al tiempo con interacción de una carga no lineal.
Fuente: autor.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Este modelo en simulink sirve como modelo base para darle más complejidad tanto en su funcionamiento como a los eventos de calidad de la energía.
- De los modelos expuestos de calidad de la energía, se concluye que cada operación que se lleve a cabo en una red eléctrica conlleva a la perturbación de la red y que dependiendo del tamaño de la carga y propiedades de estas puede afectar en mayor o menor medida la red.
- Cuando se tiene una red conectada a un sistema de energía distribuida dependiendo del tipo de perturbación que se presente las generaciones en este caso la fotovoltaica y la eólica trataran de mantener la generación constante sin tanta variación en ella haciendo que sea la red la que supla los cambios repentinos de estas variaciones.
- A la hora de diseñar o anexar equipos a la red es muy bueno considerar las potencias y el funcionamiento de las potencia por que como vemos en el modelo de los bancos de condensadores a pesar de mejorar el factor de potencia del sistema esto no implica que este funcione mejor haciendo que este cambiara drásticamente el comportamiento de sus potencias e igualmente con las generaciones distribuidas que se instalen dado que se tiene que usar sistemas de control en donde dichas instalaciones traten siempre de suministrar la máxima potencia posible sin afectar su buen funcionamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Diseño y Simulación de las Diferentes Etapas de Control en una Micro red Eléctrica. Dspace.ups.edu.ec. (2010). Visto el 13 marzo 2021, Tesis pregrado universidad distrital Francisco José de caldas, facultad de ingeniería. visto en : <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2110/13/UPS-GT000145.pdf>
- [2] Calidad de Energía Eléctrica - IECOR. IECOR. (2021). Visto el 13 de marzo del 2021, visto en <https://www.iecor.com/calidad-de-energia-electrica/>
- [3] Determinación de la potencia de transformadores para alimentar cargas no lineales. Visto el 20 de mayo 2021, Tesis previa a la obtención del título de ingeniero eléctrico en la especialización de sistemas eléctricos de potencia. Visto en <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5992/1/T290.pdf>.
- [4] Resolución 281 del 2015 (2021). Visto el 19 May 2021, en https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/18995913/res_281.pdf/6077cb6c-dabc-43fc-8403-cb1c5e832b37.
- [5] Creg 024 del 2015. Artículo 12 Creg.gov.co. (2021). Visto el 19 May 2021, en <https://www.creg.gov.co/sites/default/files/creg024-2015.pdf>.
- [6] Xiaohui Wang, Yiming Zheng, Zhongshan Lu. (mayo del 2019). Simulation Research on the Operation Characteristics of a DC Microgrid. Publicado en 2019 IEEE Third International Conference on DC Microgrids (ICDCM)
- [7] Guohong Wu, Seiya Ishida, Hang Yin (mayo del 2019). DC Voltage Stabilization in DC/AC Hybrid Microgrid by Cooperative Control of Multiple Energy Storages. Publicado en: 2019 IEEE Third International Conference on DC Microgrids (ICDCM)
- [8] Haiyue Wang; Eric Xu (octubre 2019). Real-Time Simulation and Close-Loop Testing of Microgrids. Publicado en: 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)
- [9]. Significado de Viento. Significados. (2021). Visto el 5 May 2021, en <https://www.significados.com/viento/>.
- [10] . LA ENERGÍA EÓLICA: Principios básicos y tecnología. Visto el 5 May 2021, Catedrático de máquinas y motores térmicos, escuela politécnica superior, departamento de ingeniería, universidad de Carlos III de Madrid. Visto en <https://docplayer.es/4416824-La-energia-eolica-principios-basicos-y-tecnologia.html>.

[11] Emulación del proceso de generación de energía eléctrica de un generador de baja potencia usando Hardware-in-the-loop Visto el 5 May 2021, Pasantía de investigación para optar al título de ingeniero electrónico y de telecomunicaciones. Visto en <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10784/T08408.pdf?sequence=6&isAllowed=y>.

[12] diseño y simulación de un emulador de red eléctrica para aplicaciones en energía solar. Visto el 20 de mayo 2021, trabajo de titulación previa a la obtención del título de ingeniero eléctrico. Visto en <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12238/1/UPS-CT006331.pdf>.

[13] 9 ventajas y 9 desventajas de la energía eólica. Diferenciador. (2021). Visto el 20 de mayo 2021, en <https://www.diferenciador.com/ventajas-y-desventajas-de-la-energia-eolica/>.

[14] 10 Ventajas y 10 desventajas de la energía solar. Diferenciador. (2021). Visto el 20 de mayo 2021, en <https://www.diferenciador.com/energia-solar-ventajas-y-desventajas/>.

[15] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality (IEEE Std. 1159-1995). Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN 1-55937-549-3. Estados Unidos, 1995.

[16] norma de conexión de autogeneradores y generadores distribuidos a los sistemas de distribución de energía eléctrica del grupo EPM. Visto el 20 de mayo del 2021. Visto en: <https://feriaexposolar.com/wp-content/uploads/2019/11/RA9-001-Conexi%C3%B3n-AG-GD-al-SDE-Grupo-EPM.pdf>

[17] Implement PV array modules - Simulink. Mathworks.com. (2021). Visto el 20 de mayo 2021, en <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pvarray.html>.

[18] Implement phasor model of squirrel-cage induction generator driven by variable pitchwind turbine - Simulink. Mathworks.com. (2021). Visto el 20 de mayo 2021, en <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/windturbineinductiongeneratorphasortype.html>.

[19] Implement three-phase parallel RLC load with selectable connection - Simulink. Mathworks.com. (2021). Visto el 20 de mayo 2021, en <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephaseparallelrlcload.html>.

[20] Implement programmable phase-to-phase and phase-to-ground fault breakersystem - Simulink. Mathworks.com. (2021). Visto el 20 de mayo 2021, en <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/threephasefault.html>.

[21] Model the dynamics of simplified three-phase synchronousmachine - Simulink. Mathworks.com. (2021). Visto el 20 May 2021, visto en <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/simplifiedsynchronousmachine.html>.

[22] Adel Merabet; Rupak Kanti Dhar (febrero del 2019). Solar Photovoltaic Microgrid Simulation Platform for Energy Management Testing. Publicado en: 2019 Algerian Large Electrical Network Conference (CAGRE)