



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

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LAS CARGAS NO LINEALES EN MICRO REDES AUTÓNOMAS

AUTOR

RAMIRO FLOREZ PABÓN

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



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA – NORTE DE SANTANDER-COLOMBIA,
25 DE JUNIO 2022**

**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LAS CARGAS NO LINEALES EN
MICRO REDES AUTÓNOMAS**

RAMIRO FLOREZ PABÓN

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA
OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

**DIRECTOR:
EDISON ANDRÉS CAICEDO PEÑARANDA
INGENIERO ELÉCTRICO**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PAMPLONA - NORTE DE SANTANDER - COLOMBIA
25 DE JUNIO 2021**

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado especialmente a Dios, a mis padres María Pabon y Ramiro Florez que me han apoyado en cada momento, a mi hermana que siempre me han brindado su apoyo incondicional, también a cada una de las personas que han influenciado en mi vida, brindándome sus experiencias, consejos y demás conocimientos para que día a día me convirtiera en la gran persona que me estoy formado.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme la oportunidad y la sabiduría para afrontar todo el proceso de aprendizaje profesional.

A mis padres y hermana que han sido un apoyo incondicional en todo el proceso para formar el sueño de ser un Ingeniero.

A mi director de trabajo de grado, M.Sc. Edison Andrés Caicedo Peñaranda por guiarme y brindarme cada uno de sus conocimientos en esta parte final de mi formación como profesional.

A todos los docentes que han participado en mi proceso de formación y que aportaron su experiencia y sabiduría para hacer este sueño realidad.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	14
2. JUSTIFICACIÓN	15
3. OBJETIVOS.....	16
3.1 OBJETIVO GENERAL	16
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	16
4. MARCO DE REFERENCIA	17
4.1 SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.....	17
4.1.1 Generación.....	17
4.1.2 Transmisión.....	17
4.1.3 Distribución	18
4.2 MICRO RED AUTONOMA	18
4.2.1 Control en micro redes.....	19
4.2.1.1 Control centralizado	19
4.2.1.2 Control descentralizado.....	19
4.2.1.3 Control distribuido	19
4.2.1.4 Control jerárquico	20
4.3 ELEMENTOS DE UNA MICRO RED	20
4.3.1 El convertidor de potencia.....	20
4.3.2 Líneas	22
4.3.3 Generadores distribuidos	22
4.4 FUENTES DE GENERACIÓN	23
4.4.1 Generación hidroeléctrica	23
4.4.2 Generación solar fotovoltaica	24
4.4.3 Generación eólica.....	24
4.5 CARGAS.....	25
4.5.1 Carga lineal	25
4.5.2 Carga no lineal	25
5 SIMULACIÓN MICRO RED AUTONOMA	26
5.1 GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA	26
5.1.2 Modelo de sistema de generación hidroeléctrica	26
5.1.3 Parámetro de la minicentral.....	27

5.2 GENERACIÓN EÓLICA	29
5.2.1 Modelo de sistema eólico	30
5.2.3 Parámetro del sistema eólico	30
5.3 GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	32
5.3.1 Modelo de sistema fotovoltaico	34
5.3.2 Convertidor de 6 interruptores	34
5.3.3 Parámetros del sistema fotovoltaico	35
5.4 MICRO RED AUTÓNOMA CON CARGAS FIJAS.	37
5.4.1 Carga lineal conectada al sistema hidroeléctrico	37
5.4.2 Carga lineal conectada al sistema eólico	38
5.4.3 Carga lineal conectada al sistema fotovoltaico	39
6 SINCRONIZACIÓN DE LA MICRO RED AUTÓNOMA	41
6.1 SINCRONIZACIÓN DE FASES DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	41
6.2 CONEXIÓN ENTRE SISTEMAS DE GENERACIÓN	42
6.3 EFECTOS DE CONEXIÓN EN VOLTAJES DE LA MICRO RED	43
6.4 EFECTOS DE CONEXIÓN EN CORRIENTES DE LA MICRO RED	44
6.5 EFECTOS DE CONEXIÓN EN POTENCIA DE LA MICRO RED	45
7. IMPLEMENTACIÓN DE CARGAS NO LINEALES A LA MICRO RED AUTÓNOMA.	46
7.1 PARÁMETROS DE LAS CARGAS NO LINEALES	47
7.2 ESTADO DE SEÑALES DE LOS SISTEMAS SIN CARGAS NO LINEALES	48
7.2.1 Parámetros sistema hidroeléctrico	48
7.2.2 Parámetros sistema eólico	52
7.2.3 Parámetros sistema fotovoltaico	57
7.2.4 Parámetros del bus de la micro red autónoma	61
7.3 ESTADO DE SEÑALES DE LOS SISTEMAS CON CARGAS NO LINEALES	63
7.3.1 Parámetros sistema hidroeléctrico	63
7.3.2 Parámetros sistema eólico	67
7.3.3 Parámetros sistema fotovoltaico	72
7.3.4 Parámetros del bus de la micro red autónoma.	76
8 IMPACTO DEL TRABAJO	78
9 CONCLUSIONES	79
10 RECOMENDACIONES	80
REFERENCIA	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de las pequeñas centrales hidroeléctricas según la CREG	23
Tabla 2 Clasificación de las maquina eólicas según su potencia. [25]	25
Tabla 3. Parámetros iniciales del sistema de la minicentral hidroeléctrica.....	28
Tabla 4. Parámetros iniciales del sistema de generación eólica.	32
Tabla 5. Parámetros iniciales del sistema de fotovoltaica.....	37
Tabla 6. Parámetros de las cargas no lineales.	47
Tabla 7. Porcentaje de armónicos en voltajes del S. hidroeléctrico.....	49
Tabla 8. Porcentaje de armónicos en corrientes del S. hidroeléctrico.	51
Tabla 9. Porcentaje de armónicos en voltajes del S. eólico.	53
Tabla 10. Porcentaje de armónicos en corrientes del S. eólico.....	55
Tabla 11. Porcentaje de armónicos en voltajes del S. fotovoltaico.	57
Tabla 12. Porcentaje de armónicos en corrientes del S. fotovoltaico.	59
Tabla 13. Porcentaje de armónicos en voltajes del bus de la micro red autónoma.	61
Tabla 14. Porcentaje de armónicos en voltajes del S. hidroeléctrico con cargas no lineales.	64
Tabla 15. Porcentaje de armónicos en corrientes del S. hidroeléctrico con cargas no lineales.....	66
Tabla 16. Porcentaje de armónicos en voltajes del S. eólico con cargas no lineales.	68
Tabla 17. Porcentaje de armónicos en corrientes del S. eólico con cargas no lineales.	70
Tabla 18. Porcentaje de armónicos en voltajes del S. fotovoltaico con cargas no lineales.	72
Tabla 19. Porcentaje de armónicos en corrientes del S. fotovoltaico con cargas no lineales.	74
Tabla 20. Porcentaje de armónicos en voltajes del bus de la micro red autónoma con cargas no lineales.	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema sistema eléctrico.	17
Figura 2 Esquema básico de una micro red	18
Figura 3 Esquema de convertidores de potencia para fuentes alternativas.	21
Figura 4 Sistemas eléctricos con y sin generación distribuida.	22
Figura 5 Bloque de generador síncrono de Simulink.....	26
Figura 6. Modelo de minicentral de generación hidroeléctrica.	27
Figura 7 Bloque Wind Turbine de Simulink.....	29
Figura 8 Modelo de referencia de generador eólico	29
Figura 9 Modelo básico de sistema de generación con energía eólica.....	30
Figura 10 Bloque PV array de Simulink.....	33
Figura 11 Circuito de referencia del bloque PV array de Simulink.....	33
Figura 12 Modelo general de sistema fotovoltaico en Simulink.....	34
Figura 13. Convertidor de 6 interruptores utilizado para sistema fotovoltaico.	35
Figura 14. Esquema de carga lineal conectada a la minicentral hidroeléctrica.	37
Figura 15 Esquema de la carga del sistema eólico.	38
Figura 16. Esquema de la carga conectada al sistema fotovoltaico.	39
Figura 17 Esquema de la micro red autónoma.	41
Figura 18. Micro red autónoma con cargas no lineales.	46
Figura 19. Esquema de cargas no lineales.....	47
Figura 20. Esquema de convertidor utilizado como puente universal.....	47
Figura 21. FTT voltajes sistema hidroeléctrico.....	48
Figura 22. Bloques para el análisis de Fourier usados en la simulación.	49
Figura 23. FTT corrientes sistema hidroeléctrico.	50
Figura 24. FTT voltajes sistema eólico.	53
Figura 25. FTT corrientes sistema eólico.....	55
Figura 26. FTT voltajes sistema fotovoltaico.....	57
Figura 27. FTT corrientes sistema fotovoltaico.	59
Figura 28. FTT voltajes del sistema de la micro red autónoma.	61
Figura 29. FTT voltajes sistema hidroeléctrico con cargas no lineales.....	64
Figura 30. FTT Corrientes sistema hidroeléctrico con cargas no lineales.	65
Figura 31. FTT voltajes sistema eólico con cargas no lineales.	68
Figura 32. FTT Corrientes sistema eólico con cargas no lineales.	70
Figura 33. FTT Voltajes sistema fotovoltaico con cargas no lineales.	72
Figura 34. FTT Corrientes sistema fotovoltaico con cargas no lineales.....	74
Figura 35. FTT Voltajes del sistema de la micro red autónoma.	76

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Voltaje de línea de la salida del generador síncrono.	27
Gráfica 2. Corrientes de línea de la salida del generador síncrono con carga de 5000W.	28
Gráfica 3. Potencia activa a la salida del generador síncrono con carga de 5000W	28
Gráfica 4 Voltajes de línea del generador eólico.	31
Gráfica 5. Corrientes de línea del generador eólico con una carga propia de 4500W	31
Gráfica 6. Potencia activa a la salida del generador eólico con carga de 4500W	32
Gráfica 7. Señal portadora y moduladora utilizadas en convertidor de 6 interruptores.	35
Gráfica 8. Voltaje de línea a salida del convertidor de 6 interruptores.	36
Gráfica 9. Corriente y voltaje a la salida del sistema fotovoltaico con carga de 1500W.	36
Gráfica 10. Voltaje y corriente de entrada a la carga de la minicentral.	38
Gráfica 11. Voltajes y corrientes de entrada a la carga del sistema eólico.	39
Gráfica 12. Voltajes y corrientes de entrada a la carga propia del sistema fotovoltaico.	40
Gráfica 13. Sincronización de señales de la fase A en la micro red autónoma.	42
Gráfica 14. Conexión entre señales de los sistemas de generación	43
Gráfica 15. Efectos de la conexión entre sistemas en los voltajes.	43
Gráfica 16. Efectos de la conexión entre sistemas en las corrientes.	44
Gráfica 17. Efectos de la conexión entre sistemas de generación en las potencias.	45
Gráfica 18. Espectro de magnitud del voltaje sistema hidroeléctrico.	50
Gráfica 19. Espectro de magnitud corriente sistema hidroeléctrico	51
Gráfica 20. Valores RMS de voltajes y corrientes del sistema hidroeléctrico	52
Gráfica 21. Espectro de magnitud voltaje sistema eólico.	54
Gráfica 22. Espectro de magnitud corriente sistema eólico.	56
Gráfica 23. Valores RMS de voltajes y corrientes del sistema eólico	56
Gráfica 24. Espectro de magnitud voltaje sistema fotovoltaico.	58
Gráfica 25. Espectro de magnitud corriente sistema fotovoltaico.	60
Gráfica 26. Valores RMS de voltajes y corrientes del sistema fotovoltaico.	60
Gráfica 27. Espectro de magnitud voltaje del sistema de la micro red autónoma.	62
Gráfica 28. Valores RMS de voltajes del bus del sistema de la micro red autónoma.	63
Gráfica 29. Espectro de magnitud del voltaje sistema hidroeléctrico con cargas no lineales.	65
Gráfica 30. Espectro de magnitud de la corriente del sistema hidroeléctrico con cargas no lineales.	66
Gráfica 31. Valores RMS de voltajes y corrientes del sistema hidroeléctrico con cargas no lineales.	67
Gráfica 32. Espectro de magnitud del voltaje del sistema eólico con cargas no lineales.	69
Gráfica 33. Espectro de magnitud de la corriente del sistema eólico con cargas no lineales.	71
Gráfica 34. Valores RMS de voltajes y corrientes del sistema eólico con cargas no lineales.	71
Gráfica 35. Espectro de magnitud del voltaje del sistema fotovoltaico con cargas no lineales.	73
Gráfica 36. Espectro de magnitud de la corriente del sistema fotovoltaico con cargas no lineales.	75

Gráfica 37. Valores RMS de voltajes y corrientes del sistema eólico con cargas no lineales	75
Gráfica 38. Espectro de magnitud del voltaje del sistema de la micro red autónoma.	77
Gráfica 39. Valor RMS de voltajes del sistema eólico con cargas no lineales.....	77

RESUMEN

El siguiente documento es un trabajo sobre los efectos que pueden generar las cargas no lineales en micro redes que trabajan de forma autónoma para lo cual se empezó por definiciones generales de aspectos que son relevantes para el entendimiento del funcionamiento de una micro red y los diferentes tipos de generación distribuida que se trabajaron, posterior a esto se realizó un modelado de una micro red autónoma por medio de Simulink herramienta que trae como complemento el software Matlab, a este modelo se le incluyo tanto cargas lineales como no lineales y se observó el comportamiento del sistema ante dichas cargas.

Palabras clave: *Micro redes, autogeneración, generación distribuida, calidad de la energía, cargas no lineales, armónicos.*

ABSTRACT

This document is a research about the effects that can generate the nonlinear loads in micro-grids that work autonomously. For this reason, an introduction to the general concepts that are relevant for a better comprehension of the micro-grids and the different types of distributed generation implemented was made. Afterwards, a model of an autonomous micro-grid was made using Simulink, a tool that is included in Matlab ® software. Linear and nonlinear loads were included to the micro-grid model and the micro-grid performance before these loads was observed.

Keywords: *Micro-grid, self generation, distributed generation, energy quality, non linear loads, harmonics*

1. INTRODUCCIÓN

Las micro redes autónomas son un sistema de distribución de energía que favorece aspectos como la generación distribuida que en su mayoría hace uso de energías renovables tales como las hidroeléctricas, aerogeneradores y la que ha tenido más acogida en los últimos años los sistemas fotovoltaicos, al ser un red autónoma puede funcionar en lugares remotos donde sería poco rentable expandir redes de transmisión para llegar al los usuarios, debido al los beneficios de estas redes se hace necesario un estudio sobre ellas.

En el siguiente documento se encuentra plasmado un trabajo de simulación de una micro red autónoma con tres tipos de generación distribuida, los cuales son una micro central hidroeléctrica que aparte de la generación cumple una función importante y es ser la referencia para la sincronización de las fases de los demás sistemas de generación que estarán conformados por un aerogenerador y un sistema de paneles fotovoltaicos conectados a un inversor para poner conectarse a la micro red como un conjunto.

Se realizará un estudio de las señales de voltaje y corriente a la salida de cada uno de los sistemas de generación y del bus al que se conecta la micro red, en estas variables se analizaran los valores RMS para ver si existen fluctuaciones de voltajes y corrientes, así como los armónicos presentes en la red para posterior comparación en las mismas variables cuando se conecta a la red un conjunto de cargas no lineales.

2. JUSTIFICACIÓN

Debido a la constante búsqueda de un mayor alcance territorial y la no dependencia de una red global en la utilización de energía eléctrica, se hace necesario plantear una solución para suplir de energía eléctrica a zonas alejadas o de difícil acceso ya que la extensión de la redes convencionales hasta este punto, genera un alto costo en la implementación además de problemas de eficiencia, por tanto surge la necesidad de introducir micro redes autónomas capaces de satisfacer la necesidad de energía eléctrica en dichas zonas y plantear una independencia de una red global, en este orden de ideas debido a que en la actualidad hay cargas que son de uso industriales como comerciales y residenciales que usan sistemas basados en electrónica de potencia, los cuales pueden llegar a ser la causa de distorsión armónica en la red, y en algunas condiciones pueden tener efectos sobre la magnitud, la amplitud, la forma de onda, y la simetría del voltaje donde se utilizan estos dispositivos, estas afectaciones pueden ser causales de pérdidas producidas por el sobrecalentamiento, elevadas corrientes, efectos resonantes o sobrecargas de la capacidad de los elementos, de tal forma y a fin de poder evaluar los aspectos relacionados al análisis por la implementación de cargas no lineales se modelará una micro red autónoma, para conocer los efectos de dichas cargas en el voltaje y corriente y si pueden causar efectos en la calidad de la energía.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar mediante simulación los efectos de las cargas no lineales en micro redes de autónomas.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

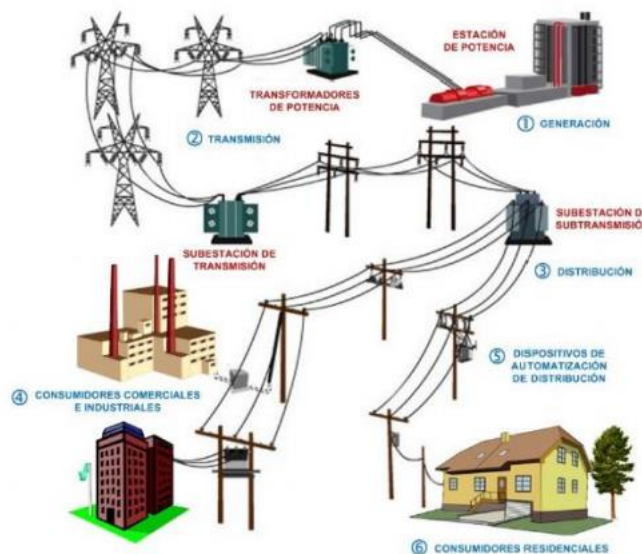
- Desarrollar un modelo de simulación que satisfaga una micro red de generación autónoma.
- Programar un conjunto de cargas no lineales integradas al modelo de micro red.
- Establecer los efectos de las cargas no lineales en la micro red de generación autónoma

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1 SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

Un sistema eléctrico se define como una red compuesta por un conjunto de instalaciones, conductores y equipos necesarios para el aprovechamiento final de la energía eléctrica. Los sistemas eléctricos en la actualidad están divididos en subsistemas de generación, transmisión y distribución. [1]

Figura 1. Esquema sistema eléctrico.



Fuente: Extraído de “Las Pérdidas de Energía Eléctrica” [2]

4.1.1 Generación

La generación de energía eléctrica se basa en la transformación de un tipo de energía como lo puede ser la cinética, térmica, química, solar entre otras en energía eléctrica. En los grandes sistemas eléctricos la generación se caracteriza por estar concentrada en unas pocas centrales de generación que alimentan sistemas de potencia con capacidades instaladas en el orden de los MW. [3]

4.1.2 Transmisión

Los sistemas de transmisión consisten en líneas de conductores que pueden abarcar largas distancias y que conectan centrales de generación con los grandes centros de consumo, generalmente empiezan por subestaciones que elevan la tensión y terminan en subestaciones reductoras de tensión. [3]

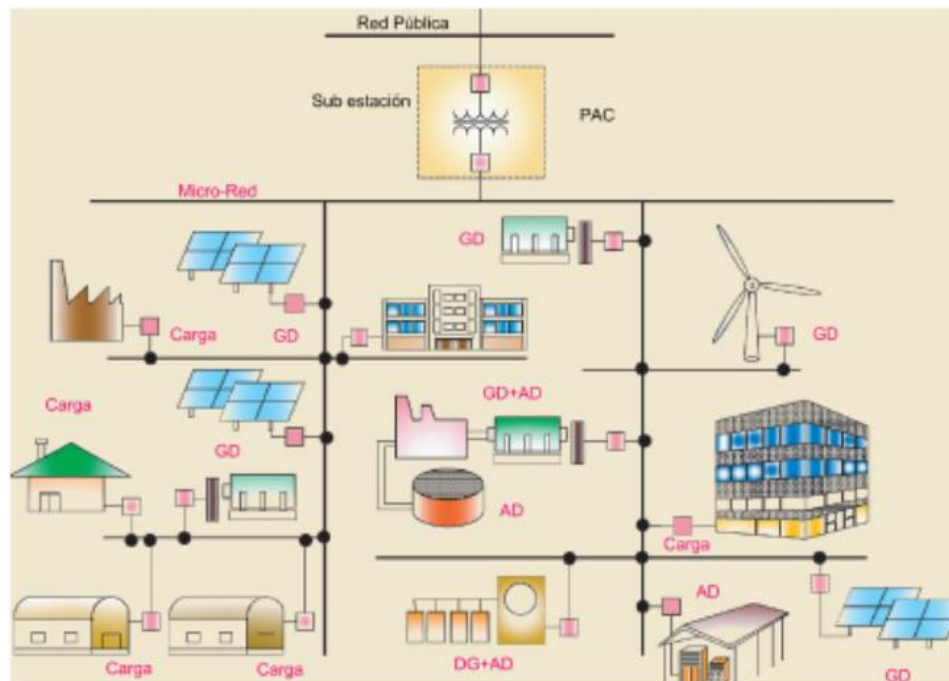
4.1.3 Distribución

La distribución de la energía eléctrica es la fase final de un sistema eléctrico, está formada por un conjunto de cables y centros de transformación, en esta fase se lleva la energía desde los sistemas de transmisión hasta los diferentes tipos de usuarios que existen tales como residenciales, industriales y comerciales. [4]

4.2 MICRO RED AUTONOMA

Una micro red es una red eléctrica de pequeña escala que se trabaja a nivel de distribución, limitada en extensión conformada por un conjunto de cargas, elementos distribuidos de generación y dispositivos de almacenamiento de energía. Son sistemas que pueden trabajar de dos modos, en conexión a un sistema de potencia y de forma totalmente autónomos debido a la utilización de tecnologías de comunicación y control en el sistema de potencia, son consideradas como cargas para la red de potencia. [5]-[6] En la Figura 2 se puede observar una estructura básica de una micro red en la cual existen diferentes puntos de generación distribuida que se encuentran cerca de las cargas a de más de estar conectados a una red pública, pero de ser necesario esta micro red podría trabajar de forma aislada.

Figura 2 Esquema básico de una micro red



Fuente: Extraído de “Microrredes basadas en Electrónica de Potencia: Características, Operación y Estabilidad” [30]

Estos sistemas tienen como objetivo, permitir el intercambio bidireccional de energía y mejorar la calidad del suministro a través de un del control de múltiples generadores distribuidos que se encuentran operando simultáneamente, que para el caso de este trabajo se encontrara con una micro red con tres diferentes sistemas de generación. Estos generadores en este tipo de sistemas son no convencionales, tales como generadores eólicos, celdas fotovoltaicas, pequeñas centrales hidroeléctricas, o sistemas de almacenamiento de energía entre otros, estos generadores realizan una función importante para el futuro de los sistemas eléctricos, disminuyendo las emisiones producidas por la quema de combustibles fósiles, cambiando la tendencia a la expansión y desarrollo de los sistemas de distribución. [7]

4.2.1 Control en micro redes

Existen diferentes métodos de control para las micro redes esto depende de sus características (composición y configuración) y a los diferentes objetivos para las que se quieren diseñar. Entre los métodos existen: control centralizado, descentralizado, distribuido y jerárquico. [8]

4.2.1.1 Control centralizado

El esquema de control centralizado utiliza un controlador principal el cual, por medio de sensores adaptados a la micro red y un canal de comunicaciones, intercambia datos con los controladores locales para toma de decisiones según esta información. Estas características hacen que este tipo de control tenga buenos efectos para redes pequeñas, manejadas por un solo operador. Sin embargo, como desventajas se encuentran: la alta dependencia de los canales de comunicación, la poca flexibilidad para expansiones de las futuras micro red y los altos costos en su configuración. [8]

4.2.1.2 Control descentralizado

Este tipo de control no hace uso de una comunicación entre las diferentes unidades generadoras debido a que con el monitoreo de las variables locales es suficiente para la toma de decisiones, para este caso, se hace uso de las mediciones y los algoritmos a nivel local. Este tipo de control se emplea comúnmente para micro redes con alta capacidad. Este control permite una mayor Flexibilidad para futuras expansiones y los algoritmos utilizados son menos complejos que en comparación al control centralizado esto debido al manejo de controladores a nivel local. [8]-[9]

4.2.1.3 Control distribuido

Este control utiliza las características del control local propio y de la estructura descentralizada y hace uso del esquema centralizado. utiliza canales de comunicación con sus controles locales vecinos, esto permite una optimización de recursos del sistema. [8]

4.2.1.4 Control jerárquico

El control jerárquico está basado en el control de frecuencia de los sistemas de potencia. Este tipo control se divide en tres niveles: control primario, control secundario y control terciario.[8]

El control primario es el control de cada generador, a través de la toma de medidas locales regula la frecuencia y las tensiones en nodos de la micro red, con una correcta distribución de las potencias entre los generadores. Para esto se utiliza varios controles, como lo son los de voltaje y corriente a la salida del generador, también los controles de potencia activa y reactiva y diferentes controles electrónicos de potencia a nivel del generador distribuido, además de los diferentes convertidores. El control primario se encarga de llevar la micro red a un punto de equilibrio estable, aun cuando la frecuencia y la tensión difieran de sus valores nominales. [10]

La función del control secundario es tener al sistema en un punto de operación estable, pero incluyendo valores de frecuencia y voltaje para que estén en los rangos nominales. Este control puede ser distribuido o centralizado. En cualquier de los dos casos, se debe hacer uso de comunicaciones. [11]

En el control terciario su función está relacionada con la coordinación con el sistema de potencia, el flujo de carga adecuado y la optimización de la operación. Este control se basa en un modelo de optimización, que generalmente es centralizado y busca disminuir costos de operación y pérdidas y que tiene en cuenta limitaciones operativas de los elementos generadores y de sistemas de almacenamiento, como también de la red. [12]

4.3 ELEMENTOS DE UNA MICRO RED

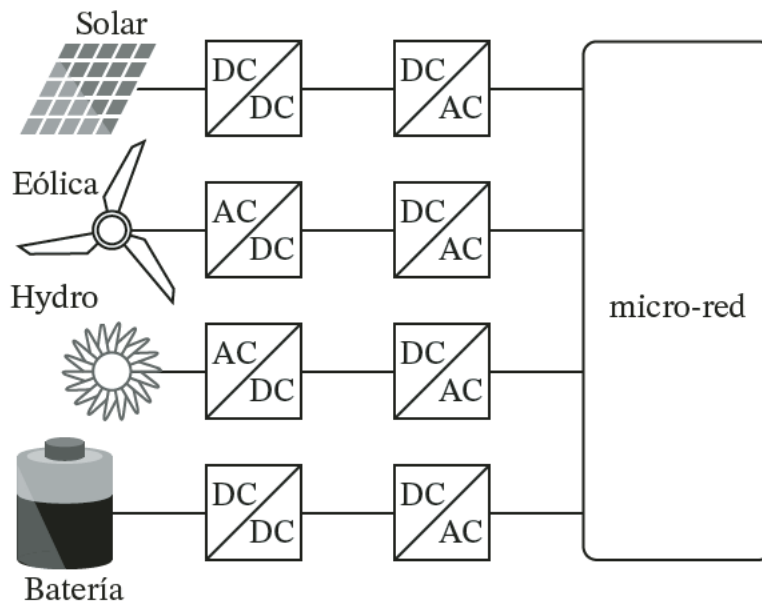
Existen un conjunto de elementos que conforman las micro redes, partiendo de que estas pueden ser en corriente alterna, en corriente continua o mixtas. Se presentan a continuación las características generales de dichos elementos. [8]

4.3.1 El convertidor de potencia

Las fuentes de energía renovables no convencionales y los bancos de almacenamiento de energía necesitan un convertidor de potencia para conectarse a la red y aprovechar de una mejor manera, el recurso energético a partir del cual se obtiene energía eléctrica. [13]

En la Figura 3 se plasma un esquema de las configuraciones de convertidores comúnmente utilizadas para integrar a una micro red sistemas solares, eólicos, baterías y sistemas de hidroeléctricas de pequeña escala. Estas configuraciones son eficientes y permiten una estrategia similar de control, debido a que el lado de la micro red tiene la misma estructura. [14]

Figura 3 Esquema de convertidores de potencia para fuentes alternativas.



Fuente: Extraído de “Modelizado de componentes en micro redes AC” [8]

Se observa en la Figura 3 que para el caso de los paneles solares comúnmente requieren una configuración de convertidores en cascada, estos tienen dos etapas de conversión DC-DC y DC-AC. En el caso del convertidor DC-DC su función es la de llegar a la máxima transferencia de potencia regulando el voltaje a la radiación solar disponible; mientras tanto el convertidor DC-AC transfiere la potencia a la red trifásica. [8]

En el caso de un banco de baterías tienen una configuración similar, donde el primer convertidor tiene como función el encargarse de la carga y descarga de las baterías, y el segundo convertidor tiene la función de integrar la potencia a la red [15].

Para los sistemas con generación eólica, debido a que se pueden emplear diferentes tipos de turbinas de acuerdo a la máquina que se emplee (generadores síncronos o asíncronos) y a las diferentes formas de conexión del generador a red, (directa o indirecta) se hace uso o no de convertidores. Para este caso en La Figura 2 se muestra una turbina con convertidores en cascada, en donde el primer convertidor tiene la función de ajustar el torque eléctrico dependiendo de la velocidad del viento disponible en ciertos momentos; esto se hace, con el objetivo de hacer la máxima transferencia de potencia posible y el segundo convertidor se encarga de entregar la potencia a la red.[16]

La generación hidroeléctrica de pequeña escala se puede realizar a través de una máquina síncrona convencional o de lo contrario, con una estructura de conversión con un comportamiento similar al de un sistema eólico, esta configuración permite aumentar la eficiencia y la respuesta dinámica del sistema. En cualquiera de los dos casos, el lado de

la micro red presenta un convertidor DC-AC. Esto permite que la operación y control tenga una estrategia en común para actuar sobre estos convertidores. [8]

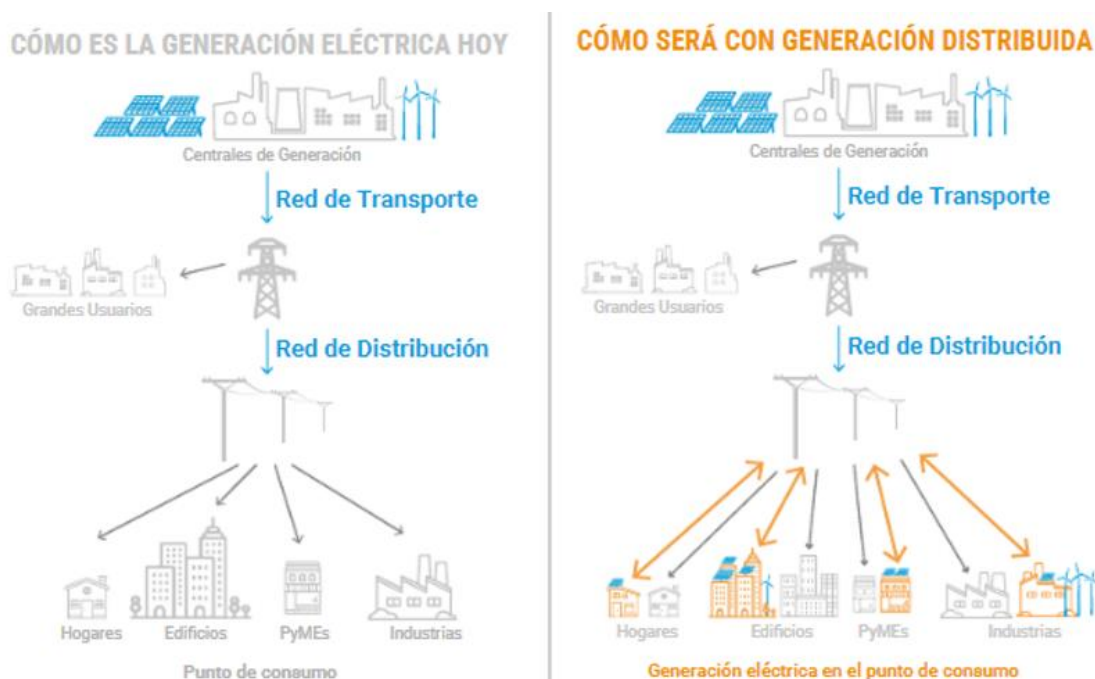
4.3.2 Líneas

Debido a que las micro redes poseen características propias, como baja inercia, el uso de convertidores que emplean electrónica de potencia, los tiempos de respuesta ante una contingencia o la relación X/R debido a la longitud de las líneas usadas. [8] Existen modelos bien definidos para el caso de las líneas sin embargo en este libro no se profundizará en dicho aspecto. [8]

4.3.3 Generadores distribuidos

Actualmente en la literatura no hay una definición exacta y única de Generación Distribuida. Diversos autores u organismos emplean definiciones similares, aunque se diferencian en algunos aspectos. [17] Sin embargo, todas llegan a tres características principales: son generadores con conexión cercana a la carga, están basadas en generación a pequeña, mediana y gran escala, y tienen la posibilidad de estar o no conectada a la red del sistema de potencia. [18] En la Figura 4 se puede observar la comparación entre un sistema de potencia convencional en el cual la generación está basada en una única gran central de generación y un sistema eléctrico que posee generación distribuida, en esta la gran diferencia es que existen pequeños puntos de generación que encuentran cerca de las centrales de consumo, pero a su vez estas suministran energía a la red.

Figura 4 Sistemas eléctricos con y sin generación distribuida.



Fuente: Extraído de "Introducción a la Generación Distribuida de Energías Renovables"
[29]

Para el caso de este libro se tomará la definición de la CREG la cual nos define la generación distribuida como “la actividad de generar energía eléctrica con una planta con capacidad instalada o nominal de generación menor a 1MW, y que sus elementos físicos se encuentran instalados cerca de la carga y se encuentra conectada al Sistema de Distribución Local”. [19]

4.4 FUENTES DE GENERACIÓN

En el caso de las micro redes se deben priorizar el uso de las fuentes de generación de energía renovable tales como la generación hidroeléctrica, solar fotovoltaica con o sin bancos de baterías y la eólica, a continuación, se hablará de forma general sobre cada una de ellas.

4.4.1 Generación hidroeléctrica

Este tipo de generación comúnmente se realiza en las llamadas central hidroeléctricas están transforma la energía hidráulica de un curso de agua, natural o artificial, en energía eléctrica renovable. El funcionamiento se basa en la utilización y transformación de la energía potencial que se encuentra en las masas de agua, situadas a mayor altitud respecto a las turbinas de la central. Para el caso de las micro redes este tipo de generación consiste en pequeñas centrales, en este tipo de centrales el agua se toma de una quebrada y es llevada por medio de canales hacia la turbina que básicamente es una ruda con paletas o cucharas y a su vez esta turbina se encuentra conectada a un generador eléctrico. [20]

Las PCH o pequeñas centrales hidroeléctricas son un tipo hidroeléctrica de generación con capacidad hasta de 10 MW que, mediante la energía que produce el flujo de agua, sin utilizar grandes masas de agua, suministran de electricidad a pequeños asentamientos humanos. [21]

Las pequeñas centrales se pueden dividir en pico, micro, mini y pequeña generación, estos rangos pueden variar según el país y la organización debido a que no se ha establecido un criterio único para la subdivisión,[21] en Colombia los intervalos establecidos por la CREG son los siguientes:

Tabla 1 Clasificación de las pequeñas centrales hidroeléctricas según la CREG

POTENCIA	TIPO
0 – 100 kW	Micro central
100 – 1000 kW	Minicentral
1000 – 10000 kW	Pequeña central

Fuente: Extraído de la CREG

4.4.2 Generación solar fotovoltaica

Un sistema de generación fotovoltaico es un conjunto de equipos eléctricos y electrónicos que suministran energía eléctrica a por medio de la radiación solar, esto se realiza por un elemento principal de este sistema que es el módulo fotovoltaico, que están compuesto por células que tienen como función el de transformar la energía luminosa incidente en energía eléctrica de corriente continua. [22] De esta forma estos sistemas están compuestos básicamente por el campo de paneles o módulos fotovoltaicos, acumuladores, reguladores e inversores.

Módulos fotovoltaicos: Su función es la de captar los fotones para poder conseguir crear una corriente eléctrica continua. Estos módulos se pueden conectar en serie o en paralelo formando varias cadenas, a la formación de grandes cadenas de paneles se le conoce como campo fotovoltaico. [23]

Acumulador: Este equipo es un conjunto de baterías que almacenan energía esto debido a que la demanda de energía eléctrica no coincide en el tiempo ni en la potencia con la producción entonces se debe instalar este tipo de elementos que almacena energía para que cuando la potencia generada sea mayor que la demanda y la descargué en caso contrario. [24]

Regulador: Es el elemento que une los paneles, el acumulador y la carga su función es regular las operaciones de carga y descarga del acumulador con el fin de evitar malos funcionamientos que pongan en peligro la correcta operación del acumulador evitando estados de sobrecarga o sobre descarga. [24]

Inversor: Tiene como función transformar la corriente continua de los módulos fotovoltaicos en corriente alterna para poder sincronizarla y conectarla con la red existente o suplir una carga que necesite de corriente alterna, ya sea trifásica, monofásica o bien de alta, media o baja tensión. [23]

4.4.3 Generación eólica

La energía eólica se puede considerar una forma indirecta de energía solar debido a que los vientos son causa del calentamiento desparejo de la atmósfera por parte del sol, pero también irregularidades en la superficie de la tierra y la rotación del propio planeta. Los patrones de flujos eólicos se modifican por el terreno irregular de la tierra, las masas de agua y la vegetación. [24] La energía cinética del viento se puede aprovechar para transformar en energía útil que puede ser tanto mecánica como eléctrica, estos sistemas que convierten la energía eólica en energía eléctrica están conformados principalmente por un aerogenerador, un rotor, multiplicador y un generador eléctrico entre otros elementos de control y estructuras para su correcto funcionamiento. [25] Las maquinas eólicas de pueden clasificar por potencia nominal en los siguientes grupos:

Tabla 2 Clasificación de las maquina eólicas según su potencia. [25]

POTENCIA	TIPO
< 3 kW	Microturbinas
< 50 kW	Pequeños aerogeneradores
< 850 kW	Grandes aerogeneradores
1 – 3 MW	Aerogeneradores multimegawat

Fuente: Extraído de la GREG

4.5 CARGAS

Las cargas eléctricas en los sistemas de distribución están cambiando con el paso del tiempo y están pasando del tipo resistivo, inductivo o capacitivo hacia cargas que poseen un comportamiento diferente a los esperados. El aumento en el uso de dispositivos electrónicos ha facilitado la vida en tareas que realizamos cotidianamente, sin embargo, la utilización de estos dispositivos causa efectos que son negativos en el sistema eléctrico, generando armónicas que distorsionan la forma de onda resultante de la corriente eléctrica. [27]

4.5.1 Carga lineal

En este tipo de cargas la forma de onda de la corriente es de igual forma que la forma de onda de la tensión, dentro de estas cargas lineales se encuentran los motores de inducción, las lámparas incandescentes que en la actualidad son poco empleadas y elementos resistivos. Estas cargas que han sido muy utilizadas su característica principal es que hacen uso directamente la potencia eléctrica para realizar algún tipo de trabajo.[27]

4.5.2 Carga no lineal

En una carga no lineal la forma de onda de la corriente difiere de la forma de onda de la tensión en este tipo de cargas se incluyen aquellas que necesitan corrientes no sinusoidales por medio de un generador senoidal. Estas cargas se encuentran en equipos y dispositivos eléctricos o electrónicos donde el ahorro energético y el uso eficiente de la electricidad juega un papel muy importante. Son ejemplos de cargas no lineales los equipos de control de velocidad de motores, lámparas fluorescentes, lámparas de descarga, computadores, dispositivos que hagan uso de electrónica de potencia. [27]-[28]

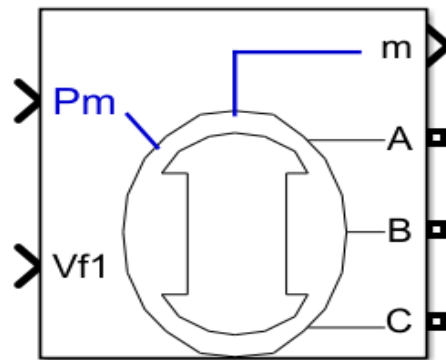
5 SIMULACIÓN MICRO RED AUTONOMA

En este capítulo se explicará los componentes que se tuvieron en cuenta para la simulación de la micro red autónoma que se realizara a través de Simulink de Matlab. Esta micro red está compuesta por la parte de generación que estará dependerá de diferentes generadores distribuidos y por su componente de cargas.

5.1 GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

Debido al tipo de modelado que se realizará, para la generación hidroeléctrica se hará por medio de una minicentral de generación, en este tipo de centrales su principal componente es el generador síncrono que para el caso de Simulink posee un bloque con capacidad de ajustar diferentes parámetros relacionados con las maquinas síncronas.

Figura 5 Bloque de generador síncrono de Simulink



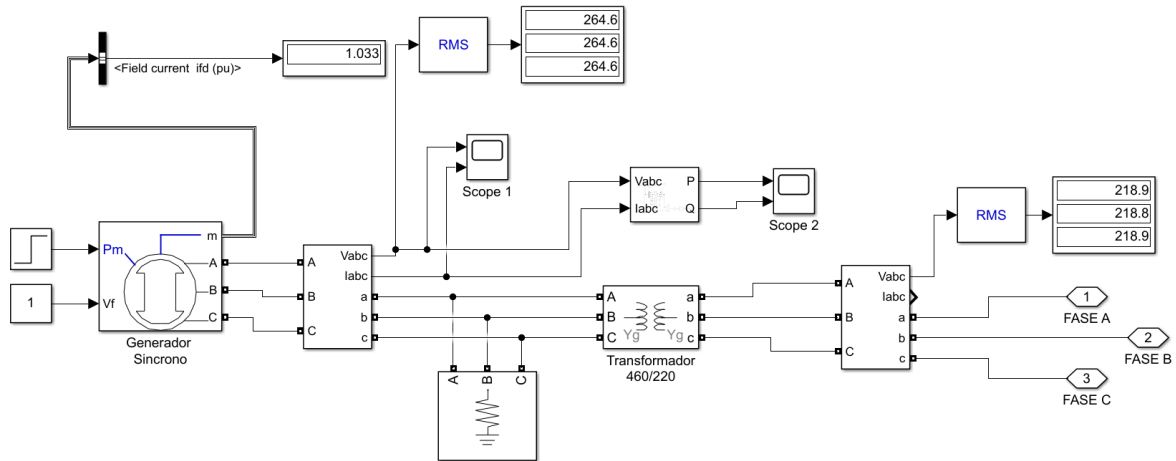
Fuente: Extraído de “help” de Simulink de Matlab

En el generador síncrono cuyo bloque de simulación se expresa en la Figura 5 se tiene cómo entradas el voltaje de excitación, V_f , que viene del sistema de excitación y la potencia mecánica, P_m , que está dado por la turbina hidráulica. Las salidas que se generan son un vector de variables internas, datos, llamado m y las tres fases abc, donde se entrega energía eléctrica a la red[31]. En este tipo de generación se deben tener en cuenta dos bloques fundamentales más que hacen referencia al sistema de excitación y a la turbina, sin embargo, para el caso de la turbina se trabaja por medio de una constante que representara la velocidad de dicha turbina.

5.1.2 Modelo de sistema de generación hidroeléctrica

En la Figura 7 se observa el modelo de generación hidroeléctrica que se utilizara para la simulación de la minicentral de generación la cual consta principalmente del bloque de generador síncrono cuya entrada de excitación para este caso está compuesta por una constante que se encuentra con valor 1 que hace referencia a el valor nominal y para el caso de la velocidad de la turbina se asigna con una constante que hace referencia a la cantidad de torque que necesita para dar energía en proporción a la carga, estos valores se mencionaran más adelante en este capítulo. Estas entradas están dadas en valores en por unidad por lo que un 1 significa valores nominales de la máquina.

Figura 6. Modelo de minicentral de generación hidroeléctrica.

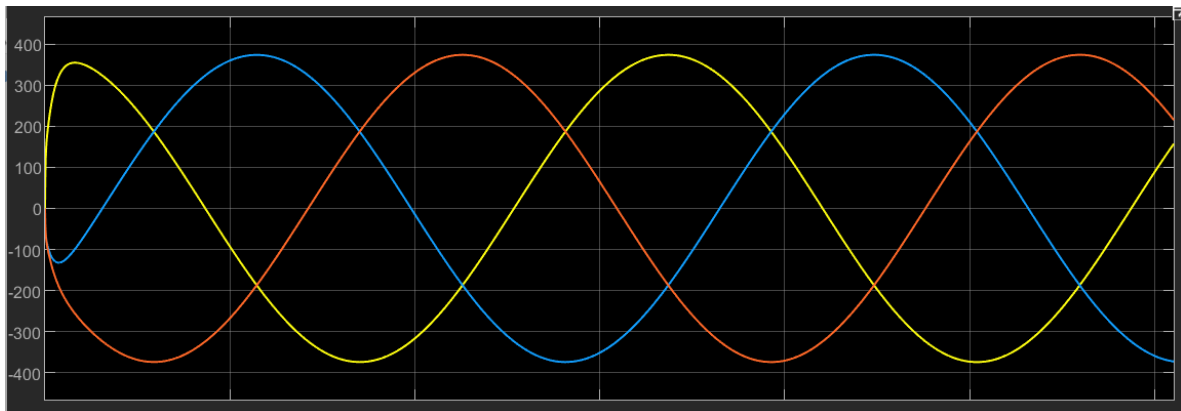


Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

5.1.3 Parámetro de la minicentral

En cuanto a los parámetros del generador síncrono se tiene que la potencia del generador será de 20kVA, el voltaje de fase nominal de la maquina es de 460V con frecuencia nominal de 60 Hz y cuya señal trifásica de voltaje se observa en la gráfica 1 la cual hace referencia a la primera entrada del Scope 1 de la Figura 6 en ella se observa el voltaje de fase pico de la salida del generador cuyas fases están desfasadas entre si 120 grados y cuyo valor es de aproximadamente 374 V.

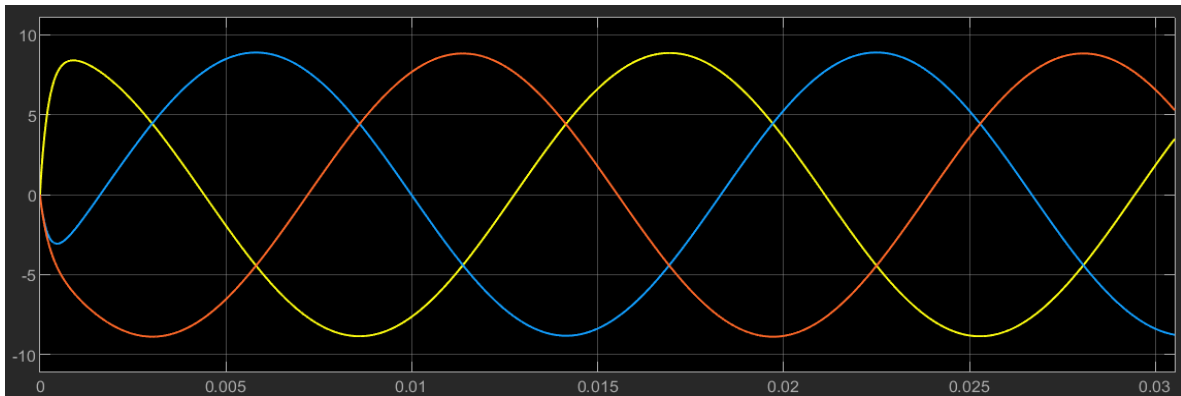
Gráfica 1. Voltaje de línea de la salida del generador síncrono.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

Para el caso de las corrientes se tiene que tener en cuenta que a la salida del transformador se encuentra conectado a las fases abc una carga lineal trifásica de referencia con voltaje nominal de 220 V y potencia de 4000W y se obtuvo a la salida del generador las corrientes que se evidencian en la gráfica 2 la cual muestra en la segunda entrada del Scope 1 de la Figura 6.

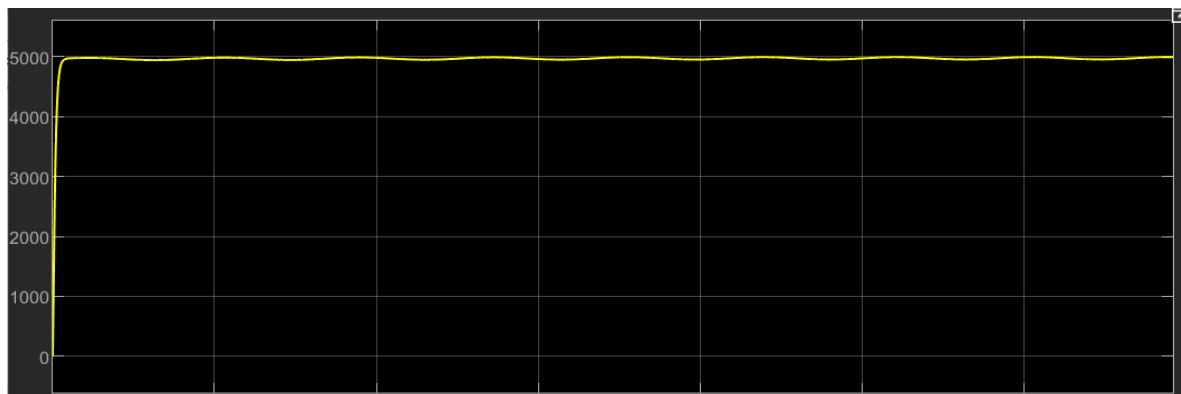
Gráfica 2. Corrientes de línea de la salida del generador síncrono con carga de 5000W



Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

Dentro de la simulación existe la posibilidad de medir la potencia a la salida del generador la cual se encuentra representada en el Scope 2 de la Figura 6 y su señal se evidencia en la Gráfica 3 la cual muestra la salida de 5kW de potencia activa.

Gráfica 3. Potencia activa a la salida del generador síncrono con carga de 5000W



Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

Los parámetros iniciales más importantes del sistema de la hidroeléctrica se muestran en la tabla 3 se tiene que tener en cuenta que este sistema se encuentra operando hasta este momento como un sistema de generación distribuida aislada sin estar conectado a otro medio de generación

Tabla 3. Parámetros iniciales del sistema de la minicentral hidroeléctrica.

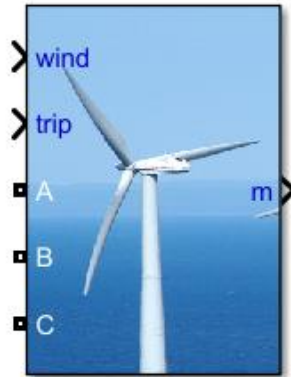
PARAMETRO	MAGNITUD
Potencia nominal del generador	20 kW
Velocidad de la turbina	0.25 PU
Voltaje de excitación	1 PU
Voltaje RMS de salida (fase)	264.4 V
Corriente RMS de Salida (fase)	6.27 A
Carga total del sistema	5 kW

Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

5.2 GENERACIÓN EÓLICA

Para la simulación de un generador eólico se va tener como referencia el bloque Wind Turbine que dispone Simulink, el cual hace referencia a una turbina eólica conectado a un generador de inducción cuyo bloque se expresa en la Figura 7, este bloque como principal entrada posee el torque que realiza la turbina a través del movimiento del viento y se proporciona por la entrada wind del bloque.

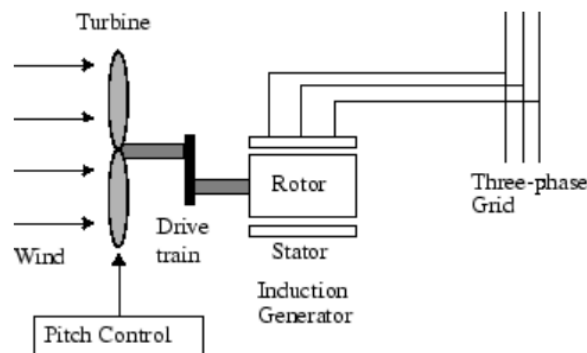
Figura 7 Bloque Wind Turbine de Simulink



Fuente: Extraído de “help” de Simulink de Matlab

La representación de la turbina eólica y el generador de inducción se observan en la Figura 8. El devanado del estator se conecta directamente a la red y el giro del rotor se debe a la turbina eólica. La energía que se trasmite del viento a él aerogenerador es convertida en energía eléctrica a través del generador de inducción y es suministrada a la red por el devanado del estator. El ángulo de inclinación se controla para limitar la potencia de salida del generador en su valor nominal para el caso en que las velocidades de viento sean muy altas. Para generar energía eléctrica, la velocidad del generador de inducción debe estar ligeramente por arriba de la velocidad síncrona. Sin embargo, la variación de velocidad suele ser pequeña que para el sistema esta se considera una velocidad fija. La potencia reactiva necesaria para el funcionamiento es proporcionada por la red.[31]

Figura 8 Modelo de referencia de generador eólico

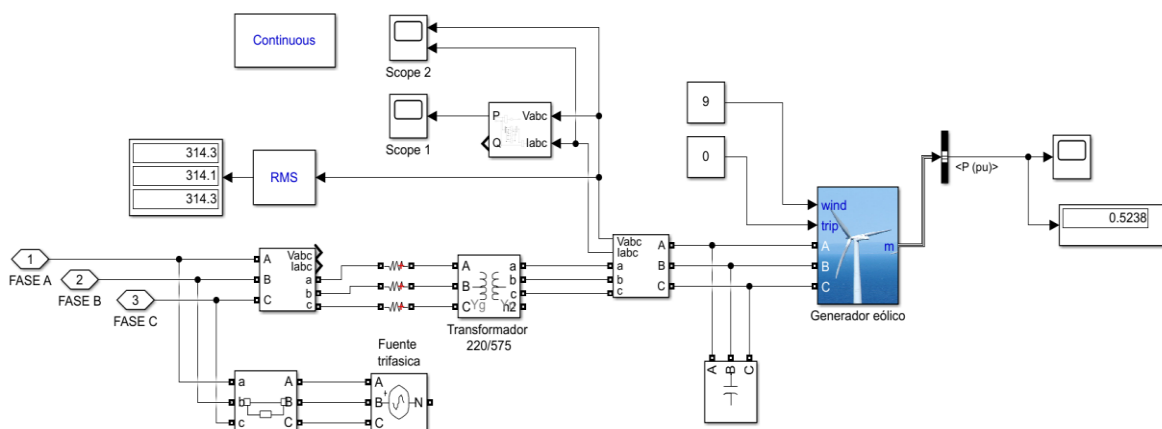


Fuente: Extraído de “help” de Simulink de Matlab

5.2.1 Modelo de sistema eólico

Como se observa en la Figura 9 el bloque necesita que introduzca la velocidad del viento por medio de una señal que puede ser una constante o puede estar representada por cambios de velocidad que sería un método más aproximado a la realidad, para simplicidad del modelo se trabajará por medio de una constante la cual será la velocidad nominal del generador. El generador eólico debe ir conectado a un banco de condensadores que aporten los reactivos necesarios para su funcionamiento, así como debe ir conectado a la red trifásica para que le proporcionara el voltaje al devanado del estator debido a esto sus fases abc estarán conectadas inicialmente a una fuente trifásica que posteriormente será remplazada por la maquina síncrona explicada anteriormente

Figura 9 Modelo básico de sistema de generación con energía eólica

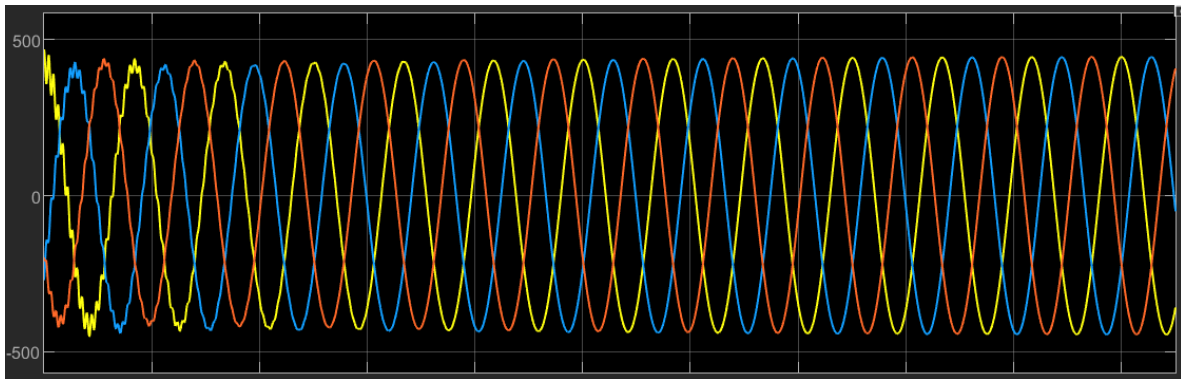


Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

5.2.3 Parámetro del sistema eólico

Para el caso de la velocidad del viento que incide sobre la turbina se trabaja por medio de una constante que será de 9 m/s como valor nominal y una constante de 0 para la entrada “trip” para una simulación más simplificada de dicho sistema de generación. En esta configuración se le dieron parámetros nominales al bloque del generador un voltaje de línea de 575 V pico, frecuencia nominal de 60 Hz y potencia nominal de 5 kVA. El voltaje de salida del generador se puede observar en la Grafica 4 el cual es la señal que se visualiza en la entrada uno del Scope 2 de la Figura 9.

Gráfica 4 Voltajes de línea del generador eólico.

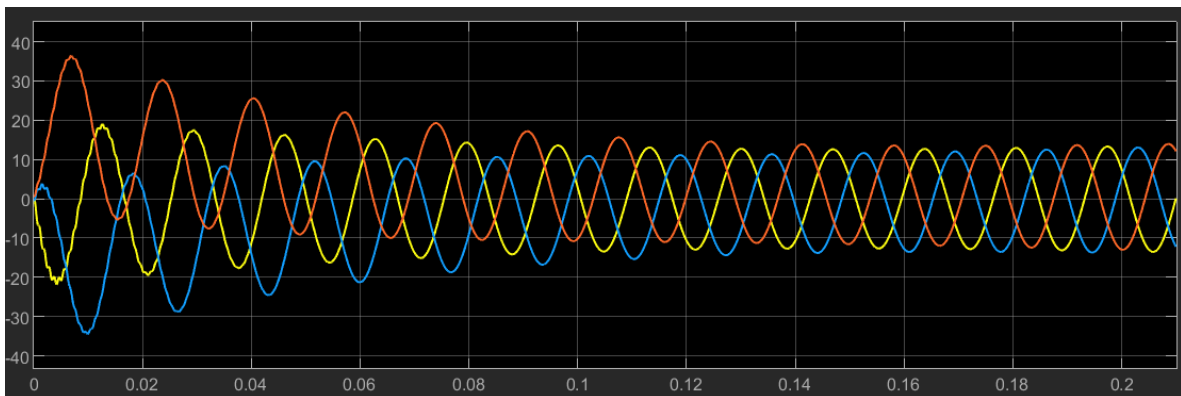


Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Gráfica 4 se puede observar que los primeros 3 ciclos del voltaje están distorsionados esto se debe al arranque de la maquina y carga de banco de condensador que se encuentran conectados al sistema, esta señal hace referencia al voltaje de fase pico que alcanza un valor aproximado de 445 V.

En cuanto a lo que tiene que ver con las corrientes de salida del generador se tiene que tener en cuenta que se encuentra conectado a través de sus fases abc a un transformador que tiene conectado a su salida una carga trifásica de 4500W, la señal de dichas corrientes se puede visualizar en la salida 2 del Scope 2 de la Figura 9 y se observa en la Grafica 5.

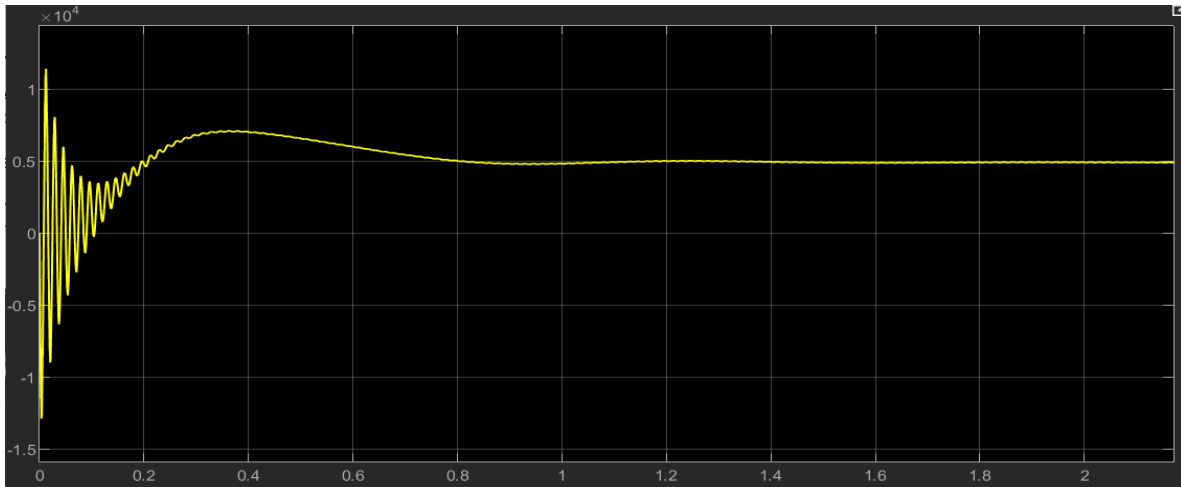
Gráfica 5. Corrientes de línea del generador eólico con una carga propia de 4500W



Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Gráfica 5 se observan las corrientes de arranque del generador eólico con una carga de 4500W, dichas corrientes en el primero micro segundo son desfasadas en su magnitud esto debe al arranque del generador y cargue del banco de condensadores, posteriormente se puede observar cómo alrededor de los 2 segundos las corrientes se normalizan y se empiezan a igual en magnitud en sus fases con un valor pico aproximado 5.4 A de fase.

Gráfica 6. Potencia activa a la salida del generador eólico con carga de 4500W



Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Gráfica 6 se muestra la señal que se puede visualizar en el Scope 1 de la Figura 9 y hace referencia a la potencia de salida del generador con parámetros anteriormente señalados, en esta señal se puede observar como la potencia en los primeros instantes de tiempo al igual que la corriente y el voltaje es oscilante y después de aproximadamente 0.8 segundos estabiliza con un valor aproximado de 5000W.

En la tabla 4 se encuentran los parámetros iniciales más importantes del sistema eólico, se tiene que tener en cuenta que este sistema se encuentra operando hasta este momento como un sistema de generación distribuida aislada sin estar conectado a otro medio de generación.

Tabla 4. Parámetros iniciales del sistema de generación eólica.

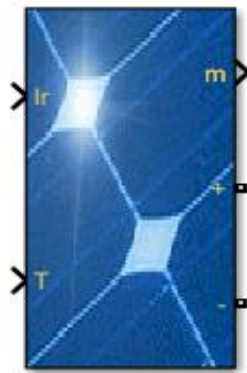
PARAMETRO	MAGNITUD
Potencia nominal del generador	5 kW
Velocidad del viento	9 m/s
Trip	0
Voltaje RMS de salida (fase)	314 V
Corriente RMS de Salida (fase)	5.4 A
Carga total del sistema	4.9 kW

Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

5.3 GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

Para la parte de generación fotovoltaica se va a utilizar como principal componente el bloque PV array dispuesto en Simulink para modelar módulos fotovoltaicos representado en la Figura 12.

Figura 10 Bloque PV array de Simulink

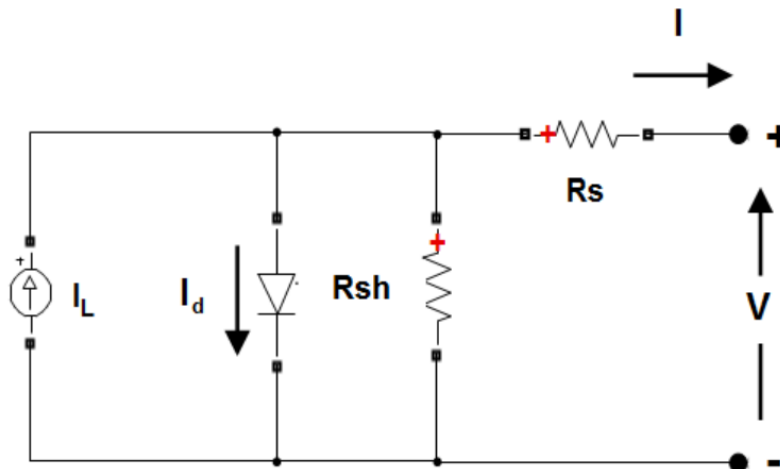


Fuente: Extraído de “help” de Simulink de Matlab

En este bloque se tiene que introducir valores de irradiancia los cuales se pueden establecer por medio de constantes o bien por medio de una función que modele dicha irradiancia a lo largo de determinado tiempo, además de establecer la temperatura. Dentro de los parámetros que se deben ajustar dentro del bloque está el número de paneles en serie y en paralelo, voltajes y corrientes además de tener modelos de paneles predeterminados que ajustan dichos parámetros dependiendo del tipo de panel seleccionado.

En la Figura 13 se observa el modelo al que hace referencia el bloque de PV array, es un modelo de cinco parámetros, hace uso de 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 I-V que dependen de la irradiancia y la temperatura de los módulos.[31]

Figura 11 Circuito de referencia del bloque PV array de Simulink

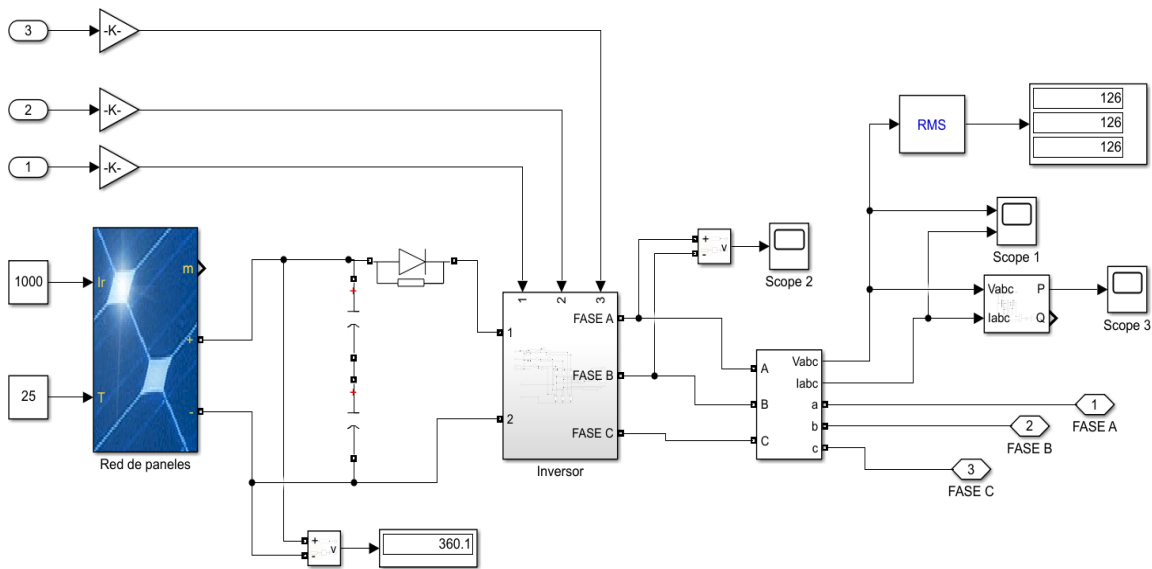


Fuente: Extraído de “help” de Simulink de Matlab

5.3.1 Modelo de sistema fotovoltaico

Como modelo base del sistema fotovoltaico que se va a utilizar en la simulación de la micro red esta la Figura 12 en la cual se puede observar que se hace uso de diferentes bloques de los cuales como principales componentes tenemos el panel solar y un inversor el cual transforma la corriente continua proveniente del panel en corriente alterna, para los datos de entrada del bloque “PV array” se utilizaron constantes de 1000 W/m² que hace referencia a la irradiancia y de 25 grados Celsius para el caso de la temperatura.

Figura 12 Modelo general de sistema fotovoltaico en Simulink

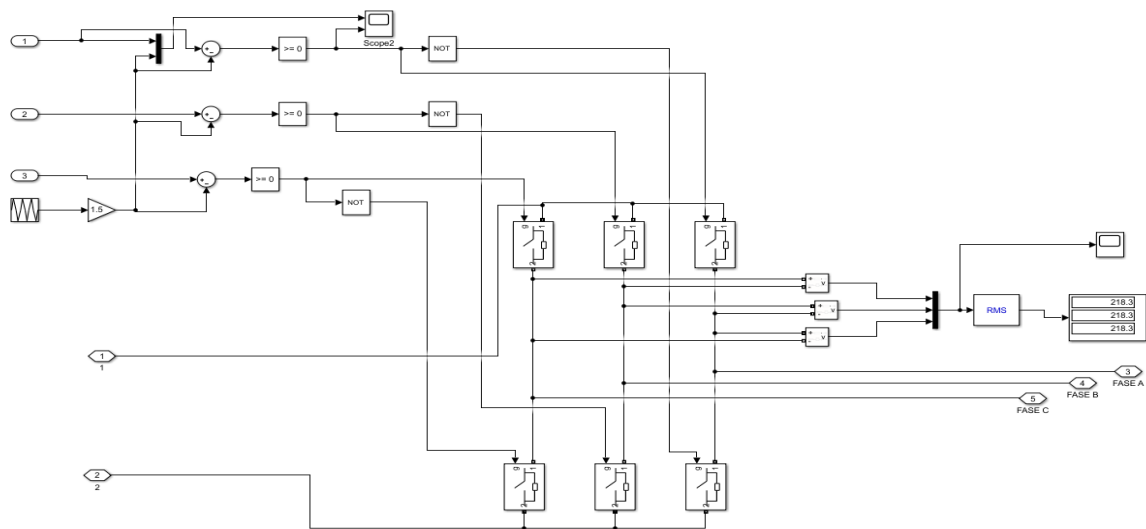


Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

5.3.2 Convertidor de 6 interruptores

El convertidor o inversor que se muestra como un bloque en la Figura 12 se puede observar de forma detallada en la Figura 13, en este inversor como su nombre lo indica se hace uso de 6 interruptores que a través de la conmutación de estos se genera un señal trifásica a su salida, para el control del cierre y abre de los interruptores se hace necesario el uso de 2 señales una portadora y una moduladora, para el caso de la portadora se ara uso de una señal triangular y la señal moduladora la cual debe ser sinusoidal se trae como referencia del sistema de la mini central hidroeléctrica.

Figura 13. Convertidor de 6 interruptores utilizado para sistema fotovoltaico.



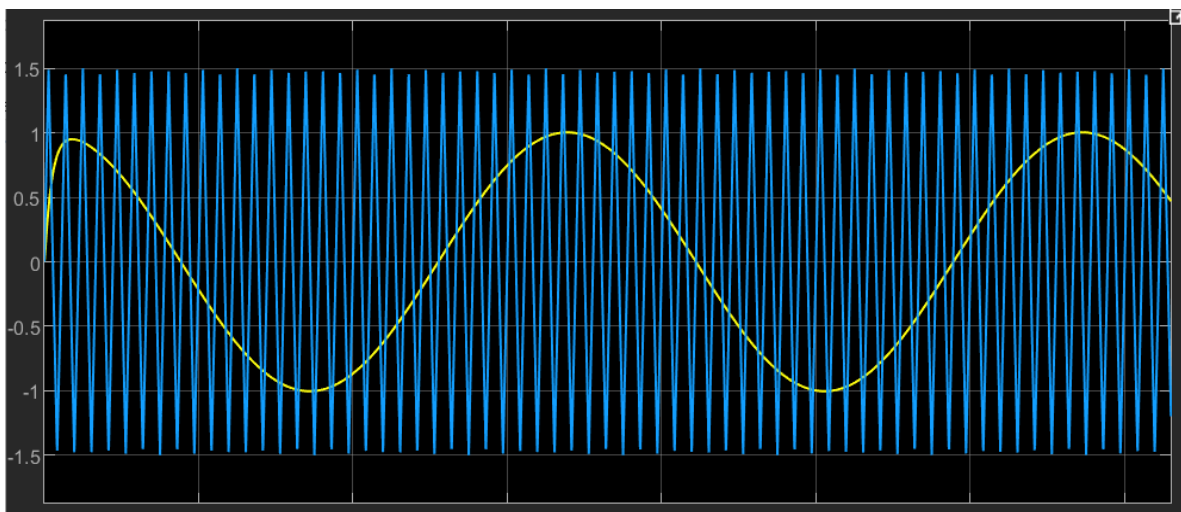
Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

5.3.3 Parámetros del sistema fotovoltaico

En cuanto a los parámetros que tendrá el sistema fotovoltaico utilizado en simulación tenemos que se hará uso de un sistema de 20 paneles conectados en 2 módulos de 10 paneles conectados en serie, por tanto, el sistema tendrá una potencia de 4263 W con un voltaje de 360 V en corriente continua como se puede observar en la gráfica 5 que muestra en el display a la salida de los paneles.

Anteriormente se habló de dos señales que son necesarias para el funcionamiento adecuado del inversor estas se pueden observar en el Scope 2 de la Figura 13 y están plasmadas en la Gráfica 7 en esta la señal triangular tiene una amplitud de 1.5 y la señal sinusoidal que viene de la maquina síncrona tiene una amplitud de 1.

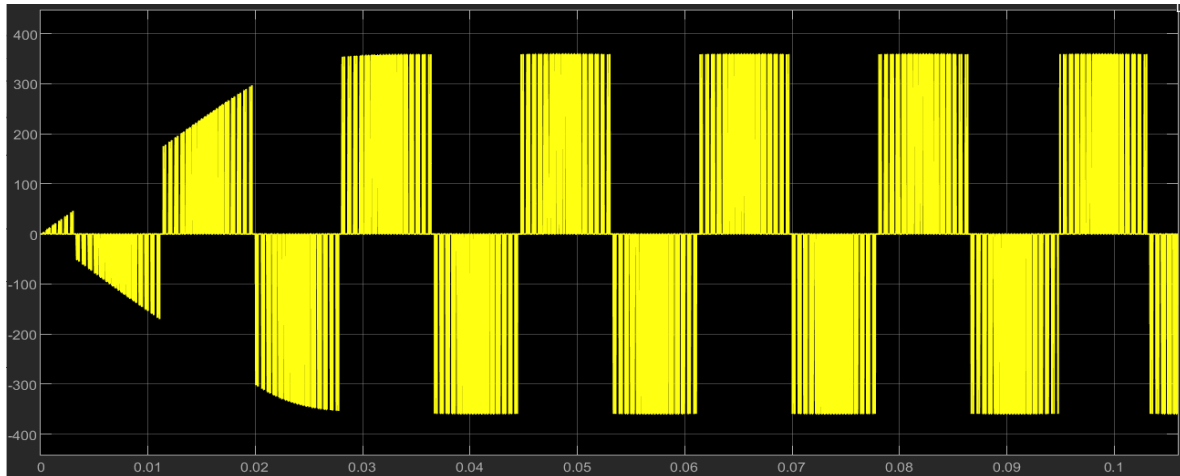
Gráfica 7. Señal portadora y moduladora utilizadas en convertidor de 6 interruptores.



Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

A la salida del inversor se obtienen señales trifásicas cuadradas en la Grafica 8 se observa la señal cuadra visualizada en el Scope 2 de la Figura 12 que hace referencia al voltaje de salida con un valor pico de línea aproximado de 370 V

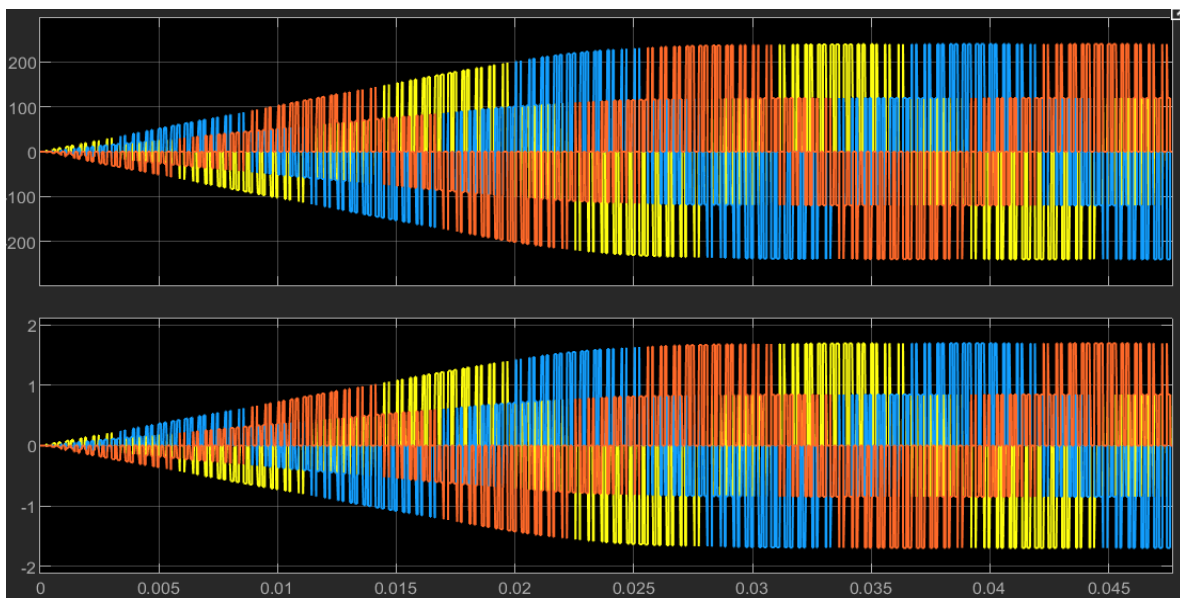
Gráfica 8. Voltaje de línea a salida del convertidor de 6 interruptores.



Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

Para el caso de las corrientes y voltajes que se encuentran a la salida del sistema fotovoltaico se tiene que tener en cuenta que las fases se encuentran conectados a una carga trifásica de 1500W lo que genera a la salida un voltaje pico de fase que se representa en la parte superior de la Grafica 9 que es la señal que se visualiza en el Scope 1 de la Figura 12 y la parte inferior de la misma grafica se observa la corriente que se genera debido a la carga, las magnitudes de estas variables se representan en la tabla 5 mas adelante en este capítulo.

Gráfica 9. Corriente y voltaje a la salida del sistema fotovoltaico con carga de 1500W.



Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la tabla 5 se encuentran los parámetros iniciales más importantes del sistema fotovoltaico, se tiene que tener en cuenta que este sistema se encuentra operando hasta este momento como un sistema de generación distribuida aislada sin estar conectado a otro medio de generación

Tabla 5. Parámetros iniciales del sistema de fotovoltaica.

PARAMETRO	MAGNITUD
Potencia nominal del generador	4263 W
Irradiancia	1000 W/m ²
Temperatura	25 C
Voltaje DC paneles	360 V
Voltaje RMS de salida (fase)	126 V
Corriente RMS de Salida (fase)	0.9 A
Carga total del sistema	1.5 kW

Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

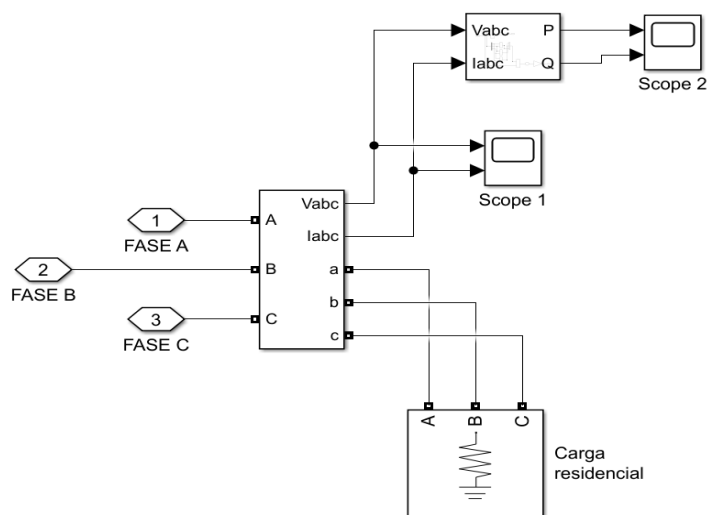
5.4 MICRO RED AUTÓNOMA CON CARGAS FIJAS.

En este capítulo se hablará de las cargas que cada uno de los generadores distribuidos tendrá que suplir estas serán cargas lineales fijas conectadas al sistema de la micro red y se explicarán a continuación.

5.4.1 Carga lineal conectada al sistema hidroeléctrico

Para la minicentral hidroeléctrica se tiene una carga de potencia constante de 4 kW conectado a la salida del transformador con un voltaje nominal de 220 V.

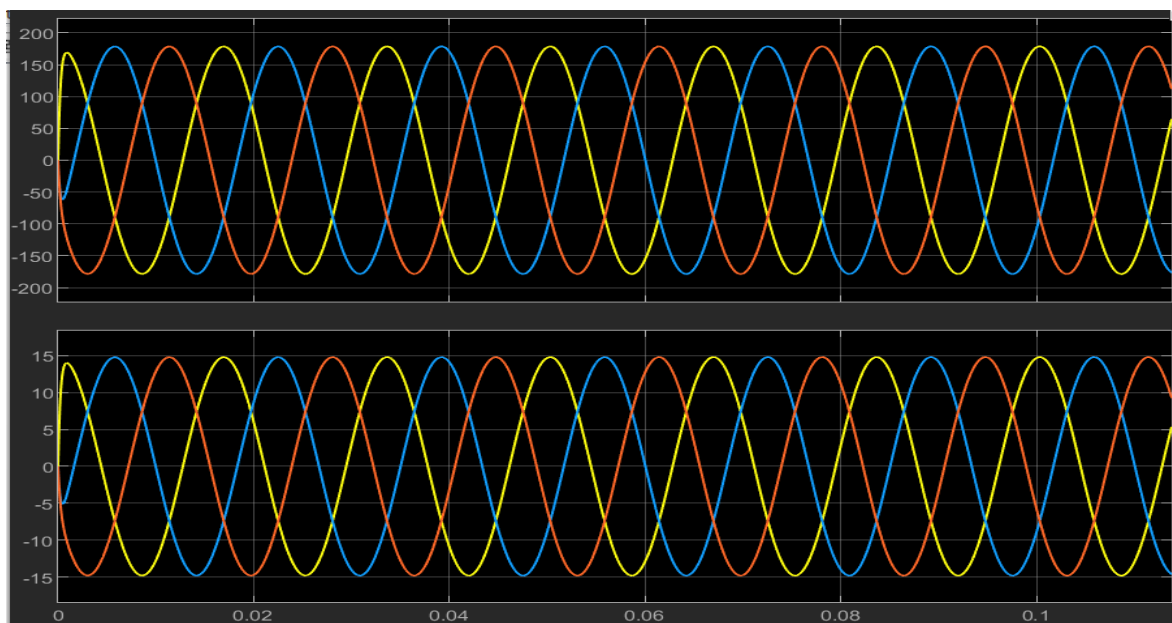
Figura 14. Esquema de carga lineal conectada a la minicentral hidroeléctrica.



Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

El voltaje y la corriente que entra a la carga se muestra en la Gráfica 10 que hace referencia al Scope 1 de la Figura 15, en esta se puede observar en la parte superior que el voltaje es constante con un valor pico de fase de 180V y la corriente con un valor pico de fase aproximado de 15 A qué se muestra en la parte inferior de la gráfica cuya señal es estable.

Gráfica 10. Voltaje y corriente de entrada a la carga de la minicentral.

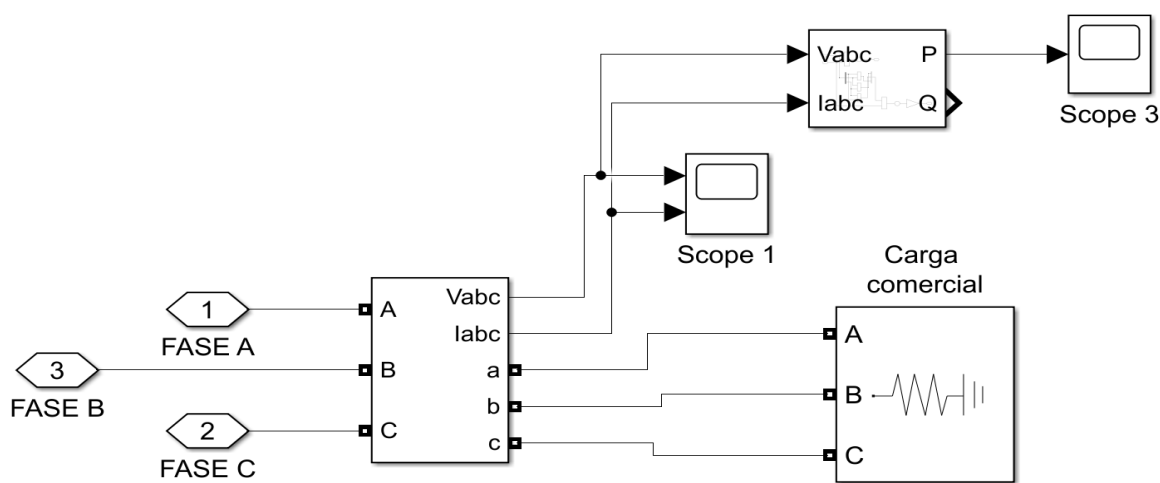


Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

5.4.2 Carga lineal conectada al sistema eólico

El sistema eólico posee una carga propia que representa una carga comercial resistiva de 4500W con voltaje nominal de 220 V cuyo esquema se muestra en la figura 17.

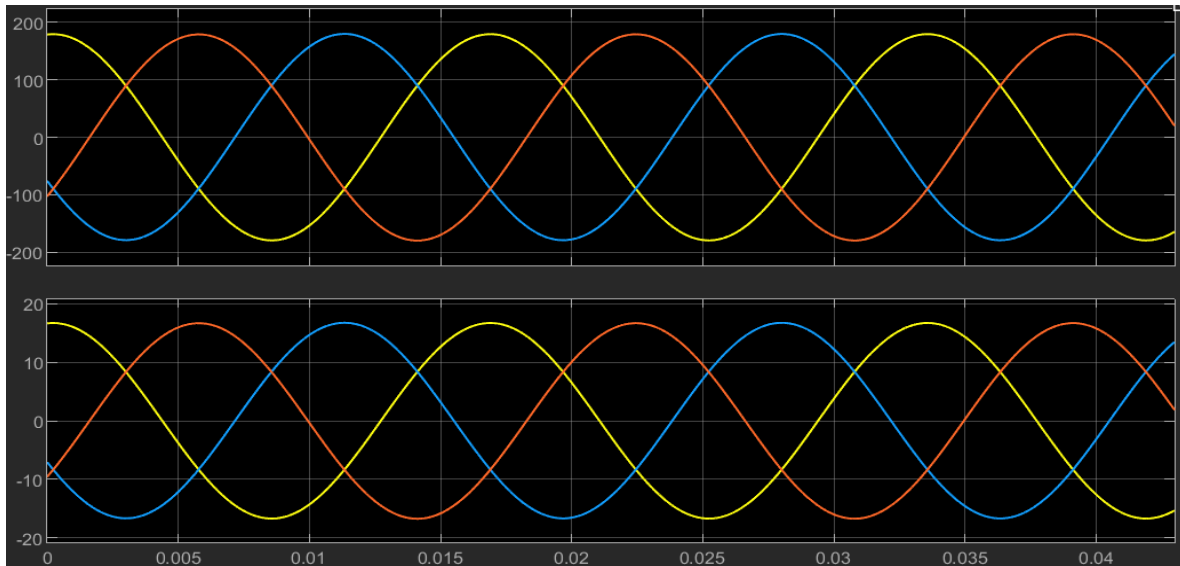
Figura 15 Esquema de la carga del sistema eólico.



Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

El Scope 1 de la Figura 16 se muestra en la Gráfica 11, se observa en la parte superior el voltaje de entrada de la carga cuyo valor es contante en las tres fases con un valor aproximado de fase de 180V pico y en la parte inferior de la gráfica se muestra una corriente pico de fase con valor aproximado de 19 A cuyos valores son constantes en cada una de sus fases.

Gráfica 11. Voltajes y corrientes de entrada a la carga del sistema eólico.

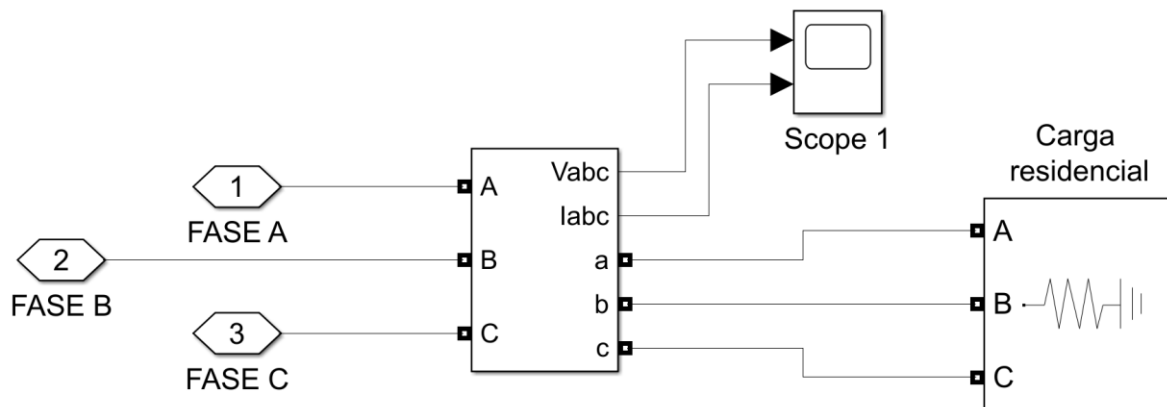


Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

5.4.3 Carga lineal conectada al sistema fotovoltaico

El sistema eólico posee una carga propia que representa una carga residencial resistiva de 1500W con voltaje nominal de línea de 220 V cuyo esquema se muestra en la figura 18.

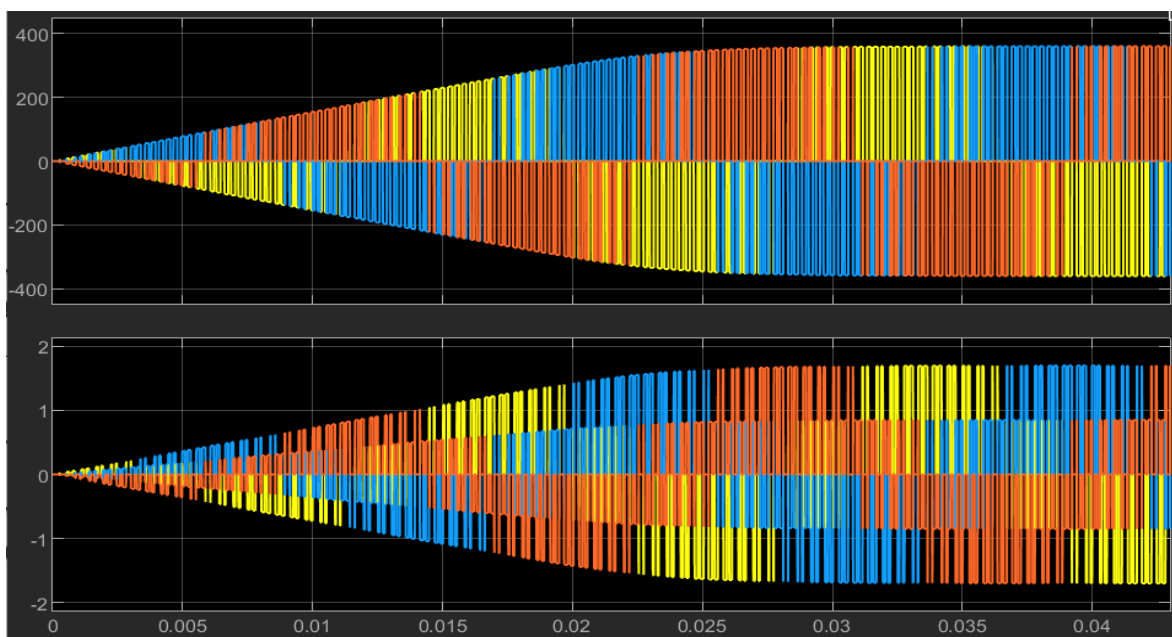
Figura 16. Esquema de la carga conectada al sistema fotovoltaico.



Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

El Scope 1 de la Figura 17 que se muestra en la Gráfica 12, se observa en la parte superior el voltaje de entrada de la carga cuyo valor se estabiliza en aproximadamente 0.03 segundos con un valor pico aproximado de línea de 220V y en la parte inferior de la gráfica se muestra una corriente pico de línea con valor aproximado de 1.7 A cuyo valor se estabiliza en aproximadamente 0.03 segundos.

Gráfica 12. Voltajes y corrientes de entrada a la carga propia del sistema fotovoltaico.

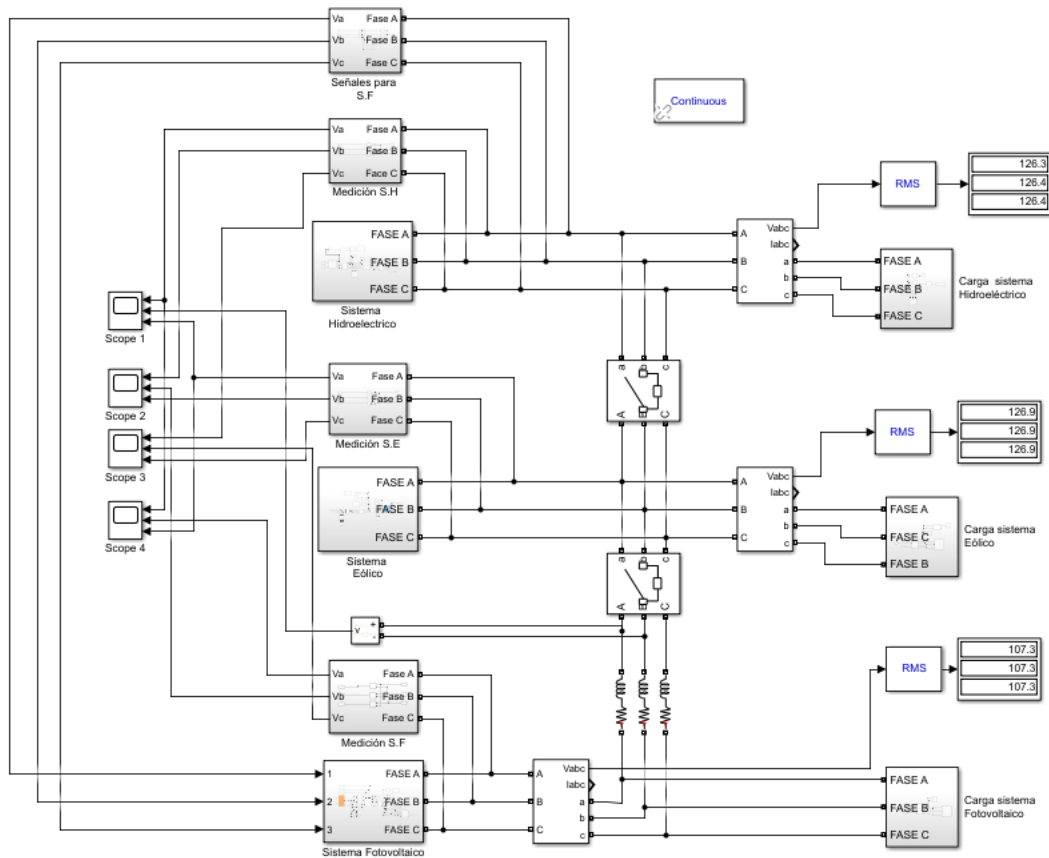


Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

6 SINCRONIZACIÓN DE LA MICRO RED AUTÓNOMA

Para el funcionamiento en conjunto de los generadores distribuidos como una micro red autónoma se hace necesario la interconexión de sus fases para establecer un sistema de micro red. La conexión entre sistemas se hizo a través de interruptores como se muestra en la Figura 18 con un tiempo programado de cierre a los 0.5 segundos de iniciada la simulación, se tuvo en cuenta que el sistema eólico se encuentra conectado a una fuente trifásica por lo que esta se desconecta y su función es suplida por la maquina síncrona, la conexión se hace en baja tensión y cuyos valores de voltaje RMS de fase se pueden observar a la salida de cada sistema en la Figura 18, estos valores hacen referencia cuando cada sistema están operando de forma independiente.

Figura 17 Esquema de la micro red autónoma.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

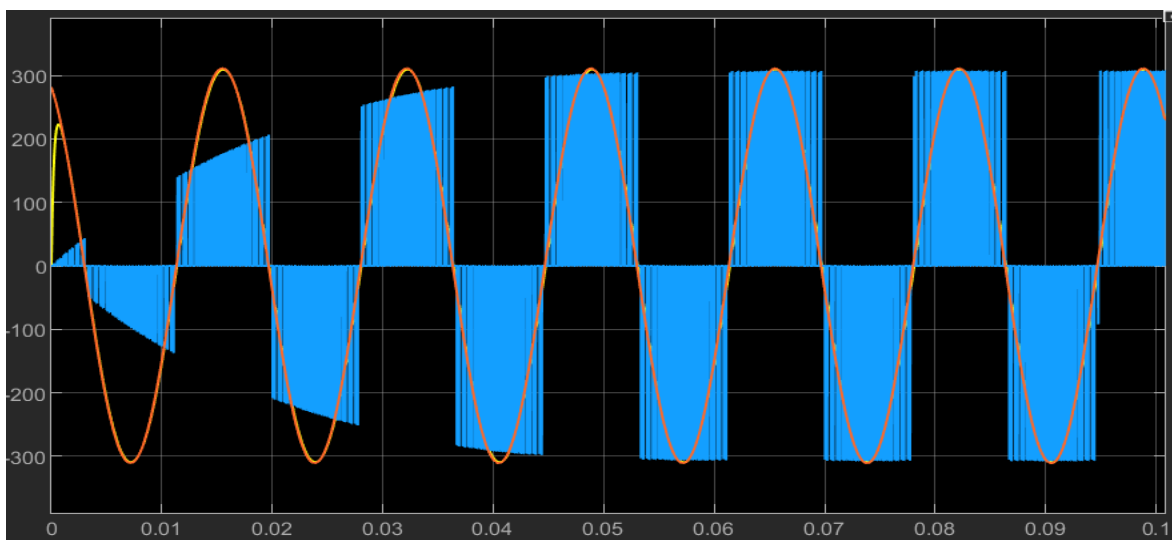
6.1 SINCRONIZACIÓN DE FASES DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Para realizar una correcta conexión entre sistemas de generación se tiene que revisar como primera parte que las fases de los sistemas se encuentren sincronizadas entre sí, para el

caso de esta micro red autónoma el sistema hidroeléctrico y el sistema eólico empiezan su generación desde un instante de tiempo cero por lo que sus fases una vez se estabilizan las magnitudes sus señales de voltaje se encuentran sincronizadas, para el caso del sistema fotovoltaico para el control del inversor se utilizan las señales de la hidroeléctrica como se habló el capítulo anterior debido a esto estos sistemas también se encuentran sincronizados entre sí.

En la Figura 17 se muestran el Scope 1, 2, 3 estos muestran cada una de las fases A B C de cada uno de los tres sistemas en una misma pantalla, esto se puede ver en la Grafica 13 la cual muestra el Scope 1.

Gráfica 13. Sincronización de señales de la fase A en la micro red autónoma.



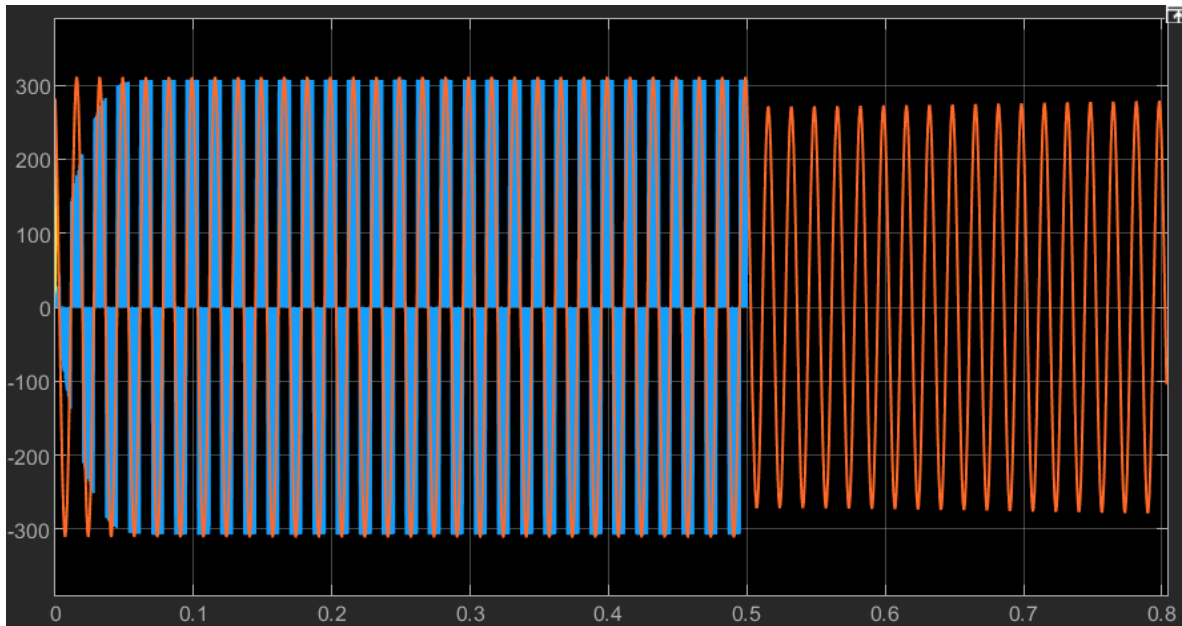
Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Gráfica 13 se puede observar la señal amarilla la cual proviene de la hidroeléctrica, la señal de color naranja es la que proviene del sistema eólico y la señal azul pertenece al sistema fotovoltaico, se puede ver que las señales sinusoidales casi se solapan entre sí y con la señal del sistema fotovoltaico se observa cómo están en fase además de tener valor pico muy aproximados, esto sucede de la misma forma para dos fases restantes de cada uno de los sistemas.

6.2 CONEXIÓN ENTRE SISTEMAS DE GENERACIÓN

Una vez confirmado que las fases se encuentran sincronizados se puede conectar las fases entre si teniendo en cuenta que se debe conectar las fases que poseen los mismos ángulos de desfase, en la Figura 17 se observa que esta conexión se hace por medio de interruptores estos se conmutan a los 0.5 segundos iniciados la simulación, esta conexión se puede visualizar en el Scope 1 como se muestra en la Gráfica 14 como se muestra a continuación.

Gráfica 14. Conexión entre señales de los sistemas de generación



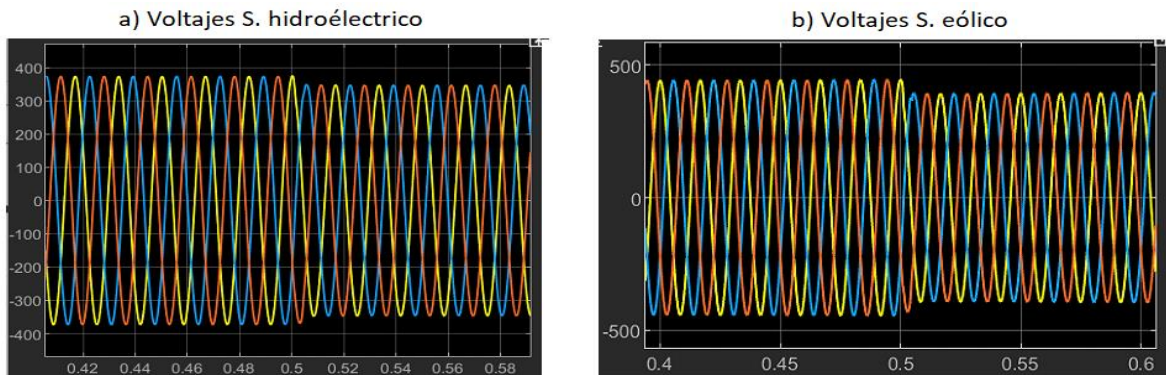
Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

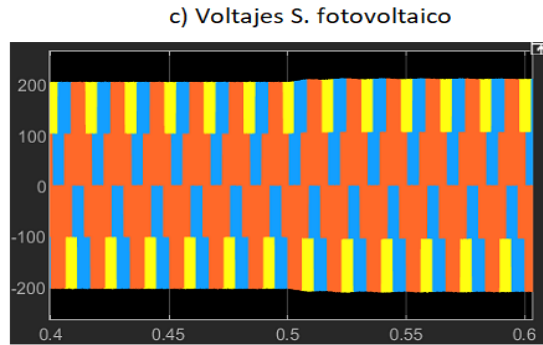
Como se observa en la Gráfica 14 a los 0.5 segundos los interruptores se cierran y las fases se conectan entre sí y se genera una única señal sincronizada, esto genera una disminución del voltaje pico que en el tiempo se va estabilizando para alcanzar nuevamente los valores nominales.

6.3 EFECTOS DE CONEXIÓN EN VOLTAJES DE LA MICRO RED

En la Gráfica 15 se puede observar los voltajes de cada uno de los sistemas y como la conexión de la micro red afecta las magnitudes de los voltajes esto se debe a que al realizar dicha conexión se hace una transferencia de cargas, se puede observar cómo en sistema de la maquina síncrona y el eólico el volteje se regula y pierde su valor pico sin embargo estos voltajes recuperan su magnitud en el transcurso del tiempo.

Gráfica 15. Efectos de la conexión entre sistemas en los voltajes.



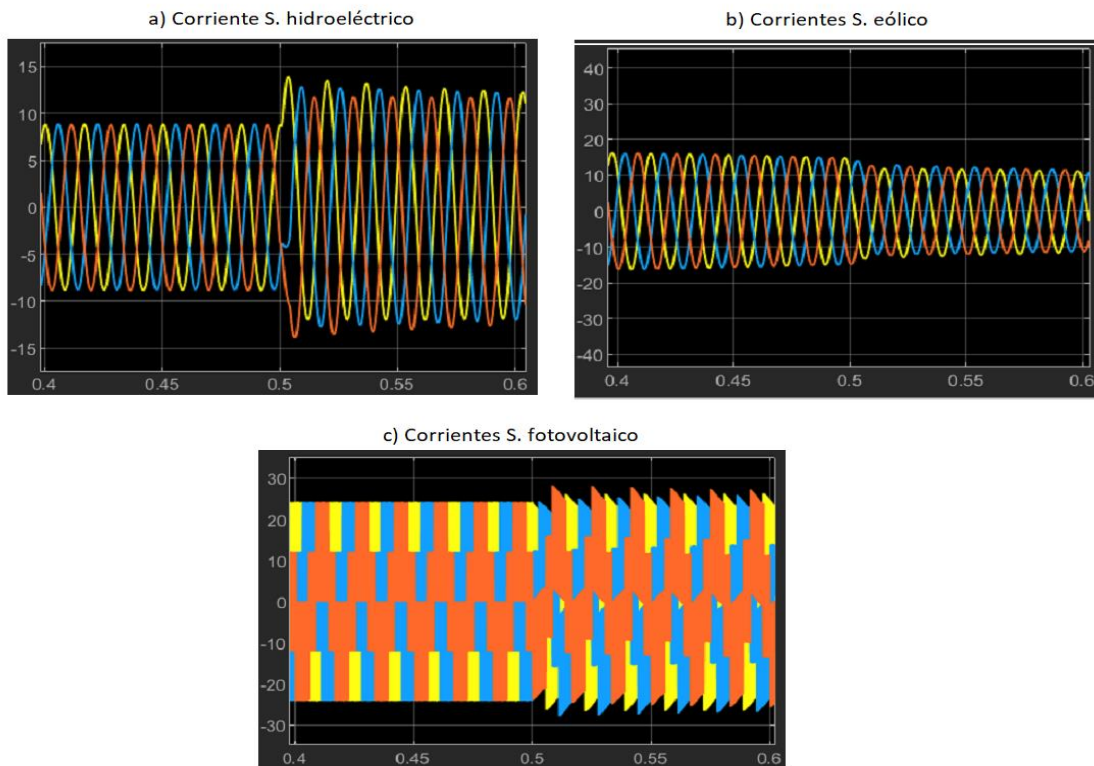


Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

6.4 EFECTOS DE CONEXIÓN EN CORRIENTES DE LA MICRO RED

Para el caso de los efectos de las corrientes debido a la conexión de la micro red se tiene que para el sistema de la maquina síncrona como se observa en la Gráfica 16 las corrientes sufren un alza en sus valores picos además de ser desbalanceadas sin embargo en el transcurso del tiempo estas se empiezan a estabilizar en cuanto al desbalance de magnitudes, el sistema eólico sufre un disminución en sus corrientes de generación y el cambio más notorio se puede observar en las corrientes del sistema fotovoltaico que además de elevar sus magnitudes se observan corrientes distorsionadas a pesar de ser señales cuadradas y no se estabilizan con el paso del tiempo.

Gráfica 16. Efectos de la conexión entre sistemas en las corrientes.

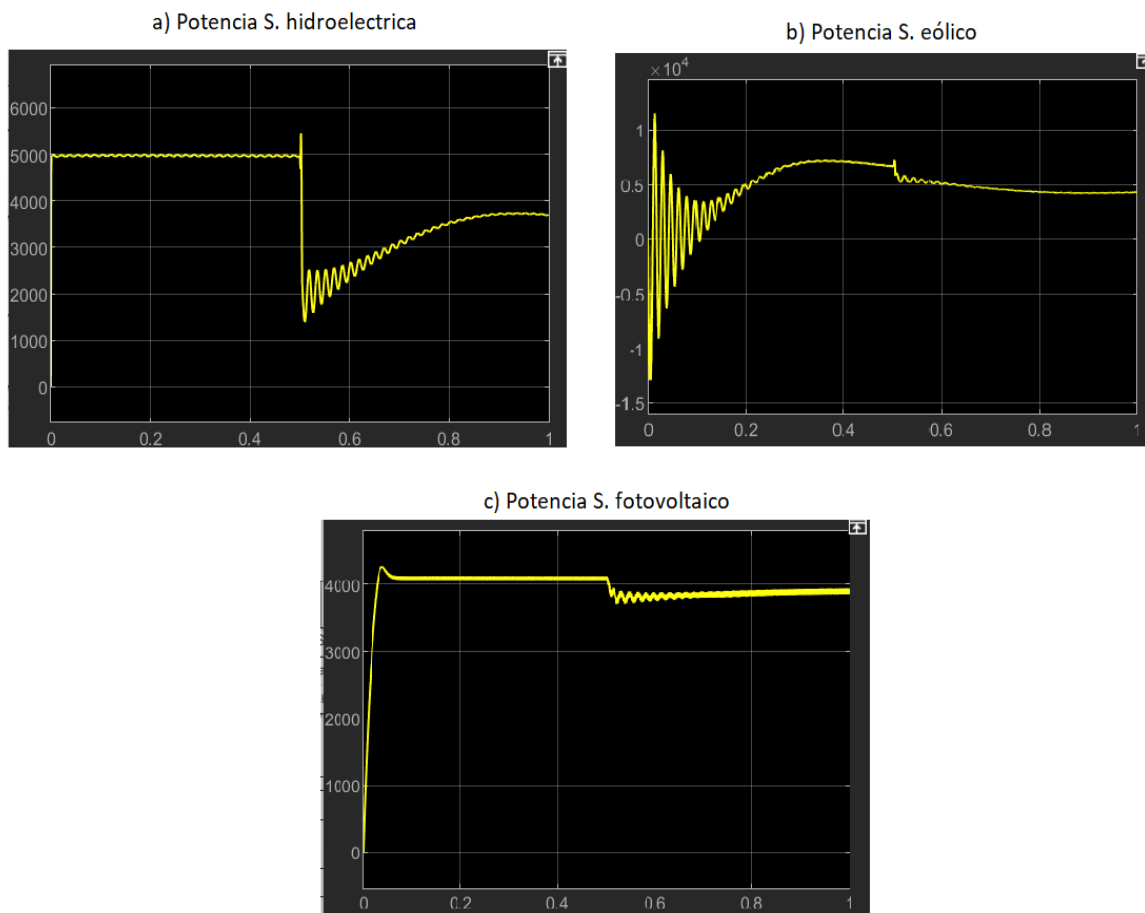


Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

6.5 EFECTOS DE CONEXIÓN EN POTENCIA DE LA MICRO RED

Las potencias de los sistemas también muestran un cambio debido a la conexión de la micro red en la Gráfica 17 se observa como en los tres sistemas existe una disminución de la potencia entregada y que en un transcurso de tiempo relativamente corto el sistema eólico y fotovoltaico empiezan a recuperar sus valores nominales de potencia, el cambio más significativo sucede en el sistema hidroeléctrico debido a la potencia se empieza a estabilizar un poco más de 1kW por debajo de la potencia generada esto se debe a la regulación de voltajes que se sufren las cargas con la conexión de sistemas, por lo tanto el voltaje que está ingresando a la carga es menor que el nominal esto hace que la medición de la potencia instantánea tenga valores inferiores.

Gráfica 17. Efectos de la conexión entre sistemas de generación en las potencias.

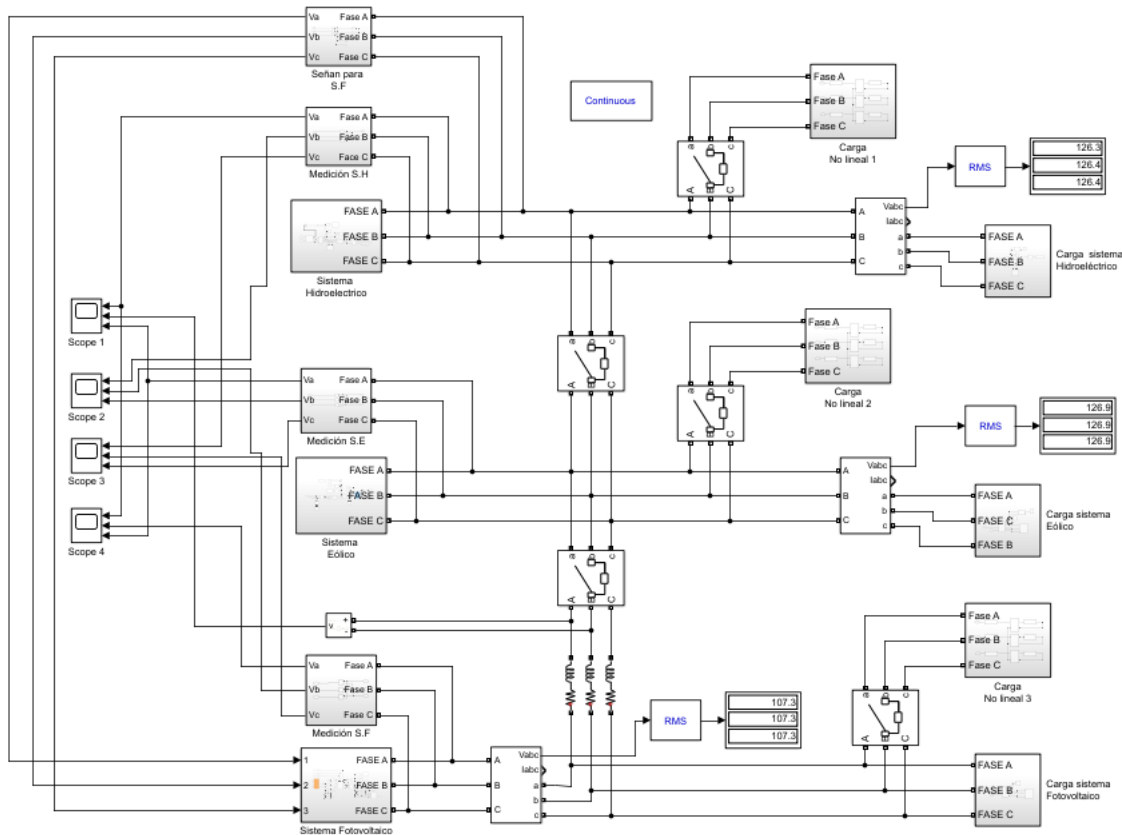


Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

7. IMPLEMENTACIÓN DE CARGAS NO LINEALES A LA MICRO RED AUTÓNOMA.

Como se ha mencionado anteriormente las cargas no lineales son equipos que utilizan electrónica en su entrada, esto básicamente se comporta como cargas que están en constante conmutación, para este trabajo se añadirán 3 cargas lineales al sistema de la micro red autónoma como se muestra en la Figura 18, se conectaron por medio de interruptores que se conmutan a diferente tiempo para observar el comportamiento de las señales. El interruptor de la carga 1 conmuta cerrándose a 1 segundo, el interruptor de la carga 2 se cierra a los 1.2 segundos y la carga 3 se conecta al sistema a los 1.3 segundos.

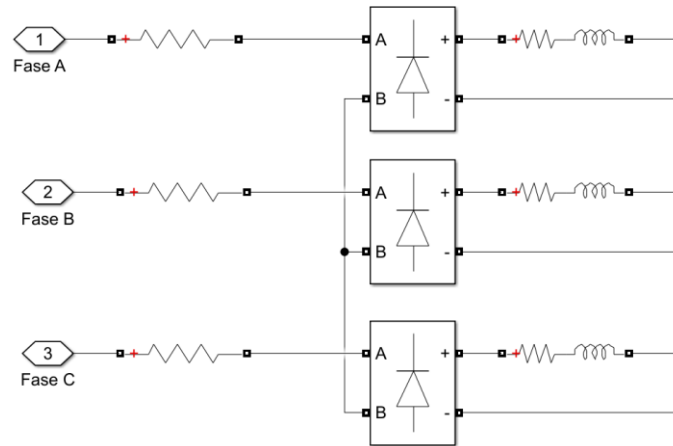
Figura 18. Micro red autónoma con cargas no lineales.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

La estructura de las cargas se muestra en la Figura 19 están conectadas a red a través de impedancias constantes de 1Ω , cada fase se conecta a un bloque de puente universal. Este bloque de puente universal 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). [31]

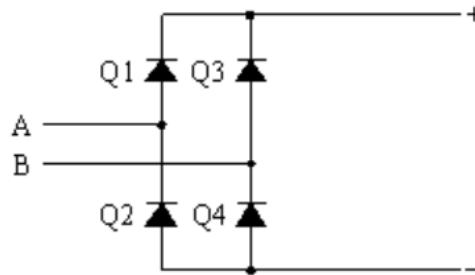
Figura 19. Esquema de cargas no lineales



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

Para el estudio de este caso se hace uso de un convertidor de potencia universal que puede tener hasta cuatro interruptores de potencia conectados en una configuración de puente cuyo circuito está representado en la Figura 20, El tipo de interruptor de alimentación para esta simulación se utilizaron diodos que en sus entradas de bloque están conectados en configuración de estrella a la micro red autónoma y a su salida tiene resistencia e inductores como cargas.

Figura 20. Esquema de convertidor utilizado como puente universal.



Fuente: Extraído de “help” de Simulink de Matlab

7.1 PARÁMETROS DE LAS CARGAS NO LINEALES

Los valores que se tuvieron en cuenta para cada una de las cargas se pueden observar en la tabla 21.

Tabla 6. Parámetros de las cargas no lineales.

CARGA	VALOR RESISTENCIA FASE A, FASE B, FASE C (Ω)	VALOR INDUCTANCIA FASE A, FASE B, FASE C (H)	TIEMPO DE CONEXIÓN (S)
CARGA 1	25, 25, 25	0.5, 0.5, 0.5	1
CARGA 2	40, 40, 40	0.5, 0.5, 0.5	1.2

CARGA 3	50, 50, 50	1, 1, 1	1.3
---------	------------	---------	-----

Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

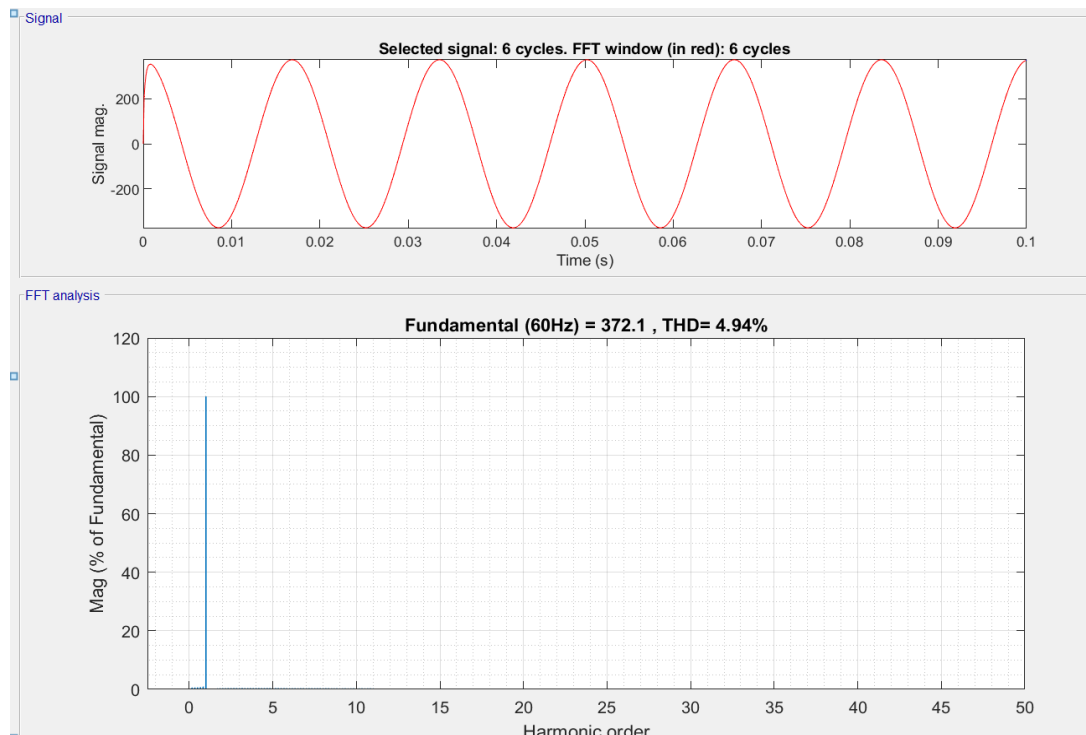
7.2 ESTADO DE SEÑALES DE LOS SISTEMAS SIN CARGAS NO LINEALES

Para analizar los efectos de las cargas no lineales en el sistema se tiene que tener un punto de referencia de las señales antes de la conexión de dichas cargas para esto se hará un análisis de la fase A de cada uno de los sistemas y de la micro red autónoma cuando funciona como un conjunto. De estos parámetros se revisó los valores RMS de voltaje y corriente y su contenido armónico.

7.2.1 Parámetros sistema hidroeléctrico

El software Matlab en su herramienta Simulink posee un apartado para poder realizar una transformada rápida de Fourier y poder observar el contenido armónico de una señal. Para este caso se revisará el contenido armónico de voltajes y corrientes en un lapso de tiempo de 0.1 segundos es decir se revisará los primeros 6 ciclos de cada señal.

Figura 21. FTT voltajes sistema hidroeléctrico.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Figura 21 se observa el análisis de la transformada rápida de Fourier del voltaje de la fase A del sistema hidroeléctrico, en la parte superior se observa la señal y el número de ciclos que se está teniendo en cuenta para el análisis, en la parte inferior se plasma un diagrama de barras en el que se observan los armónicos que componen la señal, de este voltaje se puede analizar que no existe armónicos con magnitudes considerables y que el total de distorsión armónica no supera el 5%, sin embargo para efectos de posteriores análisis se presenta la tabla 7 con valores de los armónicos a resaltar.

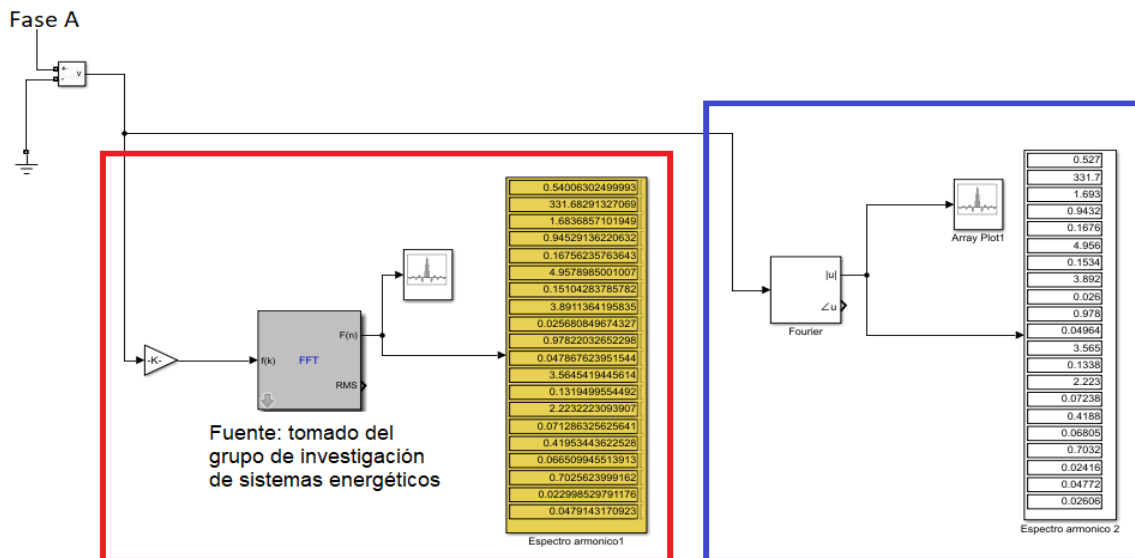
Tabla 7. Porcentaje de armónicos en voltajes del S. hidroeléctrico.

ARMONICO	% DE LA FUNDAMENTAL
0	0.31
2	0.39
3	0.42
5	0.41
7	0.39
9	0.36
11	0.33
17	0.27
Con mayor magnitud (3)	0.42

Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

Para poder observar el espectro de magnitud de las señales en la simulación se tuvieron en cuenta dos bloques que realizan la transformada de Fourier el primero señalado de color azul en la figura 22 es un bloque dispuesto en la librería de Simulink el cual hace un análisis de Fourier de la señal de entrada de un ciclo de la frecuencia fundamental de la señal y arroja tanto el espectro de magnitud como el de fase, el segundo bloque marcado de color rojo es tomado del grupo de investigación de sistemas energéticos el cual nuevamente arroja los valores del espectro de magnitud de la señal.

Figura 22. Bloques para el análisis de Fourier usados en la simulación.

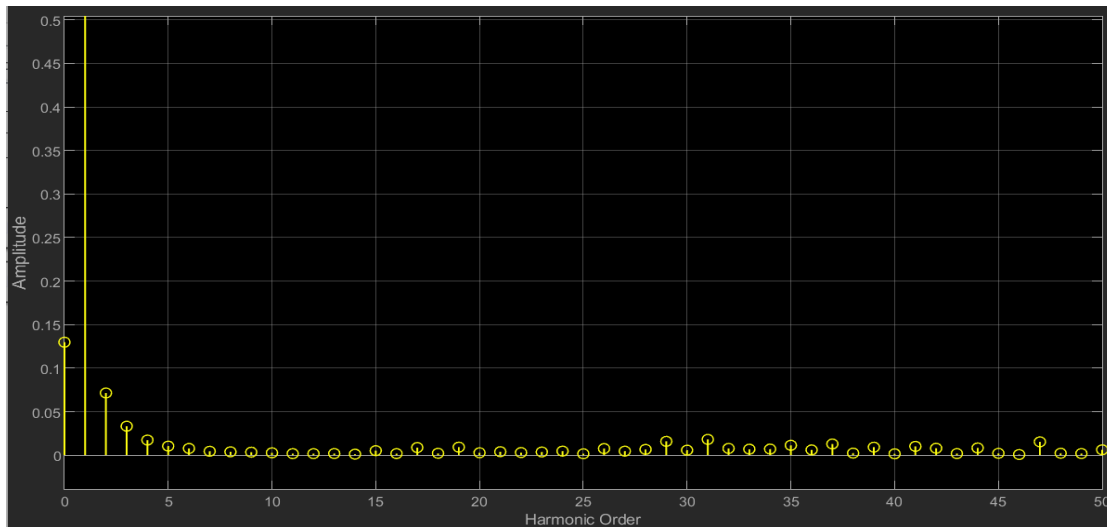


Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

Como se observa en los valores del espectro de magnitud de los dos display de la Figura 22 los valores de magnitud de los armónicos son muy similares por tanto para este trabajo se mostrará el espectro de magnitud arrojado por el bloque "Fourier" para cada una de las señales que se analizaran a continuación.

En la gráfica 18 se muestra el espectro de magnitud del voltaje de la hidroeléctrica este se obtiene a través de la transformada de Fourier para este caso la fundamental tiene una magnitud de 374.1 V y se observa como existen armónicos con magnitudes casi despreciables.

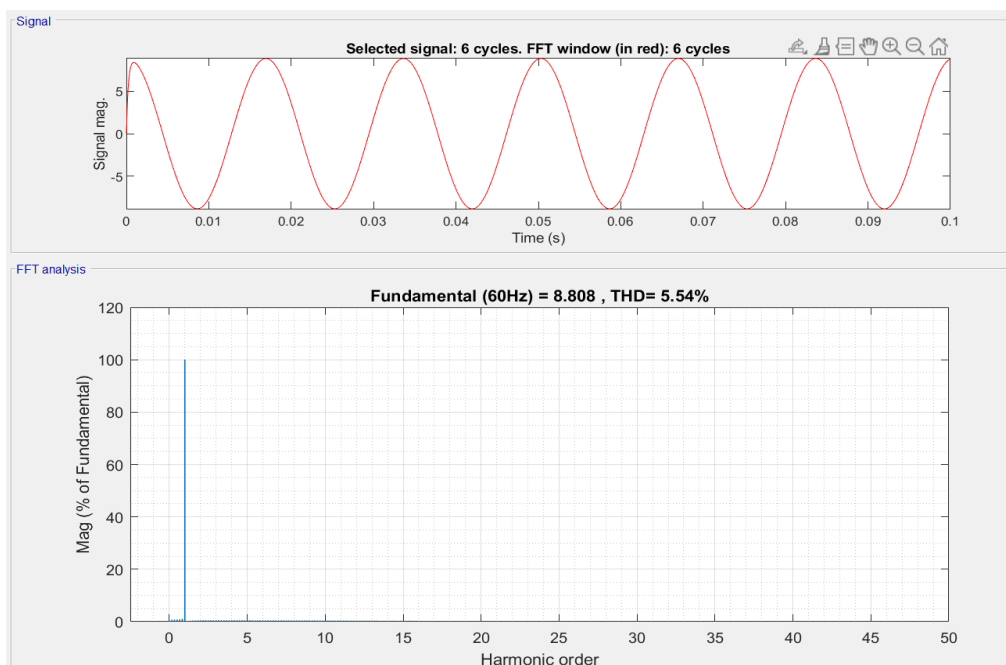
Gráfica 18. Espectro de magnitud del voltaje sistema hidroeléctrico.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Figura 22 se muestra el análisis de la transformada rápida de Fourier para el caso de las corrientes del sistema de este se puede resaltar que no hay presencia de armónicos con una magnitud considerable y que si THD no supera el 6%.

Figura 23. FTT corrientes sistema hidroeléctrico.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la tabla 8 se puede observar que en las corrientes del sistema no existe porcentajes elevados en las corrientes del sistema.

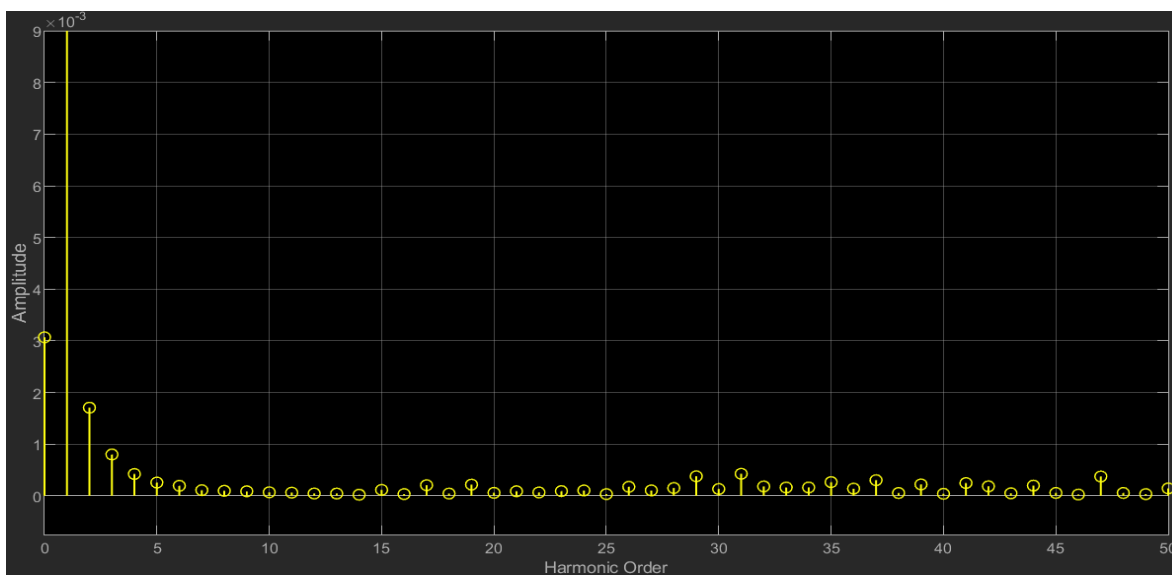
Tabla 8. Porcentaje de armónicos en corrientes del S. hidroeléctrico.

ARMONICO	% DE LA FUNDAMENTAL
0	0.37
2	0.51
3	0.53
5	0.51
7	0.48
9	0.44
11	0.41
17	0.32
Con mayor magnitud (3)	0.53

Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

La gráfica 19 muestra el espectro de magnitud de la corriente del sistema donde la fundamental tiene una magnitud de 8.864A y se observan armónicos con magnitudes muy pequeñas.

Gráfica 19. Espectro de magnitud corriente sistema hidroeléctrico

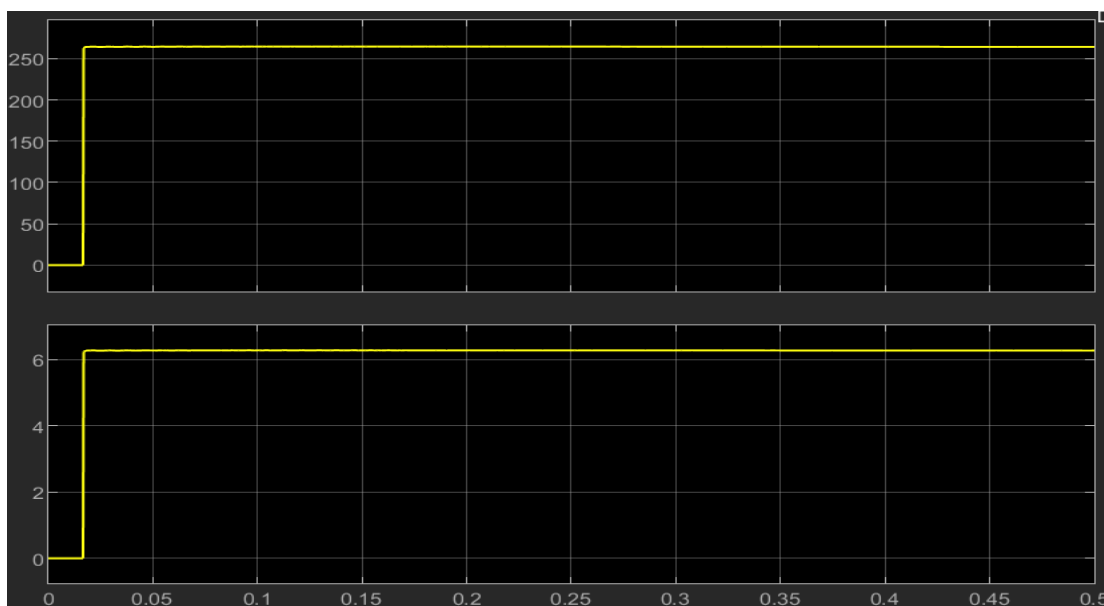


Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Gráfica 20 se muestra en la parte superior el valor RMS del voltaje a la salida del sistema hidroeléctrico y en la parte inferior se plasma el valor RMS de la corriente para el

caso de las dos variables se observa que no existen cambios en estas magnitudes, el cambio de magnitud que se observa es el tiempo que el sistema se demora en calcular dichos valores.

Gráfica 20. Valores RMS de voltajes y corrientes del sistema hidroeléctrico

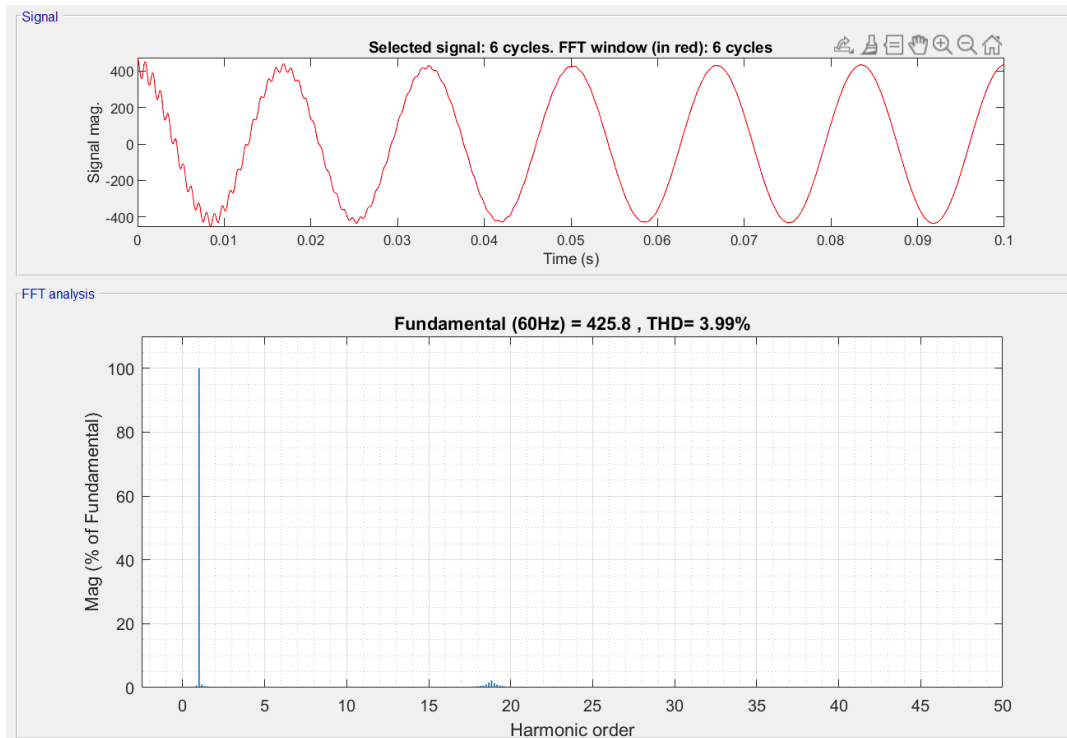


Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

7.2.2 Parámetros sistema eólico

En la Figura 23 se observa el análisis de la transformada rápida de Fourier del voltaje de la fase A del sistema eólico, en la parte superior se observa la señal y el número de ciclos que se está teniendo en cuenta para el análisis que son 6 ciclos, además se puede observar como en los dos primeros ciclos la forma de onda es distorsionada esto debido al arranque de la maquina y cargue de condensadores, en la parte inferior se plasma un diagrama de barras en el que se observan los armónicos que componen la señal, de este voltaje se puede analizar que no existe armónicos con magnitudes considerables sin embargo si hay uno que resalta y que el total de distorsión armónica no supera el 4%, sin embargo para efectos de posteriores análisis se presenta la tabla 9 con valores de los armónicos a resaltar.

Figura 24. FTT voltajes sistema eólico.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la tabla 9 se puede analizar que no existen armónicos con magnitudes considerables sin embargo se puede resaltar que hay una presencia del armónico 19 el cual aumentara ligeramente las perdidas.

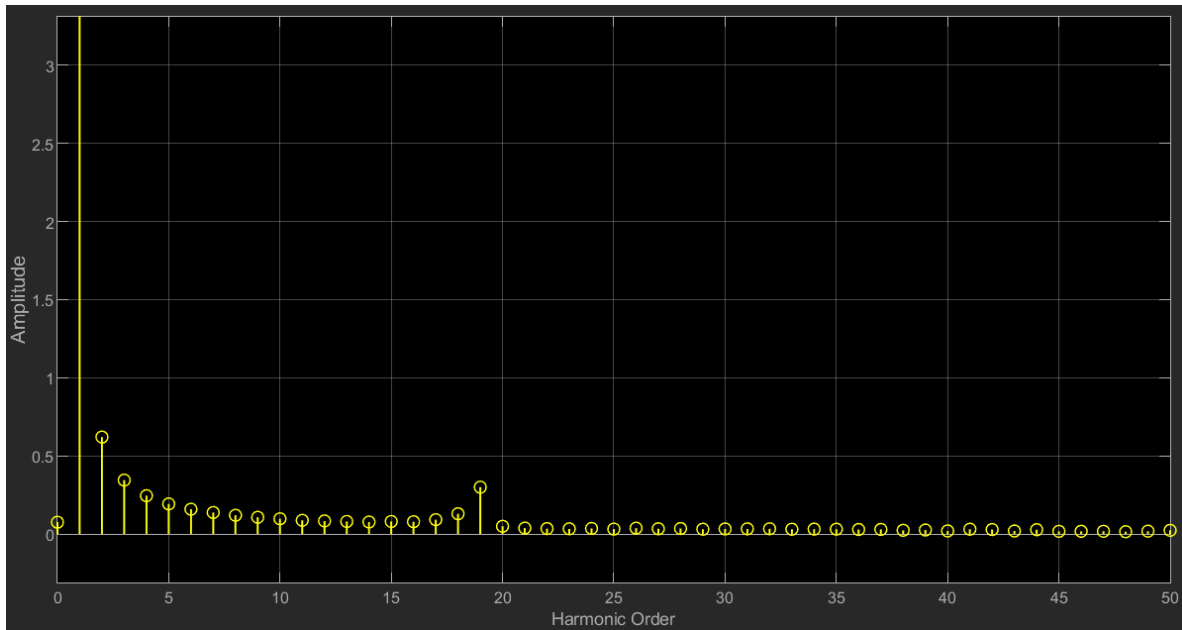
Tabla 9. Porcentaje de armónicos en voltajes del S. eólico.

ARMONICO	% DE LA FUNDAMENTAL
0	0.06
2	0.18
3	0.11
5	0.07
7	0.05
9	0.05
11	0.06
17	0.2
Con mayor magnitud (19)	1.42

Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

La gráfica 21 muestra el espectro del voltaje sistema en el cual la fundamental tiene una de magnitud 434.2 V y se ve que igual a la FFT se observa el armónico 19 pero a diferencia de este el de mayor magnitud es de armónico 2.

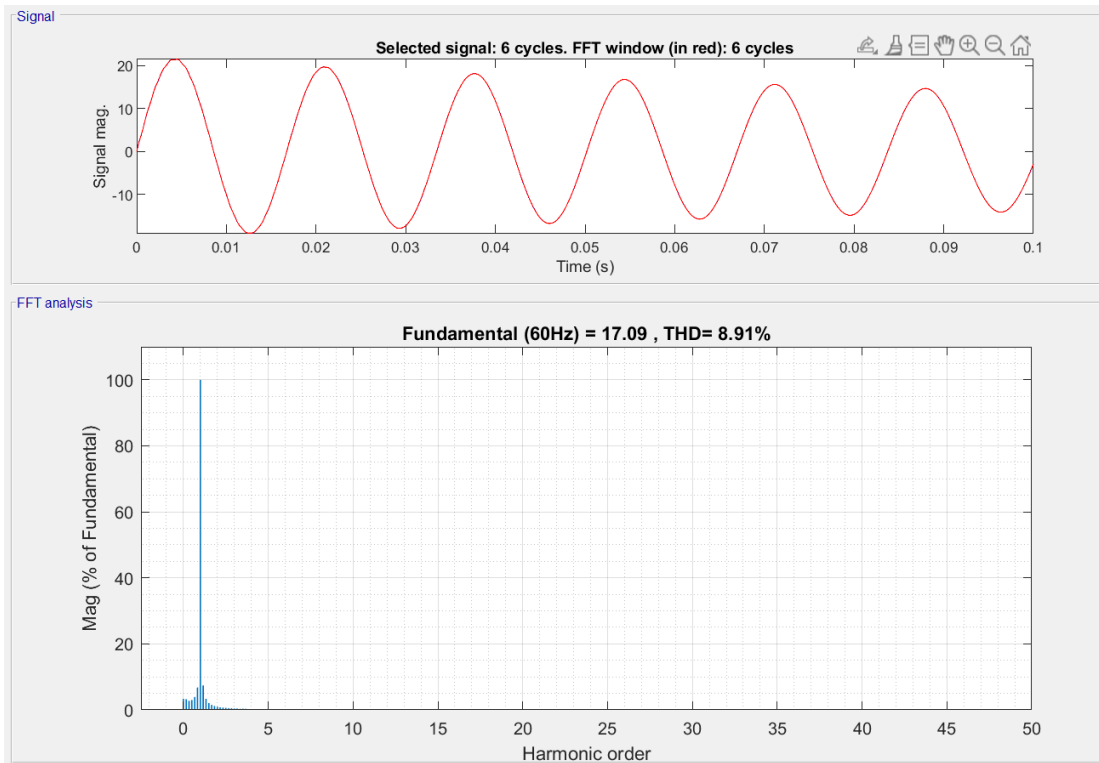
Gráfica 21. Espectro de magnitud voltaje sistema eólico.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Figura 24 se muestra el análisis de la transformada rápida de Fourier para el caso de las corrientes de salida del generador eólico, en la parte superior se observa que se analizan los primeros 6 ciclos de los cuales se observa que el arranque de la maquina eleva el valor pico de la corriente en los primeros ciclos, en cuanto a la presencia de armónicos representado en la parte inferior de la figura se alcanza a resaltar la presencia del armónico cero y se tiene un THD de casi el 9%.

Figura 25. FTT corrientes sistema eólico.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

De la tabla 10 se puede observar que el mayor resalto de armónicos en el sistema corresponde al armónico 0 u offset de CD el cual desplazara la onda de corriente en aproximadamente 0.4 A.

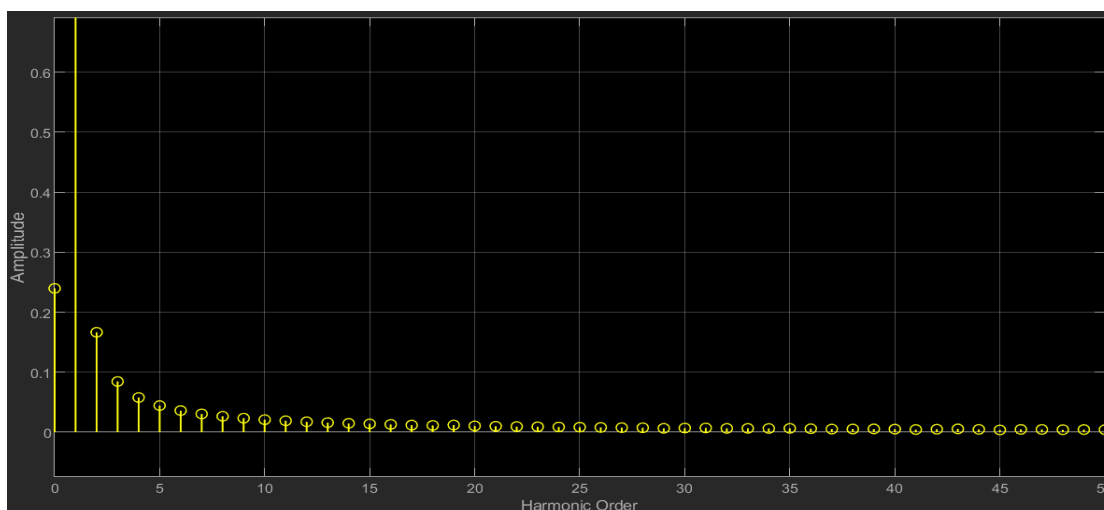
Tabla 10. Porcentaje de armónicos en corrientes del S. eólico.

ARMONICO	% DE LA FUNDAMENTAL
0	3.38
2	0.95
3	0.43
5	0.21
7	0.14
9	0.10
11	0.08
17	0.06
Con mayor magnitud (0)	3.38

Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

En el espectro de magnitud que se muestra en la gráfica 22 se observan los armónicos de la corriente del sistema eólico en esta no existen armónicos con magnitudes considerables.

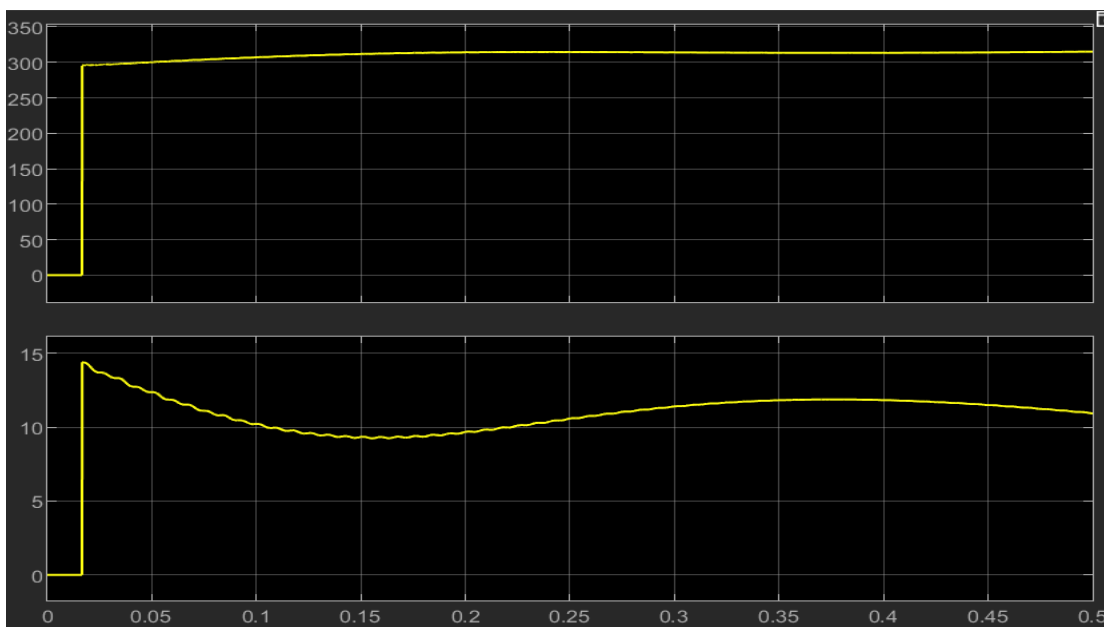
Gráfica 22. Espectro de magnitud corriente sistema eólico.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Gráfica 23 se muestra en la parte superior el valor RMS del voltaje a la salida del sistema eólico el cual sufre un ligero incremento para luego mantenerse en su valor nominal y constante y en la parte inferior se plasma el valor RMS de la corriente el cual comienza con un valor elevado y ligeras perturbaciones y durante los primeros milisegundos oscila hasta que comienza a estabilizarse.

Gráfica 23. Valores RMS de voltajes y corrientes del sistema eólico

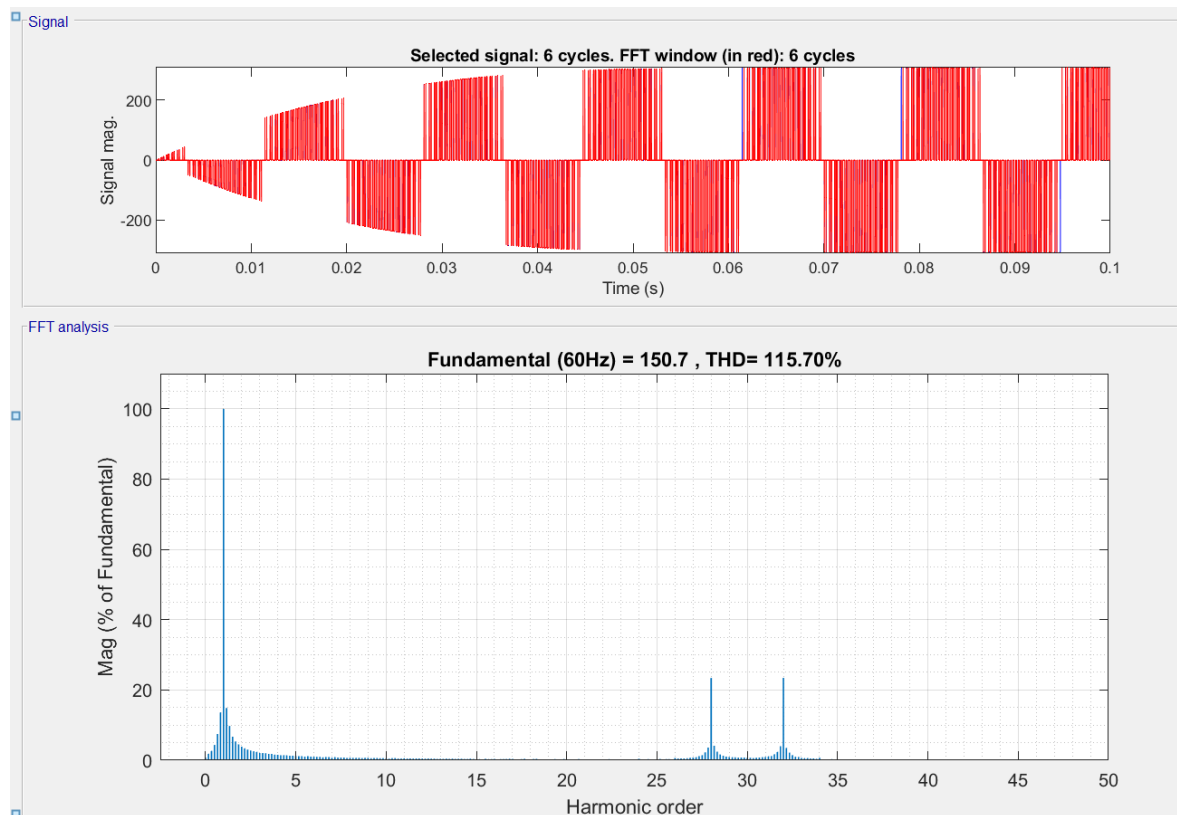


Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

7.2.3 Parámetros sistema fotovoltaico

En la Figura 25 se observa el análisis de la transformada rápida de Fourier del voltaje de la fase A del sistema fotovoltaico, en la parte superior se observa la señal y el número de ciclos que se está teniendo en cuenta para el análisis que son 6 ciclos, se puede resaltar que es una señal cuadrada debido a que corresponde a la salida de un inversor, en la parte inferior se plasma un diagrama de barras en el que se observan los armónicos que componen la señal, de este voltaje se puede analizar que de los tres sistemas este tiene la mayor cantidad de armónicos y que posee un THD alto con casi el 116%

Figura 26. FTT voltajes sistema fotovoltaico.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

De la tabla 11 se puede resaltar que al ser una señal cuadrada posee dos armónicos el 28 y 32 con magnitudes altas que tendrían más de 40 V pico es por esto que después de la transformada rápida de Fourier que se obtiene un total de distorsión armónica de más del 100%.

Tabla 11. Porcentaje de armónicos en voltajes del S. fotovoltaico.

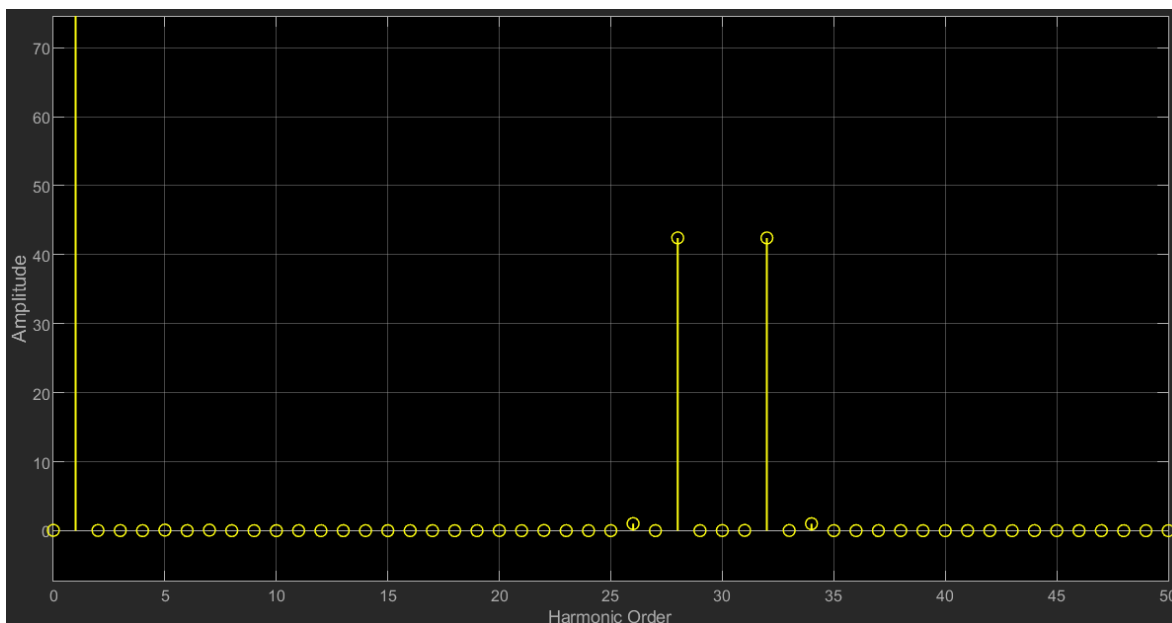
ARMONICO	% DE LA FUNDAMENTAL
0	0.79
2	3.89
3	2.09

5	1.18
7	0.74
9	0.72
28	23.41
32	23.43
Con mayor magnitud (32)	23.43

Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En el espectro de magnitud mostrado en la gráfica 24 se observa cómo se resaltan los armónicos 28 y 32 con magnitudes superiores a 40V y la fundamental con una magnitud de 177.4 V

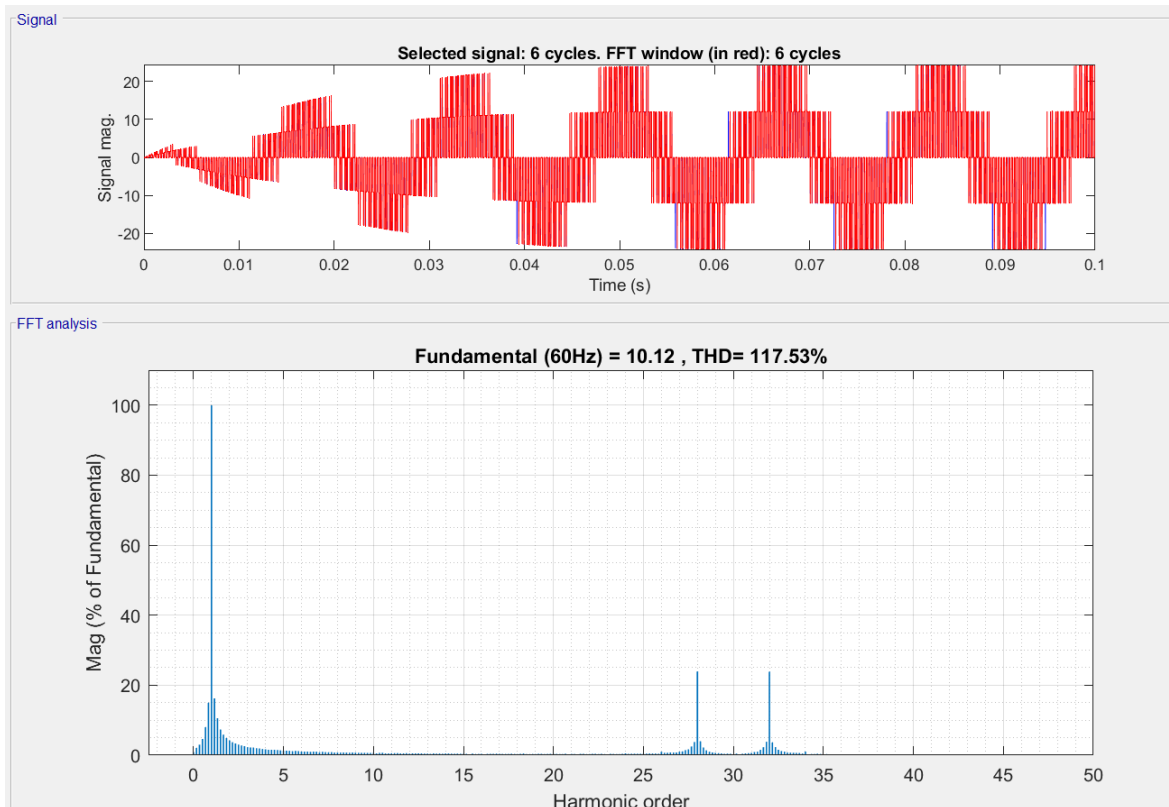
Gráfica 24. Espectro de magnitud voltaje sistema fotovoltaico.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Figura 26 se muestra el análisis de la transformada rápida de Fourier para el caso de las corrientes de salida del generador fotovoltaico, en la parte superior se observa que se analizan los primeros 6 ciclos en cuales se observa que la señal está compuesta por 5 pulsos debido a la salida del convertidor, en cuanto a la presencia de armónicos se observa en el diagrama de barras la presencia de dos armónicos con porcentajes relevantes para el análisis del sistema.

Figura 27. FTT corrientes sistema fotovoltaico.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

De la tabla 12 se puede resaltar que la corriente al ser una señal cuadrada posee dos armónicos el 28 y 32 con magnitudes altas que tendrían más de 8 A pico es por esto que después de la transformada rápida de Fourier que se obtiene un total de distorsión armónica de más del 100%

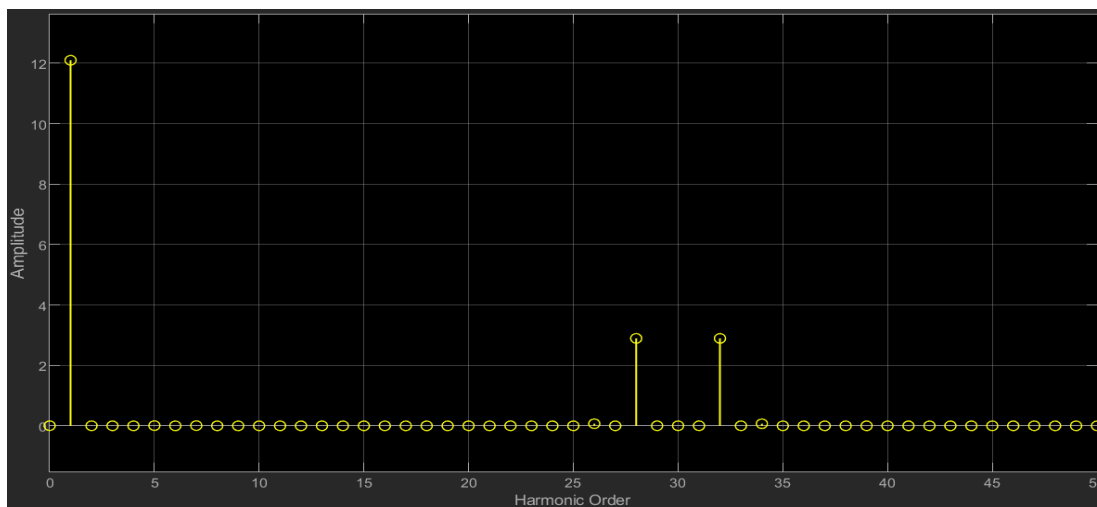
Tabla 12. Porcentaje de armónicos en corrientes del S. fotovoltaico.

ARMONICO	% DE LA FUNDAMENTAL
0	0.86
2	4.22
3	2.28
5	1.29
7	0.83
9	0.74
28	23.92
32	23.85
Con mayor magnitud (32)	23.85

Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

Para el caso del espectro de magnitud de la corriente del sistema mostrado en la gráfica 25 se observan nuevamente la presencia de los armónicos 28 y 32 con magnitudes considerables.

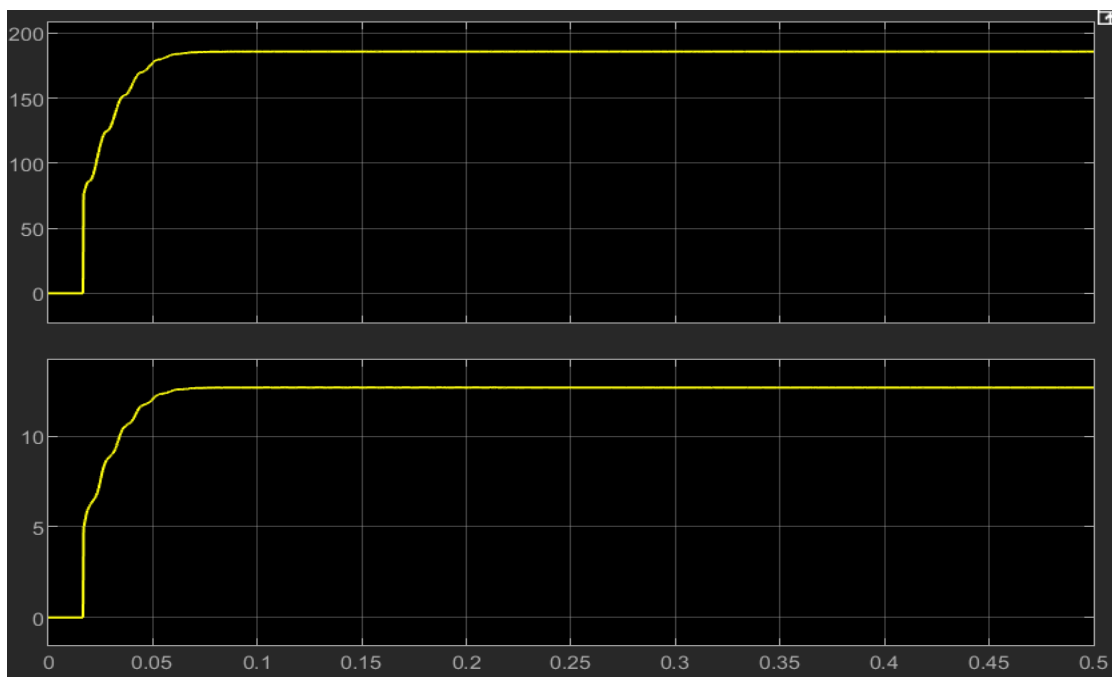
Gráfica 25. Espectro de magnitud corriente sistema fotovoltaico.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Gráfica 26 se muestra en la parte superior el valor RMS del voltaje a la salida del sistema fotovoltaico el cual sufre un incremento para luego mantenerse en su valor nominal y constante y en la parte inferior se plasma el valor RMS de la corriente el cual comienza a elevarse rápidamente para alcanzar el valor nominal para estabilizarse.

Gráfica 26. Valores RMS de voltajes y corrientes del sistema fotovoltaico.

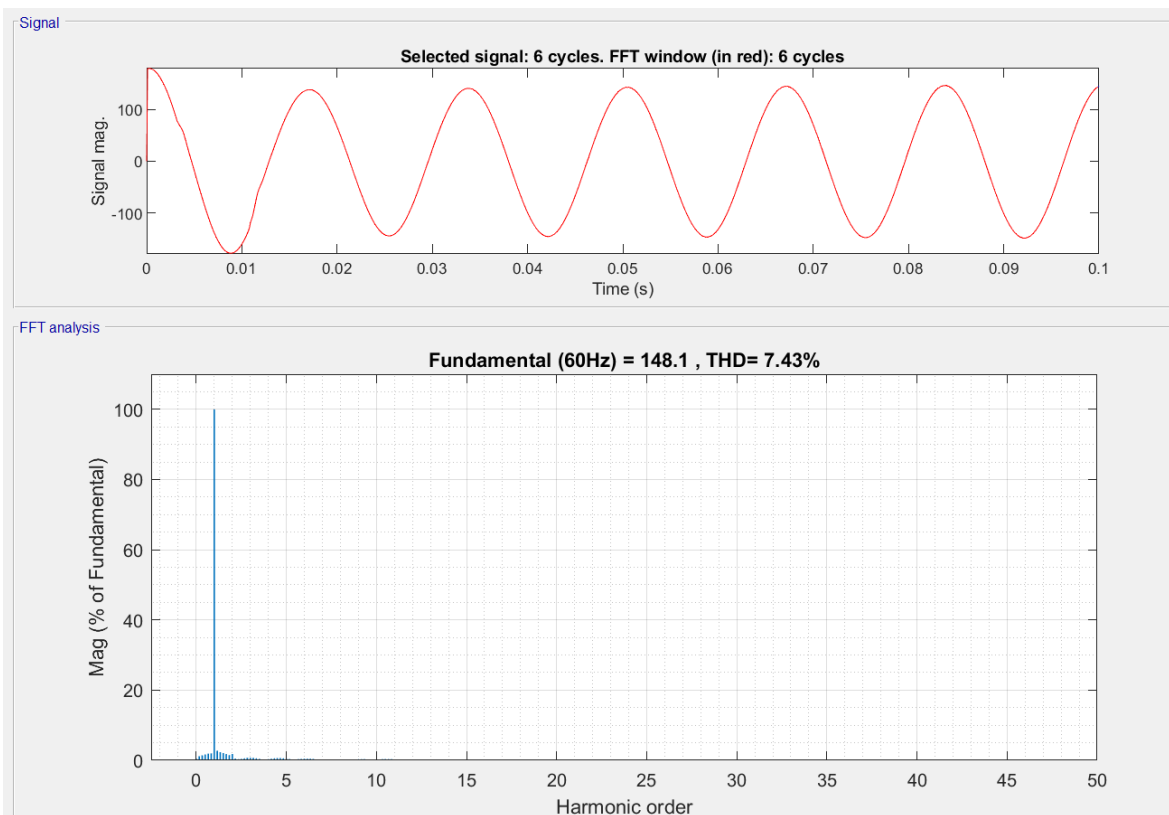


Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

7.2.4 Parámetros del bus de la micro red autónoma

En el bus de la micro red autónoma se analizará el voltaje pues es un punto común para todos los sistemas, sin embargo, no se analizará la corriente pues esta dependerá del punto donde se mida y esto ya se revisó para cada uno de los sistemas de generación. En la Figura 27 se observa el análisis de la transformada rápida de Fourier del voltaje de la fase A del bus de la micro red autónoma, en la parte superior se observa la señal y el número de ciclos que se está teniendo en cuenta, para el análisis es de 6 ciclos, en el primer ciclo se observa un alza en la magnitud esto debido al arranque de las máquinas de generación, en la parte inferior se plasma el diagrama de barras en el que se observan los armónicos que componen la señal, de este voltaje se puede analizar que no existe armónicos con magnitudes considerables sin embargo el total de distorsión armónica se acerca al 8%.

Figura 28. FTT voltajes del sistema de la micro red autónoma.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la tabla 13 se puede analizar que no existen armónicos en el voltaje con magnitudes considerables sin embargo se puede resaltar que la mayor presencia se resalta del armónico 2.

Tabla 13. Porcentaje de armónicos en voltajes del bus de la micro red autónoma.

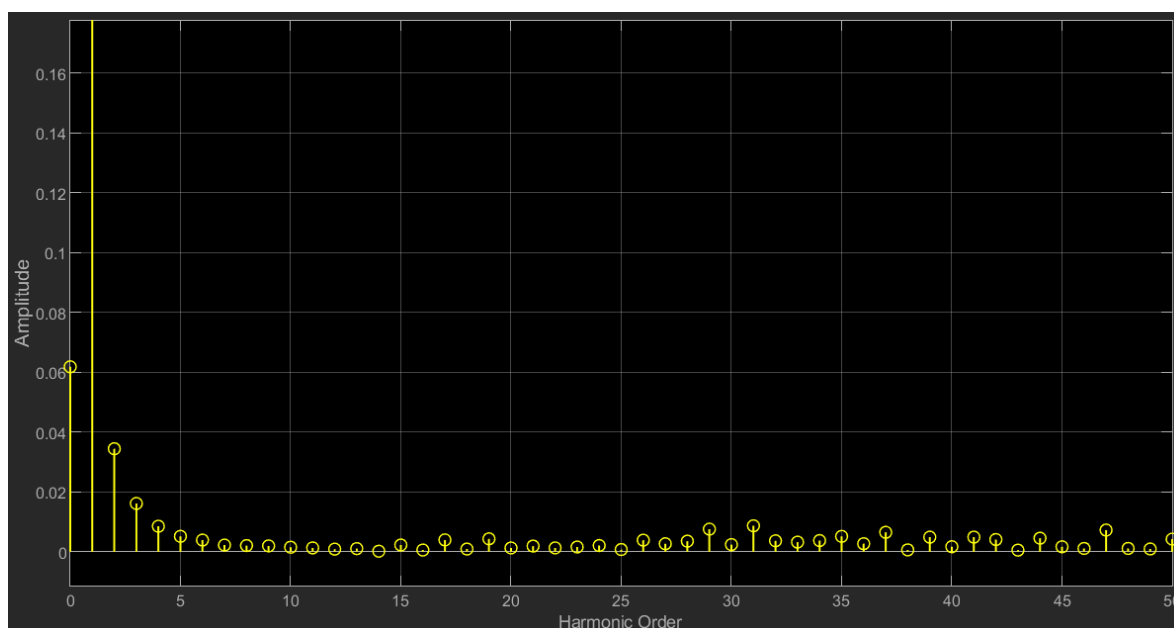
ARMONICO	% DE LA FUNDAMENTAL
0	0.53
2	1.81

3	0.73
5	0.48
7	0.13
9	0.32
11	0.29
17	0.19
Con mayor magnitud (2)	1.81

Fuente: Autor extraído de simulación de la micro red autónoma.

En el espectro de magnitud de voltaje del bus de la micro red mostrado en la gráfica 27, no se tiene armónicos con magnitudes considerables sin embargo se alcanzan a resaltar armónicos que se encuentran en cada uno de los sistemas.

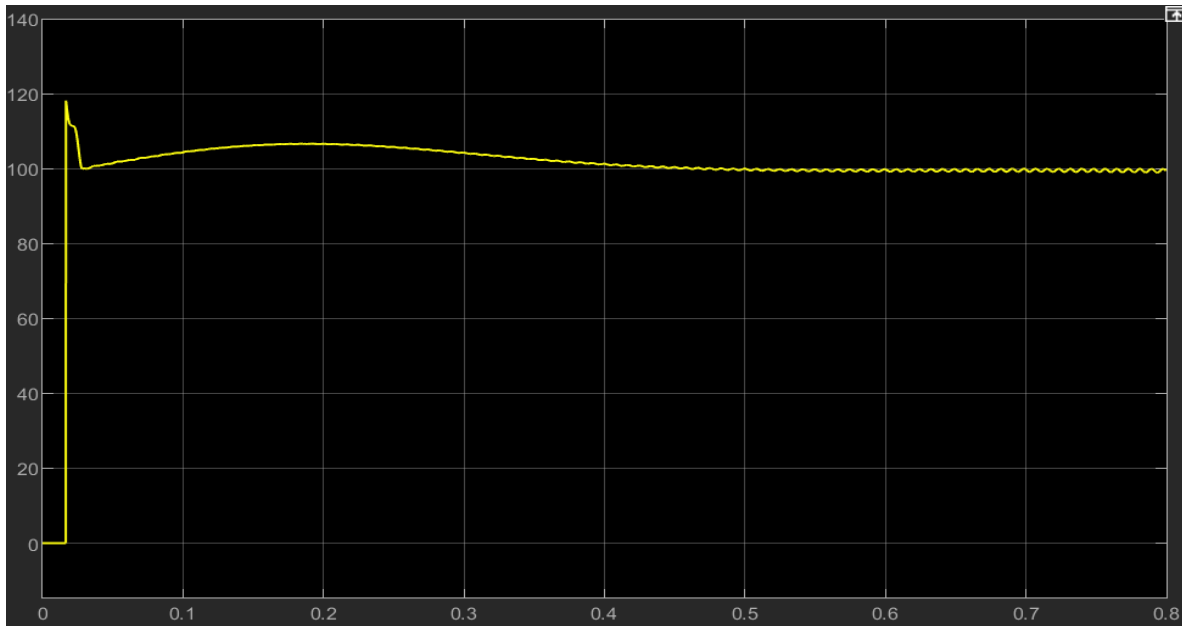
Gráfica 27. Espectro de magnitud voltaje del sistema de la micro red autónoma.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Gráfica 28 se muestra el valor RMS del voltaje del bus sistema de la micro red autónoma el cual sufre un decremento al momento de conectaras todos los sistemas de generación en conjunto para luego mantenerse en su valor inferior al nominal y contante debe resaltarse que esta caída de tensión es de aproximadamente 27 V lo que genera una caída de tensión considerable debido a que es aproximadamente del 21 %.

Gráfica 28. Valores RMS de voltajes del bus del sistema de la micro red autónoma.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

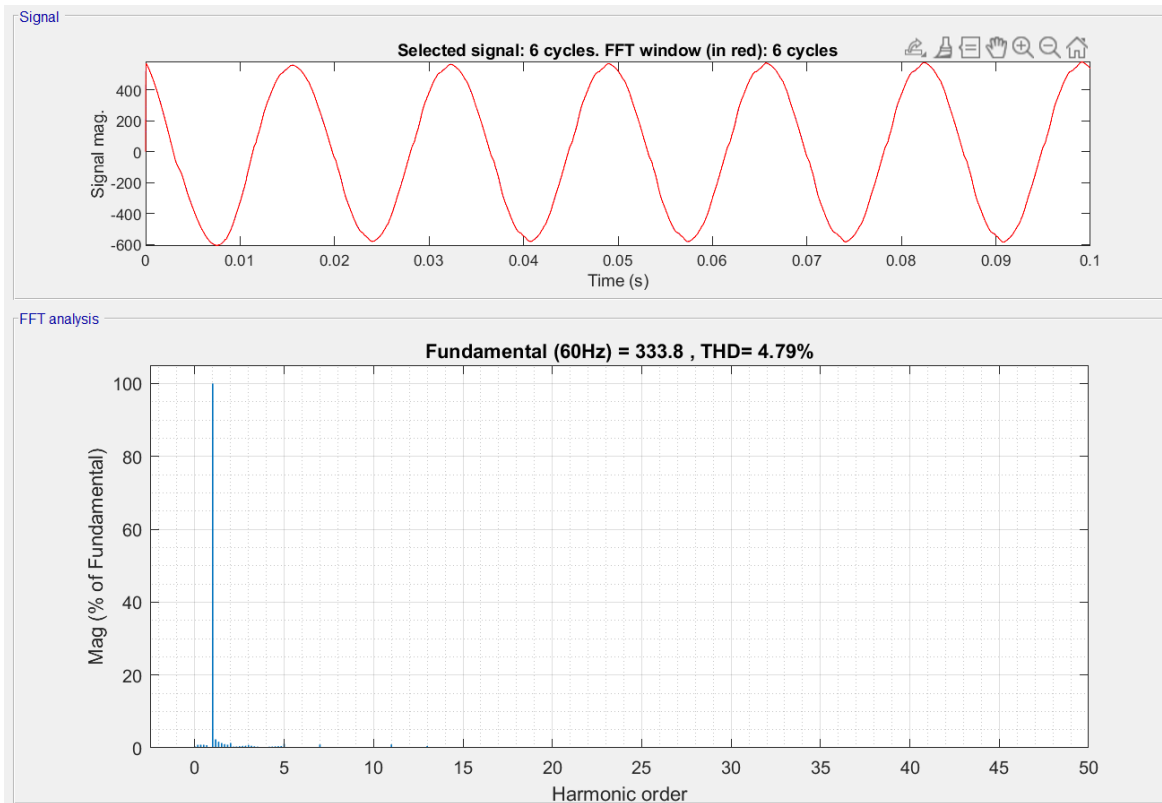
7.3 ESTADO DE SEÑALES DE LOS SISTEMAS CON CARGAS NO LINEALES

En el siguiente apartado se mostrará los efectos de la conexión de las cargas no lineales al sistema, se analizará según los parámetros definidos anteriormente, se tiene que tener en cuenta que para el análisis de armónicos se tuvo que conectar las cargas no lineales desde el instante cero esto con el fin de medir en los primeros ciclos.

7.3.1 Parámetros sistema hidroeléctrico

En la Figura 28 se observa el análisis de la transformada rápida de Fourier del voltaje de la fase A del sistema hidroeléctrico, en la parte superior se observa la señal y el número de ciclos que se está teniendo en cuenta para el análisis que es de 6 ciclos, para este caso se puede observar que las formas de onda de la señal se encuentran un poco distorsionadas, en la parte inferior se plasma el diagrama de barras en el que se observan los armónicos que componen la señal, de este voltaje se puede observar que hay una disminución de la magnitud del voltaje y existe una presencia de primeros armónicos sin embargo las magnitudes se analizaran con la tabla 14.

Figura 29. FTT voltajes sistema hidroeléctrico con cargas no lineales.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la tabla 14 se observa el valor en porcentaje de los armónicos como se puede observar en el voltaje no existe un aumento considerable de los armónicos, se puede resaltar que el armónico de orden 5 es el que tuvo un aumento considerable.

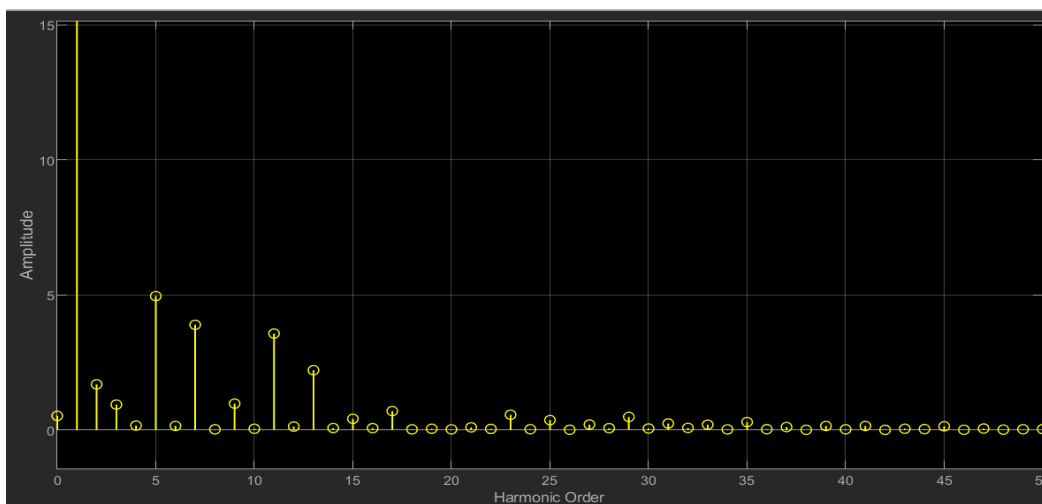
Tabla 14. Porcentaje de armónicos en voltajes del S. hidroeléctrico con cargas no lineales.

ARMONICO	% DE LA FUNDAMENTAL
0	0.41
2	1.35
3	0.80
5	1,10
7	0.92
9	0.12
11	0.96
17	0.12
Con mayor magnitud (2)	1.35

Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la gráfica 29 se observa como a partir de la conexión de las cargas no lineales existe un aumento en la magnitud de los armónicos del voltaje del sistema hidroeléctrico.

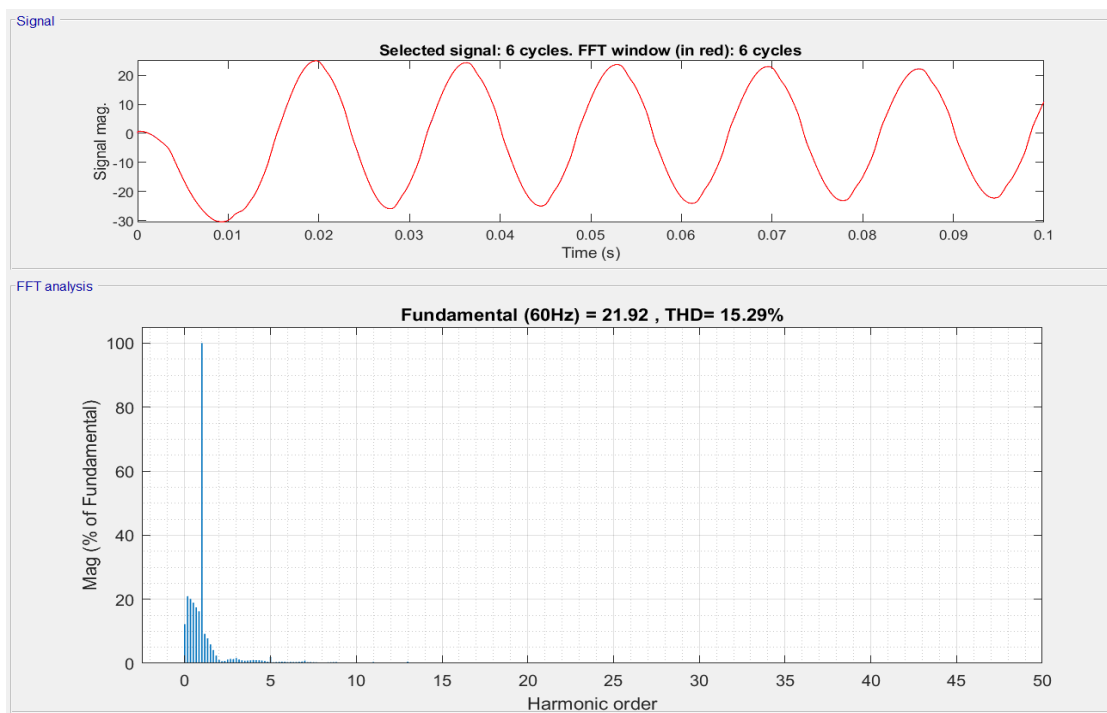
Gráfica 29. Espectro de magnitud del voltaje sistema hidroeléctrico con cargas no lineales.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Figura 29 se muestra el análisis de la transformada rápida de Fourier para el caso de las corrientes del sistema de este se puede resaltar que existe una presencia de armónico cero, así como armónicos que no son múltiplos de la fundamental, el total de distorsión armónica se elevó y ahora alcanza el casi el 15.5%.

Figura 30. FTT Corrientes sistema hidroeléctrico con cargas no lineales.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

De la tabla 15 se puede resaltar que debido a la conexión de las cargas no lineales en el sistema hidroeléctrico el armónico cero, aumento considerablemente su porcentaje.

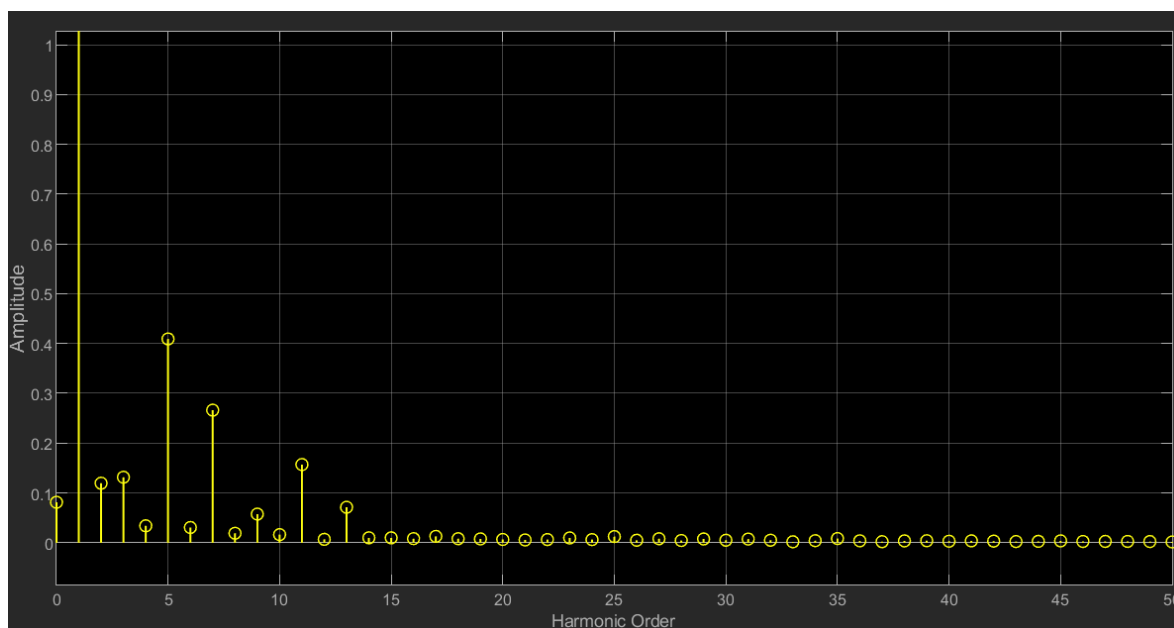
Tabla 15. Porcentaje de armónicos en corrientes del S. hidroeléctrico con cargas no lineales.

ARMONICO	% DE LA FUNDAMENTAL
0	12.19
2	1.08
3	1.65
5	1,99
7	0.84
9	0.21
11	0.40
17	0.19
Con mayor magnitud (0)	12.19

Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

Para el caso de las magnitudes mostradas en la gráfica 30 se puede decir que siguen siendo magnitudes reducidas respecto de la fundamental que es de 22.08A.

Gráfica 30. Espectro de magnitud de la corriente del sistema hidroeléctrico con cargas no lineales.

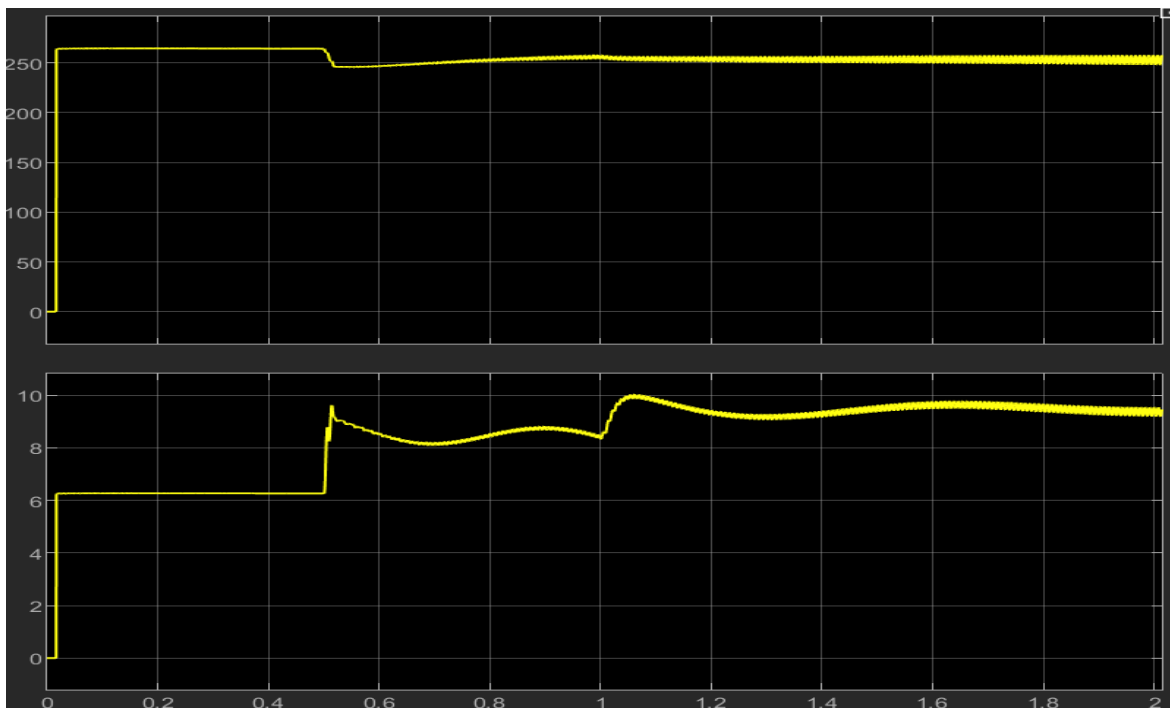


Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Gráfica 31 se observa en los valores RMS de voltajes y corrientes del sistema hidroeléctrico se pueden observar dos estados estos debido a que el sistema opera en primera instancia sin estar conectado a la micro red, a los 0.5 segundos se hace la conexión

a la micro red y se pueden los efectos analizados anteriormente, el cambio sucede a 1 segundo cuando se hace el cierre de los interruptores de las cargas no lineales que quedan conectadas a la micro red, en este momento se puede observar un aumento de corriente que es la parte inferior de la gráfica que poco a poco se estabiliza para mantener un valor constante sin embargo con una oscilación de aproximadamente 1.5 A, en el caso del voltaje de la parte superior de la gráfica se observa una estabilización del voltaje en el momento de la conmutación, sin embargo pierde magnitud en referencia a al voltaje nominal del sistema de generación

Gráfica 31. Valores RMS de voltajes y corrientes del sistema hidroeléctrico con cargas no lineales

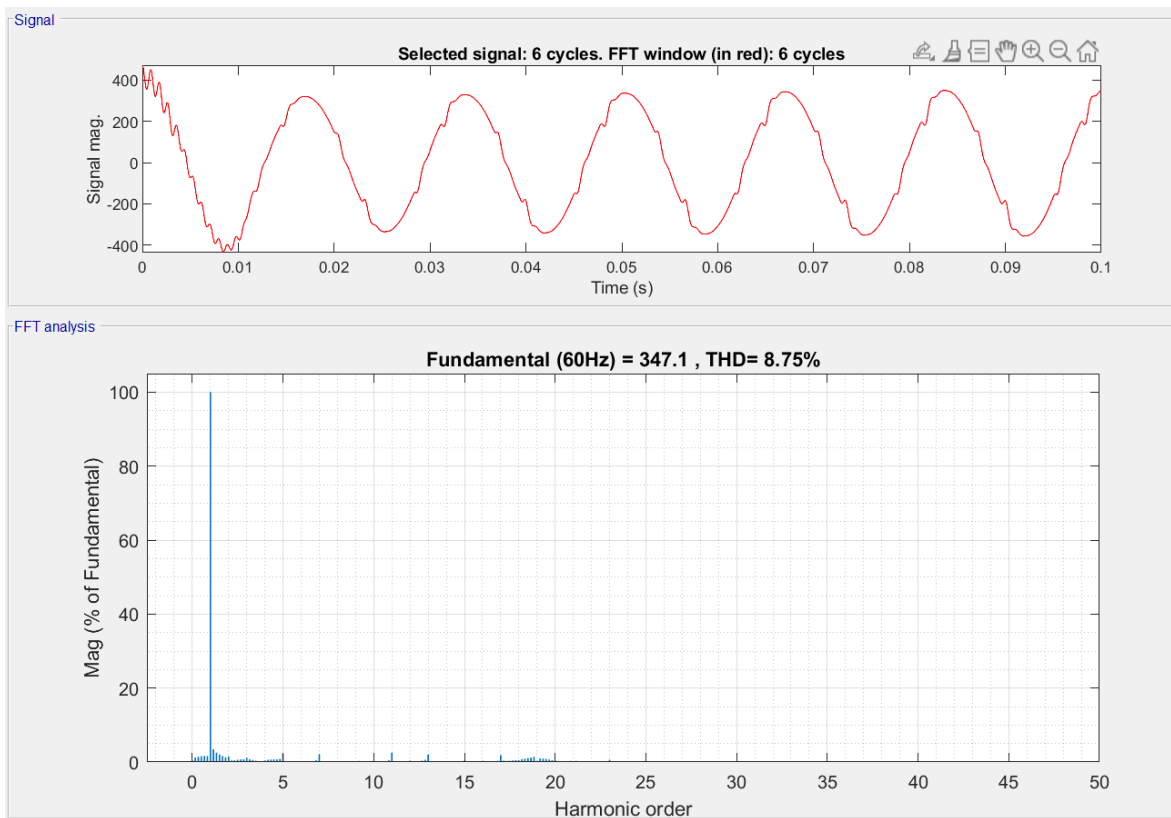


Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

7.3.2 Parámetros sistema eólico

En la Figura 30 se observa el análisis de la transformada rápida de Fourier del voltaje de la fase A del sistema eólico, en la parte superior se observa la señal y el número de ciclos que se está teniendo en cuenta para el análisis que son 6 ciclos, además se puede observar como en el primer ciclo la forma de onda es distorsionada si embargo en los demás ciclos a pesar de no ser tan distorsionada se observan muescas que permanecen en el tiempo y esto es debido directamente a las cargas no lineales, en la parte inferior se plasma un diagrama de barras en el que se observan los armónicos que componen la señal, de este voltaje se puede analizar que no existe armónicos con magnitudes considerables sin embargo si hay aumento en la presencia de estos y que el total de distorsión armónica no aumento a casi un 9%.

Figura 31. FTT voltajes sistema eólico con cargas no lineales.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la tabla 16 se puede analizar que existe un aumento en el porcentaje de armónicos con magnitudes no considerables sin embargo se puede resaltar que ya no existe una alta presencia del armónico 19 y de mayor porcentaje es el de orden 11.

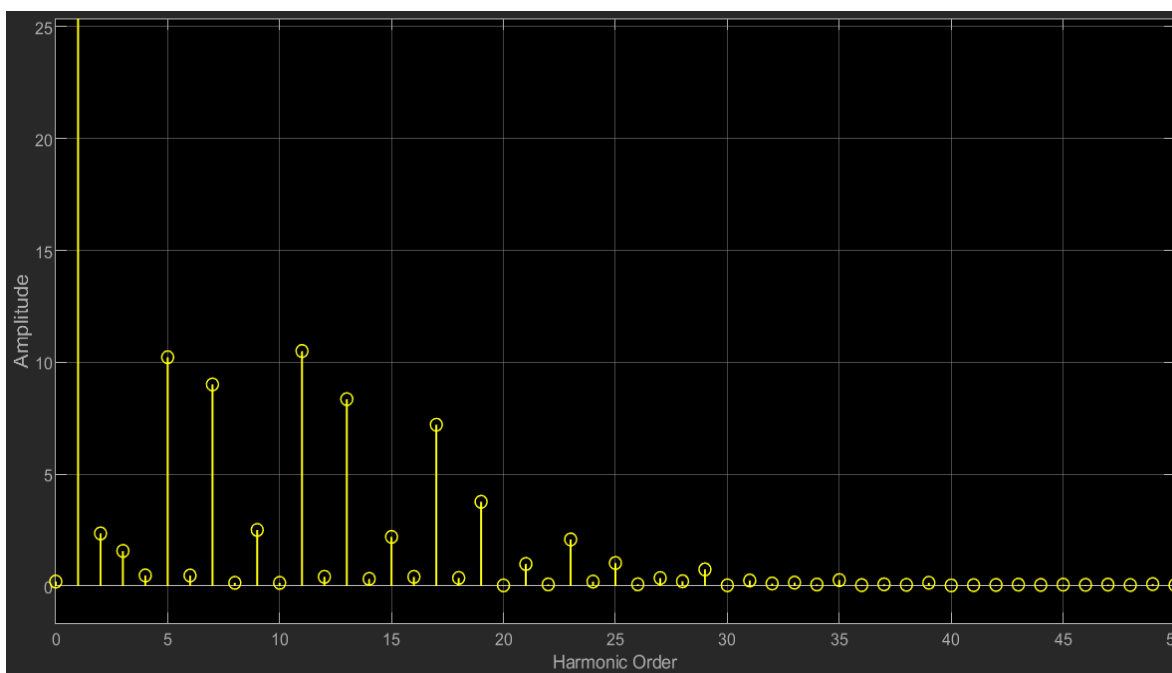
Tabla 16. Porcentaje de armónicos en voltajes del S. eólico con cargas no lineales.

ARMONICO	% DE LA FUNDAMENTAL
0	0.52
2	1.54
3	1.19
5	2.23
7	2.10
9	0.23
11	2.57
17	1.85
Con mayor magnitud (11)	2.57

Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En el sistema eólico a raíz de la conexión de las cargas no lineales se observa en la gráfica 32 como aumenta la presencia de diferentes armónicos y con magnitudes que rodean los 9V

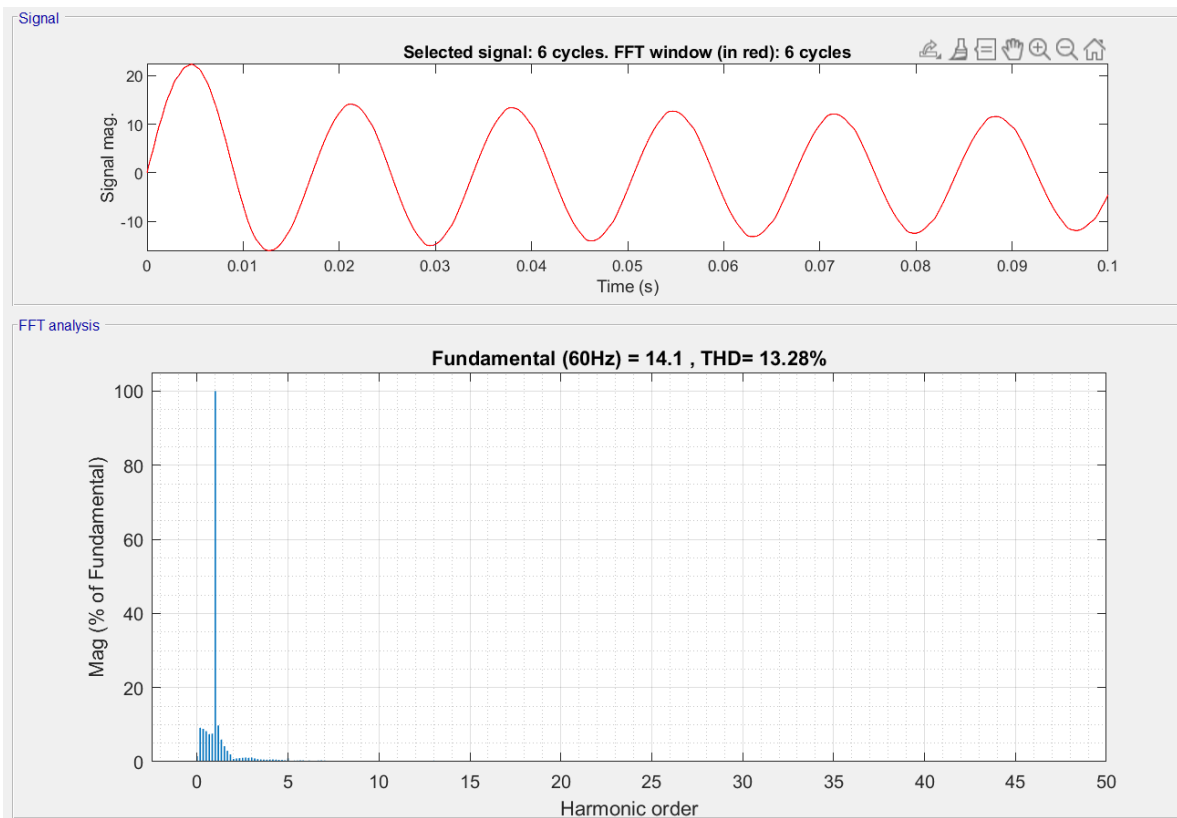
Gráfica 32. Espectro de magnitud del voltaje del sistema eólico con cargas no lineales.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Figura 31 se muestra el análisis de la transformada rápida de Fourier para el caso de las corrientes de salida del generador eólico, en la parte superior se observa que se analizan los primeros 6 ciclos de los cuales se observa que el arranque de la maquina eleva el valor pico de la corriente en los primeros ciclos, no se observan deformaciones grandes en la forma de onda, en cuanto a la presencia de armónicos representado en la parte inferior de la figura se alcanza a resaltar la presencia del armónico cero y se tiene un THD de casi el 13.5% y se observa una presencia de armónicos no múltiplos de la fundamental.

Figura 32. FTT Corrientes sistema eólico con cargas no lineales.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

De la tabla 17 se puede observar que el mayor resalto de armónicos en el sistema corresponde al armónico cero u offset de CD el cual desplazara la onda de corriente.

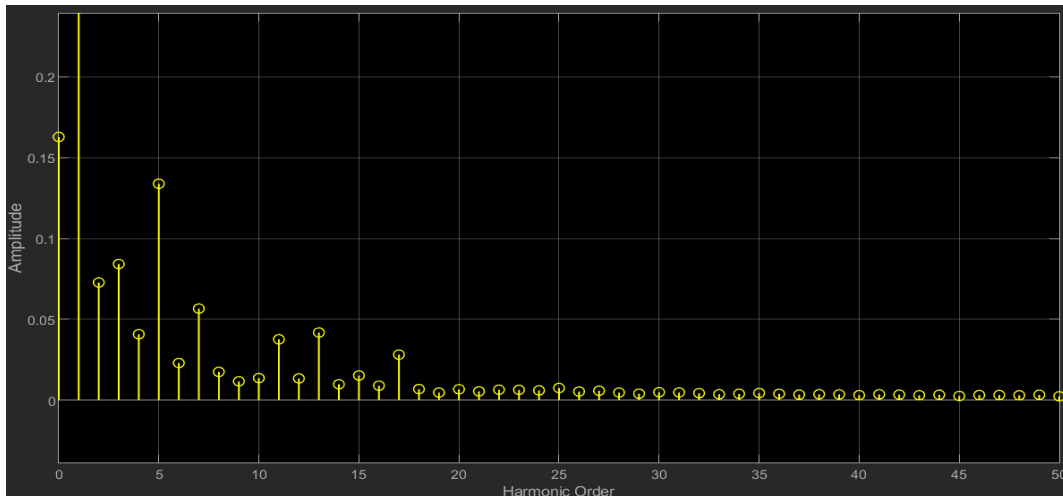
Tabla 17. Porcentaje de armónicos en corrientes del S. eólico con cargas no lineales.

ARMONICO	% DE LA FUNDAMENTAL
0	1.44
2	0.78
3	1.11
5	0.91
7	0.30
9	0.16
11	0.20
17	0.21
Con mayor magnitud (0)	1.44

Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la corriente del sistema eólico se observa en la gráfica 33 como a causa de las cargas no lineales el armónico con mayor presencia es el armónico 0, sin embargo, también aumento la presencia de armónicos sin magnitudes considerables.

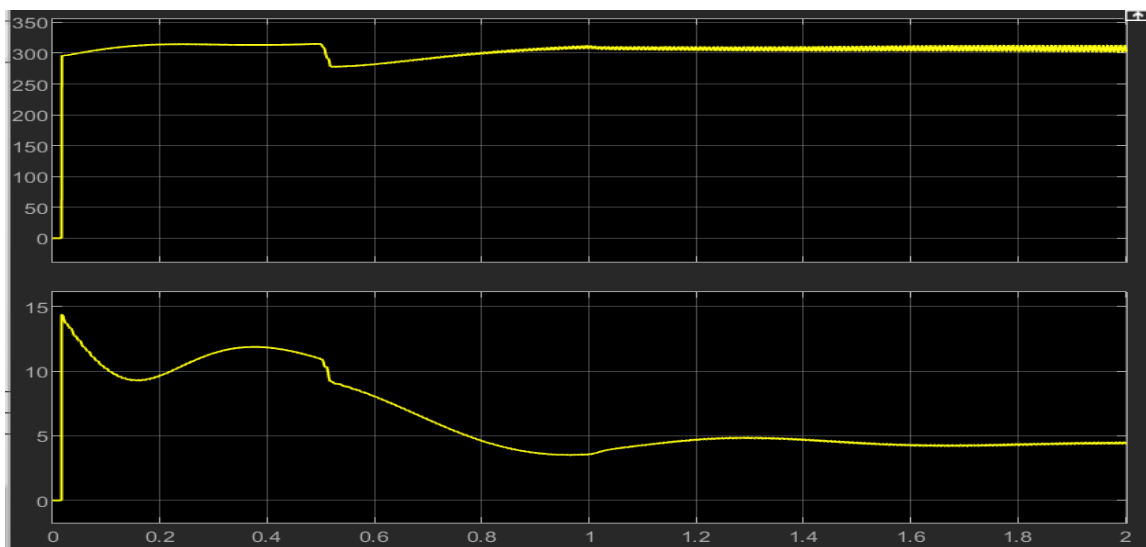
Gráfica 33. Espectro de magnitud de la corriente del sistema eólico con cargas no lineales.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Gráfica 34 se observan los valores RMS de salida del sistema de generación eólico existen dos conmutaciones importantes en el sistema explicados en sistema anterior para este caso el voltaje mostrado en la parte superior de la gráfica se alcanza a percibir la conexión del generador a la micro red y en el momento de la conexión de las cargas no lineales no presenta mayor variación, se mantiene constante aproximándose a su valor nominal, para la corriente se observa cómo hay una disminución considerable al momento de conexión a la red y una vez conectadas las cargas no se evidencia mayores cambios en su magnitud

Gráfica 34. Valores RMS de voltajes y corrientes del sistema eólico con cargas no lineales

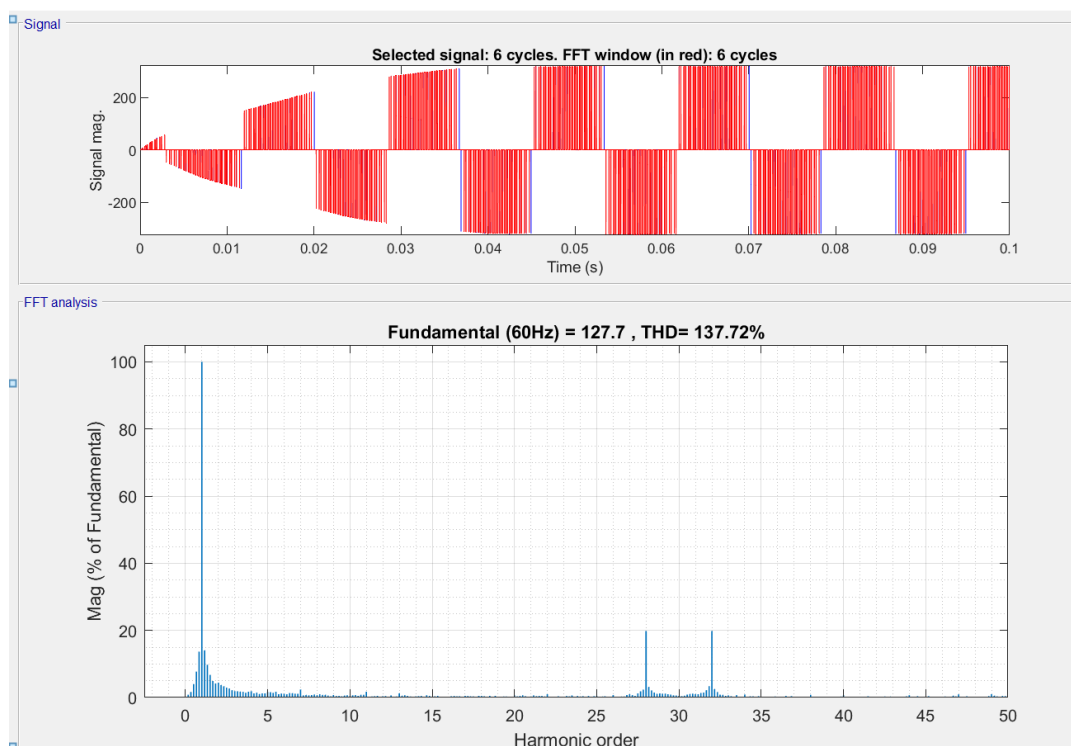


Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

7.3.3 Parámetros sistema fotovoltaico

En la Figura 32 se observa el análisis de la transformada rápida de Fourier del voltaje de la fase A del sistema fotovoltaico, en la parte superior se observa la señal y el número de ciclos que se está teniendo en cuenta para el análisis que son 6 ciclos, respecto a este señal no se observan cambios notorios en su forma, en la parte inferior se plasma un diagrama de barras en el que se observan los armónicos que componen la señal, de este voltaje se puede analizar que de los tres sistemas este tiene la mayor cantidad de armónicos y que posee un THD alto con casi el 138%, se observa la presencia de dos armónicos con porcentajes altos cuyo número se encuentra en la tabla 18.

Figura 33. FTT Voltajes sistema fotovoltaico con cargas no lineales.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

De la tabla 18 se pueden resaltar que existen dos armónicos el 28 y 32 con porcentajes elevados de casi el 20%.

Tabla 18. Porcentaje de armónicos en voltajes del S. fotovoltaico con cargas no lineales.

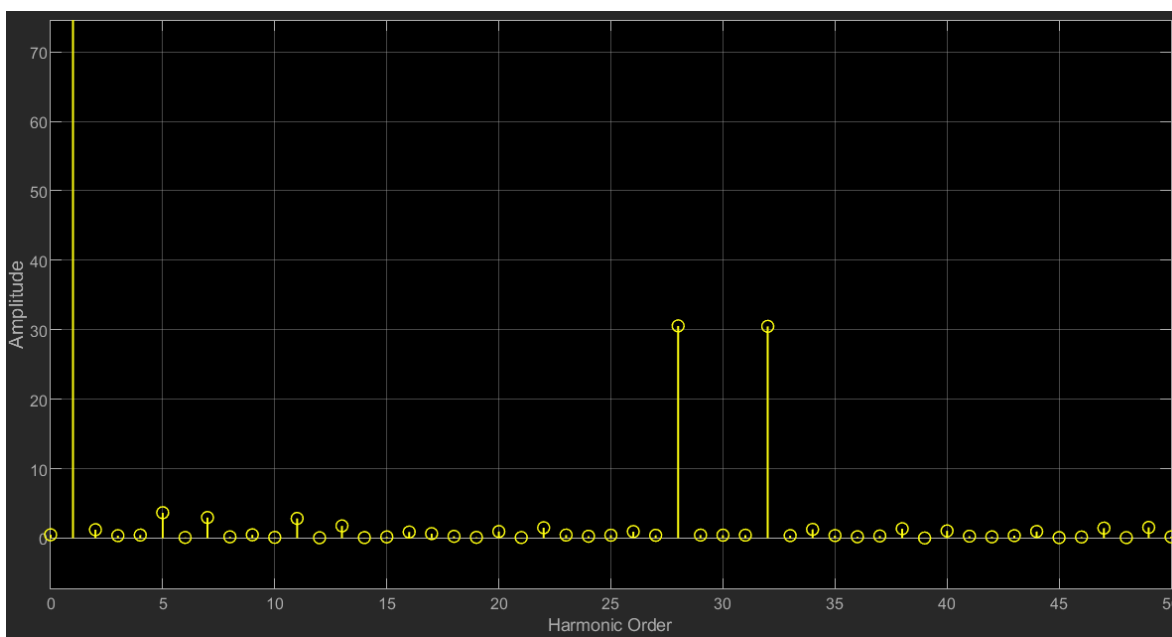
ARMONICO	% DE LA FUNDAMENTAL
0	0.17
2	4.45

3	1.89
5	1.66
7	2.37
9	0.75
28	19.79
32	19.82
Con mayor magnitud (32)	19.82

Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la gráfica 35 se observa el espectro de magnitud del voltaje del sistema después de la conexión de las cargas no lineales, en este sigue existiendo una presencia alta del armónico 28 y 32, sin embargo, estos han disminuido su magnitud.

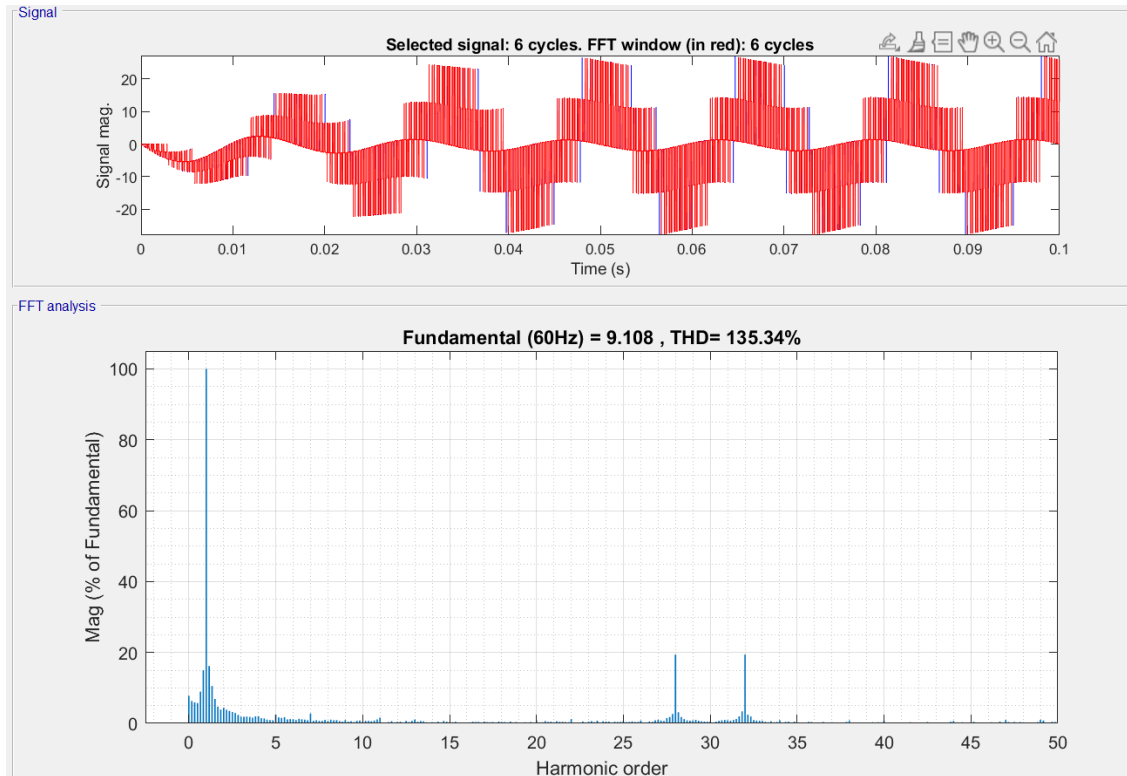
Gráfica 35. Espectro de magnitud del voltaje del sistema fotovoltaico con cargas no lineales.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Figura 33 se muestra el análisis de la transformada rápida de Fourier para el caso de las corrientes de salida del sistema fotovoltaico, en la parte superior se observa que se analizan 6 ciclos de la señal esta debido a la presencia de las cargas no lineales se ve como se afecta la forma de onda, en cuanto al porcentaje de armónicos se ve nuevamente la presencia de dos armónicos que resalta y el THD ha aumentado a casi el 135.5%

Figura 34. FTT Corrientes sistema fotovoltaico con cargas no lineales.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

De la tabla 19 se puede resaltar que nuevamente los armónicos con mayor porcentaje de presencia en la señal son el 28 y 32 y para el caso de los de menor orden hubo un aumento significativo en el armónico 0.

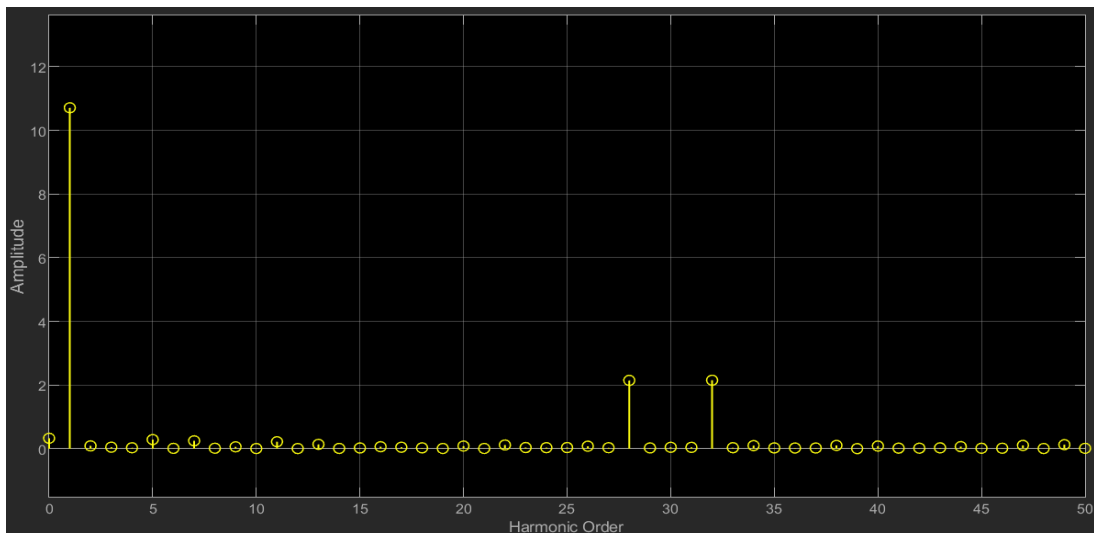
Tabla 19. Porcentaje de armónicos en corrientes del S. fotovoltaico con cargas no lineales.

ARMONICO	% DE LA FUNDAMENTAL
0	7.77
2	4.39
3	1.87
5	2.48
7	2.78
9	0.92
28	19.36
32	19.39
Con mayor magnitud (32)	19.39

Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

El espectro de magnitud de la gráfica 36 hace referencia a la corriente del sistema fotovoltaico igual que ocurre en el voltaje resaltan los armónicos 28 y 32 que de igual forma han reducido su magnitud.

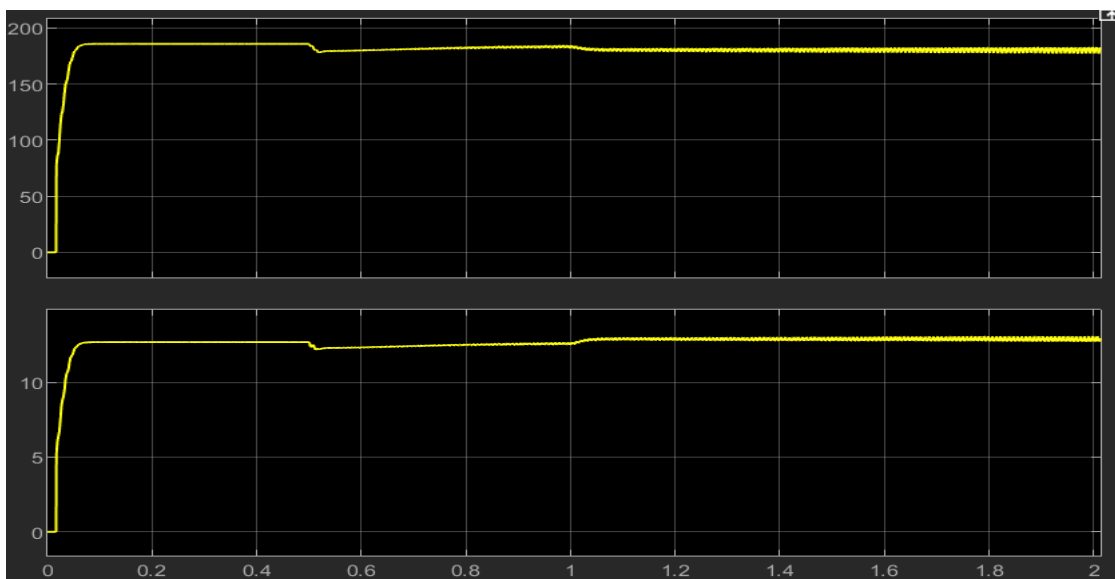
Gráfica 36. Espectro de magnitud de la corriente del sistema fotovoltaico con cargas no lineales.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

Los valores RMS de voltajes y corrientes del sistema fotovoltaico se muestran en la Gráfica 37 de los tres sistemas es el que menos variación en estos parámetros tiene, se observa el cierre de interruptores que conecta el sistema a la micro red, pero rápidamente empieza a alcanzar valores nominales y que de igual manera sucede al momento de la conexión de las cargas no lineales al sistema.

Gráfica 37. Valores RMS de voltajes y corrientes del sistema eólico con cargas no lineales

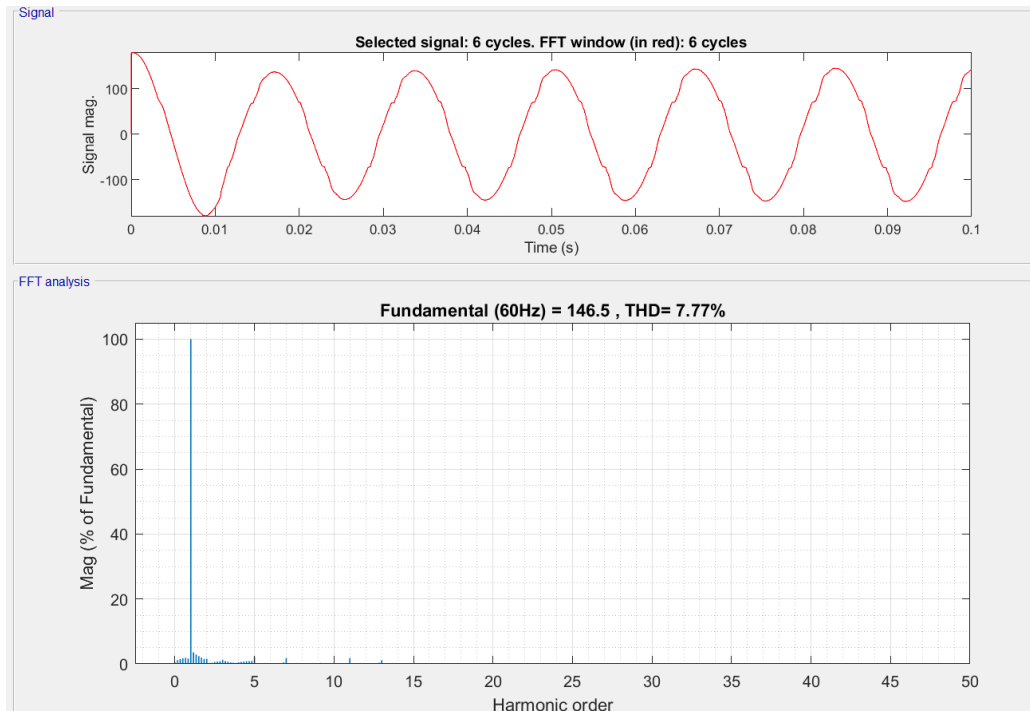


Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

7.3.4 Parámetros del bus de la micro red autónoma.

En la Figura 34 se muestra la transformada rápida de Fourier del voltaje en el bus de la micro red en la parte superior se observa la forma de onda que debido a la presencia de cargas no lineales existe deformación en la forma de onda que es periódica, en cuanto al porcentaje de presencia de armónicos no se observan grandes presencias y se tiene un THD de 7.77%.

Figura 35. FTT Voltajes del sistema de la micro red autónoma.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la tabla 20 se puede analizar que no existen armónicos en el voltaje con magnitudes considerables, el armónico con mayor presencia es el de orden 5.

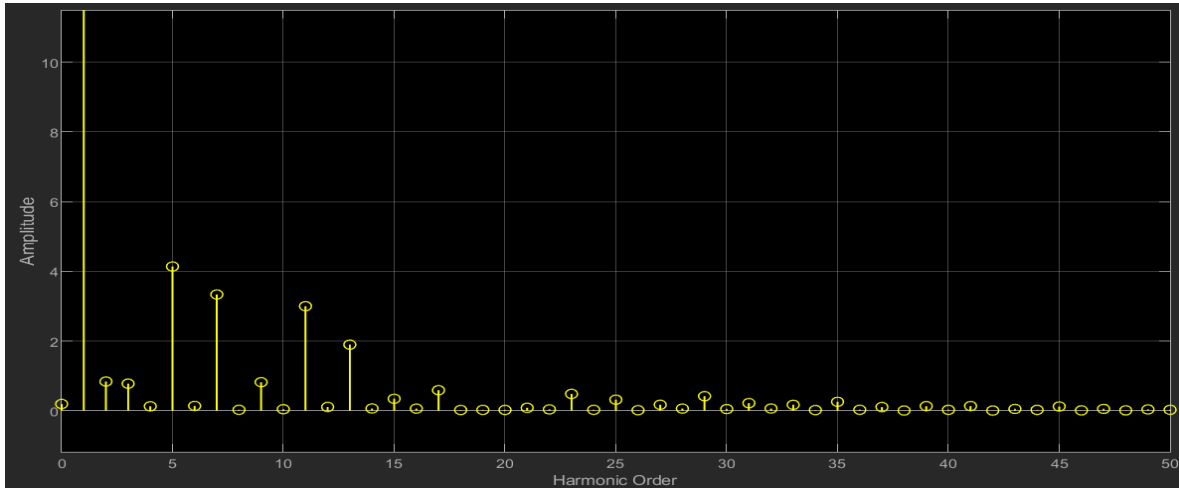
Tabla 20. Porcentaje de armónicos en voltajes del bus de la micro red autónoma con cargas no lineales.

ARMONICO	% DE LA FUNDAMENTAL
0	0.56
2	1.57
3	1.30
5	2.14
7	1.79
9	0.18
11	1.80
17	0.26
Con mayor magnitud (5)	2.14

Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En el bus de la micro red autónoma se observa en la gráfica 38 como las magnitudes de varios armónicos aumentan a raíz de las cargas no lineales, sin embargo, para el caso del armónico 0 este tiene una reducción significativa.

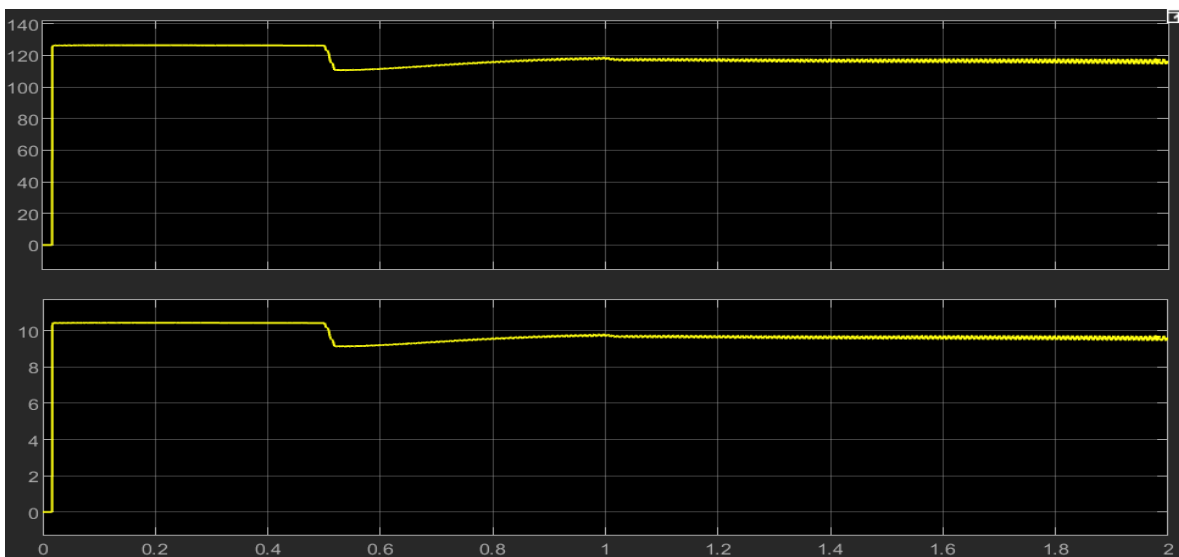
Gráfica 38. Espectro de magnitud del voltaje del sistema de la micro red autónoma.



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

En la Gráfica 39 se tiene el voltaje y la corriente RMS del bus de la micro red, para el caso de la corriente se puede observar que no sufre variaciones importantes, esta corriente es solo una parte del sistema ya que la medida está tomada un nodo determinado, para el caso del voltaje durante los primeros 0.5 segundos muestran el voltaje que pertenece a la micro central hidroeléctrica después de este tiempo se observa un cambio abrupto en el voltaje de casi 20 V y posterior se empieza a compensar este voltaje hasta el cierre de interruptores de las cargas no lineales en este momento el voltaje vuelve a disminuir y se observa que el voltaje empieza a oscilar en aproximadamente 2 V.

Gráfica 39. Valor RMS de voltajes del sistema eólico con cargas no lineales



Fuente: Autor, extraído de simulación de la micro red autónoma.

8 IMPACTO DEL TRABAJO

Las micro redes autónomas tienen un papel importante para la globalización en el uso de la energía eléctrica y debido al constante avance tecnológico y el uso progresivo de cada vez más dispositivos electrónicos, a partir de este trabajo se puede dar una mirada con respecto a la simulación de generadores distribuidos y su conexión entre sistemas generación para conformar una micro red autónoma capaz de suplir energía en lugar no interconectados a un sistema de potencia, a demás da un punto de vista de como el uso de las cargas no lineales pueden afectar los parámetros de voltajes y corrientes en los sistemas y se da un análisis del contenido armónico sin y con la presencia de dichas cargas no lineales.

A partir de este trabajo y de una correcta simulación se puede realizar el diseño de una micro red autónoma para un conjunto de cargas que pueden ser tanto residenciales como comerciales o industriales que por razones ya mencionadas no se puedan conectar al sistema de transmisión nacional y se podrá observar el porcentaje de cargas no lineales que soportara la micro red autónoma sin que haya un desequilibrio significativo en el sistema, además de poder observar cómo se comporta el flujo de potencia a medida que se conectan los diferentes sistemas de generación y las diferentes cargas tanto lineales como no lineales. .

9 CONCLUSIONES

- ✓ Por medio de la generación con una maquina síncrona como se demostró en este trabajo en la utilización de una micro hidroeléctrica se puede tener como referencia para la sincronización de los sistemas de generación que se estén utilizando en la micro red sin la necesidad de conectar el sistema a una red de distribución local.
- ✓ Los sistemas de generación utilizados en este trabajo (hidroeléctrica, eólico, fotovoltaico) son estableces cuando se encuentran funcionando en solitario, sin embargo, al funcionar todos en una unidad se pudo demostrar que se debe tener cuidado con el flujo de potencia pues algunos sistemas pasan de funcionar como generadores a estar conectados como cargas que desestabilizan el sistema.
- ✓ Los sistemas fotovoltaicos que se quieren conectar a una micro red autónoma y que no poseen control para la entrega de potencia en su carga se les debe conectar cargas lo suficientemente grandes para que el flujo de potencia circule en dirección a la carga y no se comience a pedir potencia de los demás sistemas de generación.
- ✓ La conexión de cargas no lineales en un sistema de micro red autónoma afecta directamente las señales de voltaje y corrientes de todo el sistema, como se demostró en los sistemas de generación dichas cargas afectan la forma de onda de las señales además de aumentar la presencia de armónicos y de Inter armónicos.
- ✓ Se pudo demostrar cómo después de la conexión de cargas no lineales en la red no existen sobretensiones ni caídas de tensión significativas, sin embargo, dichas señales empiezan oscilar sobre sus valores nominales y se pueden llegar a grandes fluctuaciones de voltaje si no se corrige a tiempo.
- ✓ Un sistema de energía eléctrica que no esté conectado a un sistema de potencia puede tolerar el uso de dispositivos con electrónica en su etapa de entrada siempre y cuando dicha carga no sea de mayor relevancia para el sistema.

10 RECOMENDACIONES

- ✓ Se debe promover la implementación de micro redes autónomas como alternativa a la sobrecarga que están teniendo las grandes redes de distribución y transmisión, así como son una alternativa recomendable para zonas de difícil acceso con las rede tradicionales.
- ✓ Para una óptima simulación de sistemas fotovoltaicos conectados a la red se debe tener en cuenta el tipo de convertidor utilizado esto con el fin al momento de realizar la conexión al sistema no conectarse como una carga y empezar a consumir potencia.
- ✓ De este trabajo se puede seguir investigando los métodos por los cuales se pueden minimizar los efectos de las cargas no lineales y a su vez poder implementar la cantidad de estas cargas sin tener consecuencias drásticas para el sistema.

REFERENCIA

- [1] J. T. Montecelos, Desarrollo de redes eléctricas y centros de transformación, Madrid: Ediciones Paraninfo. SA, 2014.
- [2] a. t. franco, «las pérdidas de energía eléctrica,» *revista crieel*, nº 33, p. 1, 2018.
- [3] G. Enríquez Harper, Los conceptos Básicos de la generación, transmisión, transformación y distribución de la energía eléctrica, Mexico: Editorial Limusa S.A, 2014.
- [4] J. D. J. Cervantes, Sistemas de distribución de energía eléctrica, Mexico D.F: Sans Serif, 1995.
- [5] D. V. C. L. T. Javier A. Guacaneme, «Revisión de las Características de Sistemas de Almacenamiento de Energía para Aplicaciones en Micro Redes,» *Información Tecnológica*, vol. 25, nº 2, p. 2, 2014.
- [6] G. R. J. Méndez, programación de recursos para una óptima respuesta a la demanda por la penetración de energía renovable en micro-redes, quito: universidad politécnica salesiana, 2018.
- [7] J. A. M. Rodríguez, Operación y control de micro-redes operando en modo aislado, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira , 2015.
- [8] S. M. P. Londoño, A. G. Ruíz, M. B. López y J. J. M. Flórez, Modelizado de componentes en micro-redes AC, vol. 7, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira , 2020, pp. 42-55.
- [9] C. F. Bordón, L. Schenberger, F. Berterame, C. M. Chezzi y J. J. Penco, «Estrategia para la Gestión de una Micro Red,» *Grupo de Investigación en Modelado, Simulación y Control*, pp. 1-3, 2018.
- [10] M. L. O. Gutiérrez, E. L. Rivera, A. G. Ruiz, H. Castro, G. Serrate, D. Sánchez y J. C. Serna, Control en Microrredes de A.C: Control Jerárquico, Tecnologías y Normativa, cigre Colombia, 2020.
- [11] Q. S. R. H. M. N. T. D. J. S. F. D. M. F. F. B. J. M. H. B. Yousef Khayat, «On the Secondary Control Architectures of AC Microgrids: An Overview,» *Ieee Transactions on Power Electronics*, vol. 35, nº 6, 2020.
- [12] R. D. Alejandro, Tertiary control in microgrids: an optimal power flow approach based on convex optimization and Wirtinger calculus, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2020.
- [13] A. L. F. B. a. P. R. J. Rocabert, «Control of Power Converters in AC Microgrids,» *Ieee Trans. Power Syst*, vol. 27, nº 11, p. 4734–4749, 2011.

- [14] N. Hatziaargyriou, *Microgrids: Architectures and Control*, United Kingdom: John Wiley & Sons,, 2014.
- [15] N. M. a. T. M. Undeland, *ower Electronics: Converters, Applications, and Design.*, John Wiley & Sons, 2007.
- [16] A. E. J. S.-G. Y. K. E. M. J. S. D. D. P. Pourbeik, «Generic Stability Models for Type 3 & 4 Wind Turbine Generators for Wecc,» *Power Ener. Societ. Gen. Meet*, pp. 1-5, 2013.
- [17] D. T. Treballe, *La generación distribuida en España*, Madrid: Universidad Pontificia Comillas, 2006.
- [18] L. F. Grisales, B. J. R. Cuestas y F. E. Jaramillo, «Ubicación y dimensionamiento de generación distribuida: una revisión,» *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, nº 2, pp. 157-176, 2017.
- [19] C. D. R. D. E. Y. Gas, *resolución No. 174*, 07 OCT. 2021.
- [20] B. Viani, *Microcentrales Hidroeléctricas Una introducción al trabajo de campo*, Lima: ITDG-Peru, 1995.
- [21] F. E. S. Vargas, A. S. Alarcón y C. G. Fajardo, «Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica.,» *Informador Técnico*, vol. 75, pp. 73-85, 2011.
- [22] O. P. Lamigueiro, *Energía Solar Fotovoltaica*, España: Creative Commons, 2020.
- [23] G. F. Velasco y E. Cabrera, «Generación solar fotovoltaica dentro del esquema de generación distribuida para la provincia de Imbabura,» *Escuela Politécnica del Ejército*.
- [24] L. Jtglar, *Generación de energía aolar fotovoltaica*, Barcelona: Marcombo, 2012.
- [25] B. H. Vergara, *Pago por potencia firme a centrales de generación eólica*, Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2006.
- [26] M. M. Galindo, *diseño de un aerogenerador que permita generar energia electrica en el colegio ofelia uribe de acosta comunidad de yomasa*, Bogota: Universidad Católica de Colombia, 2016.
- [27] S. Q. Ruggero Ríos B, «Incidencias de Cargas No Lineales en Transformadores de Distribución,» *Revista Científica de la Ucsa*, vol. 1, nº 1, pp. 33-51, 2014.
- [28] J. C. Herrera, *Determinación de la potencia de transformadores para alimentar cargas no lineales*, Escuela Politécnica Nacional, 1997.
- [29] I. & M. L. & C. S. & B. N. & G. M. Romero, *Introducción a la Generación Distribuida de Energías Renovables*, Buenos Aires: Secretaría de Gobierno de Energía, 2019.

- [30] R. D. Medina, «Microrredes basadas en Electrónica de Potencia: Características, Operación y Estabilidad,» *Ingenius* , nº 12, pp. 15-23, 2014.
- [31] M. & Simulink, «MathWorks,» [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. [Último acceso: 25 Mayo 2022].