

**Evaluación de la calidad de potencia en microrredes para zonas no
interconectadas**



Trabajo de Grado
Modalidad: Trabajo de Investigación

Paula Vidal Godoy
104712020383
Edna Rossana Navia González
104713020656

Director: Dr. Maximiliano Bueno López

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica Instrumentación y Control
Linea de Investigación de Sistemas de Energía
Popayán, Marzo de 2023

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Planteamiento del Problema	4
1.2. Estado del arte	7
1.2.1. Inclusión de energías renovables en los sistemas de potencia . . .	7
1.2.2. Evaluación de la calidad de potencia	10
1.2.3. Análisis de señales para la evaluación de calidad de potencia . .	12
1.3. Contribución	16
1.4. Objetivos	16
1.5. Objetivo General	16
1.6. Objetivos Específicos	16
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1. Calidad de Potencia	17
2.2. Zonas No Interconectadas	19
2.3. Pobreza Energética	20
2.4. Microrred	21
2.5. Transición Energética	23
3. SISTEMA DE PRUEBAS	26
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
4.1. Transformada Rápida de Fourier (FFT)	33
4.2. Transformada de Hilbert-Huang (HHT)	34
4.3. Transformada de Hilbert (HT)	34
4.4. Frecuencia Instantánea (IF)	35
4.5. Espectro de Hilbert (HS)	35
4.6. Gráficas Obtenidas del Sistema de Pruebas	36
5. CONCLUSIONES	64
6. REFERENCIAS	66
7. ANEXOS	71
7.1. ANEXO A Importación de datos de PSIM a MATLAB	71
7.2. ANEXO B Códigos	77
7.3. ANEXO C Interfaz Gráfica de Usuario GUI	79

Índice de figuras

1.	Circuito de Pruebas	28
2.	Radiación Solar en Colombia	30
3.	Radiación Solar en Resguardo Indígena	31
4.	Temperatura en Colombia	32
5.	Temperatura de la zona seleccionada	32
6.	Potencia de Salida del Arreglo Fotovoltaico (P_g)	37
7.	Potencia de Salida del Sistema (P_{out})	38
8.	Corriente en la Batería (I_{cb})	39
9.	Corriente de Salida (I_o)	40
10.	Voltaje de Salida (V_o)	41
11.	Voltaje en la Batería (V_b)	42
12.	Voltaje en el arreglo fotovoltaico (V_g)	43
13.	Descomposición en 3 IMFs de I_o	44
14.	Descomposición en IMFs de I_o	45
15.	Descomposición en IMFs de I_o	46
16.	Frecuencia Instantánea de I_o	47
17.	Transformada rápida de Fourier de I_o	48
18.	Descomposición en 3 IMF de V_o	49
19.	Descomposición de las primeras IMF de V_o	50
20.	Descomposición de las ultimas IMF de V_o	51
21.	Frecuencia Instantánea de V_o	52
22.	Transformada Rápida de Fourier de V_o	53
23.	Descomposición en 3 IMF de V_b	54
24.	Descomposición en IMF de V_b	55
25.	Descomposición en IMF de V_b	56
26.	Frecuencia Instantánea de V_b	57
27.	Transformada Rápida de Fourier de V_b	58
28.	Descomposición en 3 IMF de V_g	59
29.	Descomposición en IMF de V_g	60
30.	Descomposición en IMF de V_g	61
31.	Frecuencia Instantánea de V_g	62
32.	Transformada Rápida de Fourier de V_g	63

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

Los sistemas de potencia modernos han involucrado diferentes elementos de naturaleza no lineal, entre estas las fuentes de generación basadas en energías renovables no convencionales, las cuales originan variaciones en la frecuencia de operación. Este tipo de generación presenta retos importantes debido a que el recurso primario (sol, viento o cualquier otro recurso renovable) es variante y ocasiona oscilaciones que pueden afectar la correcta operación del sistema. Debido a lo anterior uno de los principales enfoques de las investigaciones en esta área es la mitigación y el diseño de sistemas más robustos que sean mínimamente sensibles a estos problemas.

Según [1], descentralizar la generación de energía ha dado grandes respuestas al reto de la aparición de no linealidades en los sistemas de potencia modernos; gracias a esto el concepto de generación distribuida (GD) ha tomado mayor relevancia, y esto también contribuye a mitigar las pérdidas que se puedan presentar en la red, asegura [2]; además menciona que los beneficios de la GD, son básicamente la generación de energía eléctrica sostenible, ahorro financiero, edificaciones auto sostenibles, mayor consciencia sobre el calentamiento global y menciona la ventaja de generar energía cerca del lugar de consumo; lo anterior la convierten en una opción atractiva para las empresas de distribución, los planificadores/operadores de sistemas eléctricos, los responsables de la política energética y los reguladores.

Algunos de los problemas que afectan la calidad de la red, se pueden corregir a partir de la GD; en [2] se menciona un análisis a una microrred ubicada en una zona rural de Portugal, que presenta distorsiones armónicas y variaciones en los niveles de voltaje, para lo cual se han realizado muchos esfuerzos buscando extender el uso de una microrred desde varios puntos de vista como: minimización de la pérdida de energía, gestión de recursos energéticos distribuidos, problemas de control y protección, control de frecuencia, voltaje y estabilización de una microrred durante la operación en modo isla, diseño de estrategias de control avanzadas para microrredes inteligentes y planificación de energía reactiva. En [3] se define la microrred como un grupo de cargas, fuentes de energía y dispositivos de almacenamiento de energía a niveles de baja tensión; que se puede operar como una sola carga controlable o una unidad generadora que entrega calor y energía a un área designada; los modos de funcionamiento de las microrredes se pueden clasificar en modo aislado o conexión a la red eléctrica, sus ventajas son: alta capacidad de control y flexibilidad en términos de confiabilidad y calidad de energía del sistema, instalación flexible y el control de la potencia activa y reactiva, además por separado proporciona electricidad de forma económica a cargas críticas dentro de la misma mediante la integración y optimización de varias fuentes de energía; es importante resaltar que pueden funcionar con dispositivos pequeños que usan recursos renovables, eso las hace muy útiles en zonas no interconectadas (ZNI) donde, por lo general el territorio no se presta para grandes construcciones, pero la electricidad es vital para cumplir con las necesidades de los habitantes de la zona [4]. Normalmente,

la infraestructura energética de una microrred puede tener una penetración de energía limpia incluso hasta el nivel del consumidor para mantener un rendimiento sostenible; en circunstancias críticas o situaciones de emergencia cuando la red principal no puede satisfacer la demanda debido a fallas o inestabilidades catastróficas. Una microrred puede utilizar sistemas limpios y convencionales para la generación de energía continua y confiable, durante el período de funcionamiento normal, estos sistemas pueden tener el respaldo de la red principal y de esta manera tener un rendimiento eficiente, además se puede hablar de que las microrredes permiten independizar la generación de energía de las redes primarias por lo que son un aliado importante para las ZNI. Se espera que las microrredes inteligentes, empiecen a funcionar de manera óptima y automática, es decir programadas para funcionar cuando sean necesarias sin intervención externa, aprovechando los avances que ha tenido esta tecnología, optimizando así la generación y el consumo de energía.

Las microrredes deben ser capaces de entregar un servicio de calidad al usuario sin que este se vea afectado por la variación del recurso primario y naturaleza de las cargas. La eficiencia de la microrred se basa en un sistema de almacenamiento funcional, de esta forma podrá cumplir con la demanda de energía eléctrica de manera confiable, así, en el momento de experimentar algún tipo de pérdida o falla en la red podrá contrarrestar esta acción desconectándose de la red, operando óptimamente de manera aislada hasta que cualquier deficiencia sea corregida [5]. Las microrredes tienen la capacidad de ser instaladas y adaptadas a diferentes tipos de localidades, solo se requiere un estudio previo para identificar las fuentes que pueden ser utilizadas, por lo general se usa en una zona que no se encuentre conectada a una red eléctrica cercana o bien, que al tener algún tipo de conexión a la red y no sea estable se desconectara por su funcionamiento de forma aislada aprovechando los diferentes tipos de fuentes locales de energía renovable, disminuyendo el costo del servicio de la red. Se pueden instalar cierta cantidad de dispositivos de generación como: fotovoltaicos, mini-eólicos, mini-hidráulicos, además de funciones híbridas donde se use dos o más de estas fuentes de energía renovable, por ejemplo, un mecanismo híbrido entre solar y eólico, el uso más adecuado se puede determinar según las características del lugar como las condiciones climáticas y la geografía [6].

Las microrredes brindan gran cantidad de beneficios para la generación de energía eléctrica; sin embargo las que se basan en fuentes renovables presentan desafíos de inestabilidad, el objetivo de utilizarlas es generar energía confiable, asequible, sostenible y amigable con el medio ambiente, además de garantizar buena calidad de energía; por lo cual se requiere óptimo nivel de alimentación de la instalación para soportar y garantizar un buen funcionamiento de sus cargas [7]. Algunos de los problemas que pueden afectar el correcto funcionamiento son:

- **Sobretensión o Sobrecorriente:** es un aumento repentino y muy breve del voltaje o la corriente eléctrica, es un fenómeno de corta duración pero las consecuencias para los dispositivos conectados a la red eléctrica van desde el envejecimiento anticipado de sus componentes hasta la destrucción total de los mismos. Se identifica la distorsión armónica que corresponde a la tensión de alimentación o formas

de onda de corriente de forma no sinusoidal, la forma de onda corresponde a la suma de diferentes ondas sinusoidales con diferente magnitud y fase, es decir, la distorsión armónica se debe a diferentes tipos de cargas no lineales, según [8].

- Pico de voltaje: es un aumento muy rápido de voltaje (voltaje máximo en el rango de millas) con una duración desde varios microsegundos hasta unos pocos milisegundos, se debe a descargas atmosféricas, conmutación de condensadores y desconexión de grandes cargas. Existe una condición en la que el voltaje en los terminales de suministro es cercano a cero, significa menos del 10 % de su tensión nominal entiéndase como el valor diferencial de la potencia que se presenta en un aparato o instalación eléctrica, Los picos pueden ser de corta o larga duración, normalmente se inician debido a un disparo o falla de los dispositivos de protección, la medida de diferencias de tensión entre las fases de un sistema trifásico significa que las magnitudes de tres voltajes son diferentes, con lo cual degrada el rendimiento y reduce la vida útil de los motores trifásicos.
- Distorsiones: hay varias causas o fuentes de ruido en el sistema de energía como interferencias electromagnéticas, radiaciones debidas a máquinas de soldar y hornos, entre otros; generalmente el ruido no es destructivo, pero puede causar errores de procesamiento de datos y perturbaciones en equipos sensibles; La naturaleza aleatoria de los diferentes recursos renovables genera energía eléctrica fluctuante, cuando se inyecta a la red eléctrica conduce a la variación del voltaje del terminal debido a la impedancia del sistema, esta perturbación de energía se propaga a los sistemas de energía y puede producir un fenómeno conocido como parpadeo, que consiste en fluctuaciones en el nivel de iluminación causadas por variaciones de voltaje [9].
- Variación de frecuencia: la frecuencia de suministro es uno de los parámetros más críticos del sistema eléctrico, las compañías prestadoras del servicio deben garantizar al usuario final un valor de frecuencia adecuado y en caso de no hacerlo pueden recibir sanciones.
- Factor de potencia: se define como la relación entre la potencia media y la potencia aparente, controlarlo es una de las partes más desafiantes del sistema de energía.

El desafío técnico básico proviene de la variabilidad de las energías renovables que afectan a la carga, el equilibrio de generación, la demanda variable de energía reactiva y la estabilidad de voltaje. Se debe resaltar que al tener una mala calidad de la energía se generan sobre costos [10].

En el desarrollo de este trabajo de grado se propondrá una metodología para diagnosticar el estado de una red desde la perspectiva de calidad de potencia. Se involucrará generación distribuida y cargas de diferente naturaleza, se resaltarán la importancia de la calidad de potencia de una microrred para evidenciar la viabilidad de este tipo de sistemas. Para lograr esto se propondrá un sistema de pruebas que responda a las necesidades de una ZNI en Colombia y que opere de manera óptima desde un punto de

vista técnico y económico y de esta manera se pueda mejorar la calidad de vida de aquellas personas que no tienen un servicio de energía eléctrica continuo y de calidad. Con base en lo anteriormente descrito este proyecto de grado responderá la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuales son los principales deficiencias de la calidad de potencia que se presentan en una microrred basada en fuentes no convencionales diseñada para una zona no interconectada?

1.2. Estado del arte

En esta sección se presentarán algunas referencias que se han utilizado para entender el estado actual de la temática a tratar. Se ha realizado una minuciosa revisión de artículos y tesis que han hecho contribuciones en el estudio de calidad de potencia en microrredes.

1.2.1. Inclusión de energías renovables en los sistemas de potencia

Una microrred de energía eléctrica se define como un sistema compuesto por generadores y cargas, capaz de auto abastecerse y funcionar de manera autónoma sin la red de distribución eléctrica. Estos sistemas tienen la posibilidad de tener generación híbrida que está constituida tanto por fuentes convencionales como generación a partir de fuentes renovables. En [6] se proponen varias arquitecturas de red de distribución novedosa dentro del área de las redes inteligentes, mecanismos mediante los cuales las partes interesadas pueden beneficiarse de las instalaciones, además de proporcionar un marco para analizarlas. La estructura del sistema y la topología de control varían según la aplicación, al igual que el análisis de estabilidad en una microrred. Los aspectos de la pequeña señal, transitorios y de estabilidad de voltaje en cada tipo de microrred se discuten en [11] junto con el alcance y métodos de las mejoras de la estabilidad generalizada para diferentes tipos de microrredes en adelante MG (debido a la expresión en inglés Microgrid); la eficacia de los métodos puede variar en gran medida según la aplicación y los escenarios del sistema. En [5] se usan algunas de las técnicas de control para MG eléctricas y hacen especial énfasis en el modo de operación isla de la MG; además la gestión de despacho es una estrategia de control que impacta en la calidad de energía del sistema de la MG asociando el concepto de capacidad de atención (Hosting Capacity), término que se refiere a las restricciones que puede tener el sistema en cuanto a la cargabilidad dada una generación.

La calidad de potencia es uno de los principales problemas de las fuentes de energía renovable, en el caso específico de fuentes de energía solar, se mencionan: Mitigación del voltaje, caída de voltaje, desequilibrio de voltaje, topología para convertidores fotovoltaico y máxima potencia que entrega un panel fotovoltaico (MPPT). Determinar estos factores permite hacer un compilado y trabajar en las soluciones que corrigen las fallas dando como resultado sistemas robustos ante estas perturbaciones, mejorando así la señal generada por las MG. En [10] se diseña un sistema capaz de mitigar estos problemas basado en un control PID para disminuir el comportamiento oscilatorio y desarrollan un algoritmo que mejora el comportamiento del control fuzzy.

Un aspecto importante a tener en cuenta de la energía eléctrica generada con recursos renovables es que existen lugares donde es más necesaria ya que por diversos factores de su ubicación es casi imposible conectarse a la red de energía convencional, se puede decir que las comunidades rurales de los países en desarrollo necesitan formas de energía accesibles, fiables y sostenibles, que son factores esenciales para mejorar las condiciones de vida de los habitantes de estas comunidades. A través de diferentes estudios en otras regiones del mundo, [12] realiza un análisis a los sistemas híbridos de energía renovable (HRES), los cuales ya están diseñados para superar la posible variabilidad de la energía generada por estos recursos, el estudio revela que el éxito de los HRES depende en gran medida de las condiciones locales como:

- Un fuerte compromiso político.
- Apoyo del gobierno a través de políticas claras y transparentes.
- Establecimiento de Agencia de electrificación rural dedicadas (REA) y organizaciones comunitarias en los comités de aldea.
- Participación de comunidades locales capacitadas para operar y mantener los sistemas.
- Recaudación de ingresos alentada por un pago de bonificación para garantizar la sostenibilidad del proyecto.

Los sistemas híbridos más usados en Colombia incluyen energía hidroeléctrica, pero siempre se debe tener en cuenta, según la región, cuál podría ser la solución más rentable pues también se utiliza las energías solar, eólica y biomasa. En [13] se da un ejemplo de una estrategia óptima, es el caso de un sistema híbrido de energía renovable (HRES) que comprende un sistema fotovoltaico (PV), un sistema generador de turbina eólica y un sistema microhidro, este esquema propuesto se ha modelado y simulado en el entorno Matlab / Simulink. Se identifica que, con las fuentes de energía conectadas entre sí, aumenta la confiabilidad del sistema de energía, pues los aspectos de la calidad de la energía aumentan y se mejoran las regulaciones de voltaje y corriente. De esta manera se considera la posibilidad del HRES como un ejemplo efectivo de generación descentralizada de energía.[14] Menciona que con las tecnologías comunes y convencionales, la electricidad se produce, se transmite y luego se consume pero no se puede almacenar; sin embargo, la aparición de tecnologías renovables y especialmente pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) hacen posible almacenar la energía. La producción hidroeléctrica y especialmente los PCH son un componente clave para el desarrollo de tecnologías de energía renovable que pueden almacenar el exceso de energía eléctrica y restaurar el pico vertiendo agua entre dos reservorios a diferentes altitudes.

Existen muchos ejemplos de países que están utilizando recursos renovables para generar energía eléctrica en una zona aislada; por ello [15] menciona el estudio relacionado con el uso de una innovación tecnológica para mejorar la calidad del servicio eléctrico en una comunidad aislada (Ecuador, La comunidad Playa Prieta, poblado rural del cantón Portoviejo), en la cual se utiliza tecnología fotovoltaica conectada a la red de baja tensión de un grupo de 20 viviendas. Se resalta que antes de realizar cualquier

tipo de avance se aplicaron encuestas a los pobladores de la zona con el fin de precisar el nivel de aceptación que pueden tener las tecnologías vinculadas con las fuentes renovables, mediante estas encuestas se buscó definir una aproximación respecto al juicio que poseen los usuarios relacionado con la calidad del servicio eléctrico y la aceptación de una solución derivada del uso de las fuentes renovables. Después de este análisis se determinó que con la generación fotovoltaica se puede cubrir un 40 %, del consumo total de energía en la comunidad y se tiene un rendimiento que es competitivo con cualquier otra tecnología y fuentes de generación existentes, además permite mejorar la calidad del servicio eléctrico, reducir las pérdidas, preservar recursos naturales y disminuir las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Colombia es un país privilegiado por su alta cantidad de recursos naturales, y a pesar de que se evidencia el uso de la energía hidráulica para la generación de electricidad, se ha explotado en mayor cantidad el uso de los hidrocarburos, tanto para la energía eléctrica del país como en exportación de petróleo y sus derivados. Se comprende que el uso de hidrocarburos genera una alta contaminación al medio ambiente, también existen variaciones en el mercado del petróleo que pueden llegar a ser inestables y volátiles.

Según [16] la opción en este tiempo de alta contaminación y riesgo ambiental, es la que se ha visto usada en diferentes países donde se genera tanto beneficios sociales como ambientales basado en energías renovables para la generación de energía eléctrica; para esto el Estado debe realizar la aplicación de un modelo de análisis costo-beneficio, este análisis debe enfocarse en los intereses de la comunidad, cuantificar en términos monetarios los beneficios y los costos para la sociedad, lo más importante es que se debe entrar en la búsqueda de un proceso de des-carbonización económica para poder subsistir y mantener una economía sostenible. Para esto es necesario aumentar la participación de energía eólica, solar y bioenergía (biomasa); realizando los análisis se podría llegar a lograr una reducción aproximada del 20 %, tanto en las emisiones de CO₂ y el consumo total de combustible del país para 2030. La principal fuente de energía renovable es la hidráulica, pero Colombia tiene el alto beneficio de tener muchos recursos renovables (recursos eólicos, solares y de biomasa). Mediante la herramienta Energy-PLAN, [17] ha desarrollado un nuevo modelo para el sistema energético colombiano, su objetivo es el de un estudio donde se analizan los impactos de diferentes fuentes renovables integradas sobre posibles escenarios energéticos futuros, con este modelo se han construido y simulado cinco escenarios diferentes; además, el resultado del análisis técnico de los escenarios evidenció las ventajas de incluir alternativas renovables, en todos los escenarios analizados, la energía hidroeléctrica se mantiene como la principal fuente de energía en el sector eléctrico, pero representa una ventaja importante con las técnicas de la energía eólica y solar.

Es importante resaltar que no se puede des-carbonizar el sistema energético completo. Los formuladores de políticas deben centrarse en estrategias a largo plazo orientadas a reducir su impacto ambiental a través de alternativas de movilidad sostenibles.

1.2.2. Evaluación de la calidad de potencia

De los problemas aún existentes en las MG, la estabilidad, es la que más desafíos presenta, esta problemática se aborda de diferentes maneras dependiendo de varios factores: tipo de MG, topología de control, parámetros de red y tipos de unidades de generación distribuida (UDGs); a partir de lo cual se dice que la estabilidad en las MG no se puede ni se debe estudiar de la misma manera que los sistemas de potencia tradicionales. En [8] se realiza una revisión bibliográfica, clasificando los problemas de estabilidad en pequeña señal, transitoria y de tensión, además incluyen diferentes estrategias para la mejora de dichas problemáticas a partir de diferentes métodos.

Principalmente en los últimos años, la tendencia acentuada de crecimiento de la carga basada en la electrónica de potencia, procesos de control y operación sensibles a las variaciones en las características de la energía electromagnética entregada, ha sido según [9] la causa de muchas de las afirmaciones de una “mejor calidad”. Los problemas de compatibilidad e inmunidad deben abordarse al buscar soluciones viables que involucren a fabricantes, clientes, empresas de servicios públicos y agencias reguladoras; en [4] resaltan que la mayoría de las redes existentes consisten en redes de transmisión y distribución, que no son capaces de manejar la penetración excesiva de energía renovable. Buscando mejorar la confiabilidad se pueden integrar varias fuentes de generación en un área determinada; la mayoría de las complejidades ocurren debido a las interconexiones de diferentes tipos de generadores de energía, línea de transmisión, transformador y la naturaleza variable de la carga.

Otro aspecto relevante en la energía suministrada por fuentes renovables es el estudio de la calidad de esta energía; [18] presenta algunos estudios de los problemas de tensión originados en el punto común de conexión de una red experimental de 1,000kWh/mes de energía solar en la ciudad de Ibagué, Colombia. En este estudio se incluyen aspectos como desequilibrio de tensión, intermitencia, parpadeo de corto y largo plazo, fluctuaciones y daños. Se resalta que lo que se espera de esta experiencia en el proyecto es que pueda servir de referencia en la aplicación de la ley 1715 del gobierno de Colombia para el aprovechamiento de la energía solar. En los sistemas de generación distribuida, el cliente final puede suministrar energía a cualquier sistema de baja tensión, esto aumenta la amplitud del sistema y reduce las pérdidas en las etapas de transmisión / distribución y luego la dependencia de la generación centralizada. Después de la operación del sistema solar fotovoltaico experimental, no se identificaron diferencias significativas en el parpadeo a corto y largo plazo y/o muescas e interrupciones a largo plazo. Las lentas perturbaciones no sufrieron ningún cambio, por lo que las interrupciones de corto plazo se mantuvieron estables; con estos estudios se expone que el cambio en cada variable monitorizada debe ser estudiado para mejorar el funcionamiento de la red de baja tensión, haciendo de esta energía renovable una oportunidad de negocio más atractiva.

Existen muchos factores que se pueden estudiar para realizar un sistema funcional de energías renovables, se menciona una investigación donde el objetivo es atraer el interés hacia al campo de control y tolerancia a fallas aplicado a MGs, tales como:

modelado, banco de pruebas, sistemas de referencia, estrategias de control y control jerárquico, diagnóstico de fallas y control tolerante a fallas (CTF). En [19] se especifica la importancia de minimizar el impacto de las fallas en los sistemas de control y las MGs, para esto se han desarrollado y documentado varias estrategias basadas en diferentes técnicas, las más implementadas para solucionar este tipo de problemas son: modo deslizante, métodos robustos, métodos adaptativos, métodos inteligentes y métodos múltiples e híbridos. Los CTFs no solo son capaces de mitigar el impacto de averías y errores (ciber ataque malicioso) del sensor asociado al control jerárquico, sino también de garantizar el funcionamiento seguro y fiable de las unidades fuentes de generación distribuida (GD) acopladas al MG en modo isla, además, disminuirán el impacto de fallas y errores asociados con el lazo de control, también garantizarán el funcionamiento seguro y confiable de las unidades de generación distribuida acopladas.

En la medida que se reconoce la necesidad de implementar recursos renovables que generen energía eléctrica óptima y confiable, aumentan los estudios para identificar los diferentes factores que pueden afectar el funcionamiento de estos sistemas; con esto en cuenta, se muestra una propuesta de investigación para un sistema de gestión de energía de una MG con función de resiliencia (capacidad inherente a cualquier sistema, de absorber los choques y reorganizarse mientras se produce el cambio, de manera que el sistema mantiene esencialmente la misma función, estructura e identidad), que permite operar en modo isla después de un accidente.

En [20] se propone la herramienta llamada Resilient Energy Management System (ResEMS), que permite obtener energía de reserva en el sistema de almacenamiento de la batería de la MG de manera efectiva, importándola del sistema de energía cercano. El algoritmo propuesto verifica y analiza comparando el programa de operación de la MG calculado por un Energy Management System (EMS) normal y ResEMS, el cual tiene una función resistente que se concentra en la adquisición de energía de reserva; después de que ocurre un accidente que cambia el modo de operación de la MG a aislada, las cargas de la MG se clasifican en críticas y no críticas y la energía se suministra solo a cargas críticas. Si la energía eléctrica se proporciona tanto a cargas críticas como a cargas no críticas, la energía de reserva necesaria será excesivamente grande, lo que no es una solución óptima. El algoritmo propuesto tiene como objetivo principal aumentar la resiliencia de una MG descentralizada a pequeña escala mediante la obtención de energía de reserva de manera efectiva. Con este estudio se llegó a la conclusión que, al utilizar el cronograma optimizado calculado por el ResEMS, se refuerza la resiliencia de la MG. Para mantener un sistema funcionando correctamente es necesario no solo evaluar su funcionamiento a lo largo de una determinada cantidad de tiempo, también es necesario identificar las diferentes actividades que rodean a la instalación y uso del mismo.

En [21] se realiza el estudio del comportamiento ambiental de un sistema fotovoltaico integrado en un edificio de 840Wp instalado en el Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, campus Bogotá. Para la evaluación de este sistema fotovoltaico, se usó la metodología de las normas técnicas

internacionales ISO 14040 y 14041 basadas en la aplicación de software Umberto NXT LCATM; el cual cuenta con una interfaz gráfica que permite definir los flujos de materiales o energía según el modelo a analizar y también establecer el impacto ambiental de forma cuantitativa durante el proceso. Una ventaja de este software es que está vinculado a las bases de datos mundiales más grandes. El estudio tuvo como conclusión que el impacto ambiental se reflejó en las fases de extracción y fabricación, transporte de disposición, disposición de los paneles fotovoltaicos, debido a la manipulación de materiales y uso de combustible para movilizar los materiales. De acuerdo con las cargas ambientales durante el análisis del ciclo de vida, ambos sistemas son positivos y sostenibles, sin embargo, se deben resaltar que los factores geográficos y meteorológicos deben ser estudiados previamente para poder definir qué sistema es más viable. En [22] se presentan dos casos de expansión para una MG basada en un sistema de generación fotovoltaica que se encuentra en una zona no interconectada de Colombia; pretende garantizar la estabilidad de la MG, para lo cual obtiene los valores propios del sistema frente a cargas no lineales y aumento de potencia demandada y generada; se concluye que el análisis de estabilidad de pequeña señal es el método indicado para estudiar el comportamiento de MGs ante variaciones de potencia demandada y generada.

En Colombia, como ya se ha expresado, existen diversos estudios sobre la electricidad generada con energías renovables, una investigación más precisa es realizada en [1] sobre la descripción de los resultados del desempeño operativo luego de un año de monitoreo (2017), para la primera MG fotovoltaica instalada en el Edificio de Energías Renovables del municipio Medio San Juan, Andagoya, departamento del Chocó. La MG está compuesta por un generador fotovoltaico de 20kW instalado en el techo del edificio, con 80 paneles solares, cada uno con 250W de potencia. La generación de energía del sistema fotovoltaico y el comportamiento del sistema de almacenamiento de energía del edificio, se evaluó mediante un sistema de monitoreo remoto desarrollado a través de internet. Se realiza el análisis del rendimiento del almacenamiento de energía del edificio (integrado por dos bancos de baterías) y se valida con los resultados de rendimiento de la MG para cada mes de 2017. De estos estudios se obtuvieron unos parámetros que son medidos del banco de baterías los cuales brindan información valiosa sobre el funcionamiento de los dispositivos de almacenamiento en climas tropicales y en condiciones reales. Con estos resultados es posible concluir que la energía generada por la MG renovable cumple con todas las especificaciones exigidas para dichos sistemas por los estándares nacionales e internacionales.

1.2.3. Análisis de señales para la evaluación de calidad de potencia

Según [23] el uso de energía renovable se origina desde el punto de vista de la preservación ecológica y la escasez de combustibles fósiles; los estudios actuales sugieren que a mediano y largo plazo, la ejecución fotovoltaica se puede encontrar en varias partes del mundo. Al hablar de generación de energía renovable es importante hablar de la generación distribuida, existe un caso en que no tiene permiso de suministro durante aislamiento accidental de la red, por ello es vital percibir el aislamiento para apagar los generadores distribuidos.

En [24] proponen un método de análisis para múltiples generadores distribuidos co-

nectados por convertidor para distinguir entre situaciones isleñas y no isleñas; estos generadores se apagan durante la falla no intencional de islas, lo que causa efectos negativos para equipos humanos y eléctricos. Así mismo mejoran una de las técnicas de análisis que consiste en inyectar una perturbación de corriente de baja frecuencia a través del controlador basada en la media de la tasa absoluta de cambio de frecuencia; esto facilita la capacidad de identificar fallas en la comunicación y es adecuado para las demandas variables y las fluctuaciones de frecuencia de la red, sin necesidad de un umbral adaptativo. En Tennessee el sistema de energía de la autoridad del valle de Tennessee tiene muchos capacitores de 161Kv y operarlos sin resistencia de preinserción presenta problemas para la generación, por ello [25] estudia el impacto de interconectar y operar grandes sistemas de generación de energía renovable; la falta de estándares industriales aplicables para las interconexiones de alta tensión generan problemas de calidad, estos pueden agravarse cuando la generación interconectada se alimenta en una dirección durante los escenarios de mantenimiento de la línea. Analizan los diseños de las instalaciones de generación renovable determinando su capacidad para energizar transformadores grandes sin exceder el límite de cambio de voltaje de 5%; además recomiendan usar el estándar IEEE P2800 y evalúan los problemas relacionados con las siguientes operaciones: conmutador de condensadores y transistores, energización de grandes bancos de transformadores que propician caídas de voltaje y flujos armónicos que crean resonancia con capacitores que dan como resultado distorsión de voltajes.

En [26], [27] y [28] se realizan simulaciones y modelado de MGs analizando de forma técnica y económica plantas de energía solar conectada a la red a partir de diferentes métodos; uno de ellos desarrolla una herramienta de circuito integrado de alta velocidad + lenguaje de descripción de hardware avanzado (VHDL-AMS), que permite la simulación de sistemas de energía fotovoltaica operando a la par con centrales hidroeléctricas para optimizar la operación coordinada e incluye modelos definidos por el usuario para dicha aplicación de software. Otra aplicabilidad es dimensionar una MG híbrida fotovoltaica-biomasa para electrificar una finca de manzanas en Albaha - Arabia Saudita basado en el costo anual total (TAC); para ellos se usa dos métodos de optimización: Harmony Search (HS) y Firefly Algorithm (FA) para obtener el número de paneles fotovoltaicos y el grupo generador-motor de biomasa con el menor costo actual neto. La probabilidad de pérdida de suministro de energía se utiliza para mejorar el rendimiento del sistema propuesto; un diseño de sistema híbrido eficiente y confiable se basa en la combinación correcta de fuentes de energía renovable y las condiciones climáticas del área estudiada así como el costo inicial de los componentes del sistema; puede adaptarse a otros sitios considerando la disponibilidad de los recursos. Para el caso de estudio de un invernadero inteligente que permite una optimización y un control precisos de las variables internas del microclima, se formula un marco de optimización integrado en un modelo predictivo de un esquema de control, a partir de un algoritmo de optimización de programación; con lo cual se crea un entorno apropiado para el crecimiento de los cultivos; el mismo presenta retos con base a las condiciones de crecimiento por la incertidumbre de los efectos del clima exterior, además trabaja con niveles de referencia para mantener los sistemas de almacenamiento en las MGs funcionando en óptimas condiciones para así garantizar alta calidad del sistema.

La búsqueda ha estado enfocada en desarrollar metodologías y estrategias de control que permitan tener un comportamiento óptimo de las MGs que además mitigue los problemas de calidad que se puedan presentar en el suministro. Por ello [29] Formula una estrategia de control para un sistema de almacenamiento de energía por batería (BESS) basada en dos controladores inteligentes desacoplados; el objetivo es restaurar el voltaje y la frecuencia del sistema considerando una amplia gama de perturbaciones y por lo tanto, evitar la degradación de la calidad de la energía. El controlador propuesto se basa en la optimización de la evolución diferencial híbrida y la red neuronal artificial (DEO-ANN), los parámetros del controlador se ajustan en línea entrenando a la red con los conjuntos de datos de entrada y salida obtenidos durante el proceso de optimización de los dos controladores bajo perturbaciones altas y bajas usando DEO. Los resultados de la simulación demuestran la solidez del enfoque de control propuesto en comparación con un controlador de referencia. La efectividad del controlador propuesto se valida en una red eléctrica que consta de un generador síncrono, un sistema de energía fotovoltaica y BESS; la frecuencia en la MG y el voltaje del bus de punto de acoplamiento común (PCC) se han mantenido dentro de los límites operativos prescritos durante condiciones normales y anormales; los parámetros de los dos controladores basados en BESS se han optimizado utilizando la técnica DEO en diferentes niveles de perturbaciones.

Actualmente la energía solar basada en la utilización de la innovación fotovoltaica se está convirtiendo en un estándar distintivo debido a las donaciones del gobierno, por ello [23] basa su investigación en la regulación del voltaje de la red en un parque solar fotovoltaico con dos o más granjas conectadas a la misma línea de distribución en modo paralelo, evita los otros dispositivos de compensación obteniendo una mejor regulación de voltaje al operar todas las granjas en un compensador síncrono estático (STATCOM), cuya simulación esta basada en Matlab/Simulink. Su mayor preocupación es el manejo del voltaje; con el control del marco de energía se ha demostrado que una remuneración deficiente de la capacidad receptiva en las condiciones de trabajo puede conducir a la precariedad del voltaje. Se proponen diferentes conceptos de la utilización de un parque solar fotovoltaico como STATCOM para una red débil que permita regular la variación de voltaje durante la noche y los resultados se validan a través de Matlab/Simulink; los mismos conceptos se pueden implementar para paneles solares con múltiples conexiones.

Ahora, [30] propone un compensador de filtro conmutado adaptativo (ASFC) con un controlador derivado proporcional integral (PID) desarrollado para mejorar el rendimiento dinámico general de las MGs. Las ganancias del controlador del PID se ajustan de manera óptima mediante la aplicación del algoritmo de optimización de saltamontes (GOA) para actuar de forma adaptativa con auto ajuste, ya que las condiciones de funcionamiento pueden estar sujetas a cambios durante el funcionamiento de la MG. Se proponen unos estudios para revelar la robustez del ASFC presentado sobre mitigación de armónicos, estabilización dinámica de voltaje, compensación de potencia reactiva y mejora del factor de potencia, considerando las características de las RES como variaciones de velocidad del viento e irradiación solar fotovoltaica. Se propone un compensador estático síncrono de distribución (D-STATCOM), como uno de los sis-

tema de transmisión de corriente alternativa flexible de distribución (D-FACTS) más populares, con un controlador PID sintonizado óptimo mediante el uso de GOA. Los resultados de la simulación muestran una mejora de los aspectos de la calidad de la energía como la estabilización dinámica de la tensión, la mitigación de la distorsión armónica, la reducción de la potencia reactiva consumida y el factor de potencia. La topología MCMC propuesta en [31] elimina el uso de diodos de sujeción, condensadores y requiere sólo 1/4 o (25 %) del voltaje de entrada de corriente continua que se utiliza en cualquier topología convencional para producir la misma cantidad de voltaje de salida. Se realizan simulaciones y modelado de MGs en Matlab/Simulink; la efectividad de la topología propuesta se evalúa calculando varios índices de calidad de la energía en condiciones de carga dinámicas y no lineales; la topología de inversor propuesta, mejora la calidad de potencia en MG basadas en RES en todas las incertidumbres como grandes variaciones de carga resistiva y reactiva, fallas momentáneas, inyecciones de no linealidad por hornos de arco y fenómeno de rayo, transitorios, entre otros; además mejora las características como el perfil armónico, perfil de voltaje (forma de onda, desequilibrios, pandeo y oleaje, sobre y bajo voltaje, picos y sobre-tensiones y parpadeos). Se concluye que la topología de inversor MCMC-mUPSC PWM propuesta es una opción adecuada para la mejora de la calidad de la energía en MGs ecológicas; esto apoya el despliegue de MG fructíferas y fiables para satisfacer las necesidades energéticas de los edificios verdes urbanos en la nueva era.

En [32] se propone una estrategia de gestión energética para una MG residencial compuesta por paneles fotovoltaicos, una pequeña turbina eólica y colectores solares térmicos. Como datos de entrada, la estrategia de control propuesta utiliza el estado de carga de la batería (SOC), la temperatura del acumulador de agua caliente, la potencia de cada elemento de la MG, así como las previsiones de demanda y generación renovable; además presenta una estrategia de gestión energética que reduce los picos de potencia y las fluctuaciones en el perfil de potencia de la red de una MG electrotérmica que comprende generadores renovables, consumo y almacenamiento eléctrico y térmico tanto en el lado eléctrico como en el lado de sistema de agua caliente sanitaria, que a su vez, están vinculados juntos por un calentador de agua eléctrico controlable. Esta estrategia utiliza sus dos grados de libertad (la batería, la combinación de un calentador de agua eléctrico y un tanque de agua caliente) para controlar la potencia intercambiada con la red, con un control basado en la previsión del estado energético de ambos subsistemas eléctrico y térmico. La estrategia hace uso de la gestión del lado de la demanda controlando la potencia absorbida por el calentador eléctrico, no solo atenuando sus propios picos de potencia, sino absorbiendo los picos de potencia de generación y ayudando con la gestión del SOC de la batería, contribuyendo así a un mejor perfil de potencia de la red.

Por su parte [33] propone un filtro de potencia activa universal integrado de energía renovable (UAPF) para el sistema de MG; aquí, las fuentes de energía renovable como la solar y la eólica con el sistema de almacenamiento de batería están integradas en el enlace de corriente continua de UAPF; en el sistema de MG propuesto, el controlador centralizado (CMC) se implementa para mejorar la calidad de la energía y administrar el flujo de energía de manera efectiva; el objetivo principal del CMC es

lograr una utilización eficaz de las fuentes de energía renovable, una transferencia de energía sin interrupciones en diversas condiciones de funcionamiento, un suministro de energía confiable y de calidad a la carga. El sistema propuesto se simula en Matlab y desarrolla un modelo prototipado para validar el rendimiento y las características de la CMC propuesta; el rendimiento del sistema propuesto se analiza en modos interconectados, aislados y flotantes tanto en simulación como en configuración experimental de prototipos. Se puede observar que el sistema es estable, eficiente y confiable durante toda la operación, este es de estructura simple y menos carga computacional; siendo más adecuado para áreas rurales e industriales con un sistema de distribución de bajo voltaje donde hay problemas frecuentes de calidad de energía con abundantes fuentes de energía renovable.

1.3. Contribución

La definición de calidad de potencia aún permite que se realicen aportes y esto es evidente en las microrredes debido a las variaciones que estas han tenido en su topología y elementos. Con este trabajo de grado se busca aportar conocimiento desde la perspectiva del análisis de señales para entender mejor la operación de una microrred que involucra Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER). Para validar los algoritmos implementados se considerarán diferentes escenarios de operación adaptados a condiciones reales en el Departamento del Cauca.

1.4. Objetivos

1.5. Objetivo General

Diseñar una herramienta computacional que permita entregar un diagnóstico desde el enfoque de calidad de potencia de una microrred en una zona aislada.

1.6. Objetivos Específicos

1. Diseñar una microrred que involucre generación distribuida basada en fuentes no convencionales para una zona aislada en el Departamento del Cauca.
2. Realizar un análisis a partir del procesamiento de señales de las perturbaciones en la microrred.
3. Identificar las principales perturbaciones que afectan el normal funcionamiento de una microrred en una zona no interconectada y establecer estrategias para su mitigación.

2. MARCO TEÓRICO

Con el fin de desarrollar el trabajo de grado y cumplir con los objetivos propuestos se han definido una serie de fases con sus respectivas actividades específicas, herramientas

y entregables los cuales se encuentran organizados en un orden cronológico cumpliendo con el límite de tiempo definido para el desarrollo total del proyecto académico.

2.1. Calidad de Potencia

Algunos de los problemas de PQ causados por la alta penetración de los GD son armónicos de corriente, armónicos de voltaje, subidas o bajadas de voltaje, fluctuaciones, desequilibrios, mal funcionamiento de los dispositivos de protección, sobrecargas y fallas en los equipos eléctricos. [34] Compara los principales problemas relacionados con la caída de tensión, el aumento de tensión, los armónicos de tensión y corriente, los desequilibrios del sistema y las fluctuaciones para garantizar una potencia de salida de MG de alta calidad. Las fuentes de MG dependen en gran medida de los dispositivos electrónicos de potencia, como los convertidores; por lo tanto, una emisión de alta frecuencia dará lugar a un nuevo fenómeno, a saber, las emisiones de supra armónicos (SH). Las emisiones de SH se pueden caracterizar como la inyección de armónicos por parte de dispositivos de red en una instalación con un rango de frecuencia de 2 a 150 kHz. Las emisiones en un rango de frecuencia de este tipo han generado preocupación debido a la creciente existencia de interfaces electrónicas de potencia, que incluyen dispositivos como convertidores CC/CA, vehículos eléctricos y bombas de calor, además de los controladores de carga de los sistemas fotovoltaicos y eólicos.

El dispositivo de gestión de control entre la red, las cargas y los generadores (UPQC) también se usa en para mitigar el hundimiento y el oleaje en una MG que consta de un sistema híbrido fotovoltaico/eólico mediante inyección o absorción de corriente reactiva. Estos dispositivos de potencia personalizados pueden mitigar la incidencia de PQ en MG hasta cierto punto. Sin embargo, pueden aumentar el costo y la complejidad del sistema MG. Además, sobre la base de, el problema de PQ en MG puede aumentar su costo de energía en un 10%. SH, como un nuevo fenómeno de PQ debido al avance de MG, no está cubierto y aún no existe un estándar al respecto.

Otro documento propone una microrred que incluye seis usuarios domésticos y un conjunto de cargas comunes, alimentados por un generador fotovoltaico y equipados con un ESS constituido por baterías de plomo-ácido. Sin embargo, el enfoque metodológico presentado por el mismo permite extender fácilmente el diseño de control propuesto a diferentes configuraciones. Para abordar los problemas relacionados con las tareas de control contrastantes de las microrredes aisladas, se propone un algoritmo de control basado en MPC junto con un predictor basado en ANN [35]. Para proporcionar niveles razonables de disponibilidad de energía durante todo el día, se introduce un ESS, según la práctica común con los sistemas fotovoltaicos autónomos para la electrificación rural. Para poder determinar el tamaño del almacenamiento y la energía fotovoltaica y realizar simulaciones significativas, es necesario tener un perfil de carga conocido y detallado para cada grupo de carga.

A los efectos de este documento, los módulos fotovoltaicos se pueden modelar simplemente por medio de su característica I-V. Esto permite determinar el punto de máxima potencia en función de la temperatura ambiente y la irradiación solar, y en caso de ser

necesaria una reducción de potencia, determinar otros puntos de funcionamiento. Esto es suficiente para cubrir los tres modos operativos considerados en negri-griani, a saber, la condición de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), la condición sin carga y la condición de restricción de potencia.

El método seguido para realizar los cálculos de la sección de los cables considera un porcentaje máximo de caída de tensión del orden del 2% de la tensión nominal, igual a 200 V. Suponiendo una longitud de línea igual a 100 m y una corriente máxima igual a 30 A, la resultante de la sección transversal es igual a 70 mm². El conjunto de simulaciones realizadas muestra la dependencia de los índices de rendimiento considerados del tamaño de PV y la capacidad de ESS. Además, incluso en los casos en los que no se dispone de un suministro de energía 100% confiable, el controlador MPC muestra un número significativamente menor de horas sin disponibilidad de suministro de energía con respecto a las simulaciones de referencia con controles estándar.

El progreso en las tecnologías de energía de corriente continua (CC) ha allanado el camino para el surgimiento de DC Nano Grid (NG) como una nueva área de investigación que atrae la atención internacional.[36] En [36] tienen como objetivo diseñar un algoritmo de control simple y cohesivo para un generador solar fotovoltaico y eólico acoplado a CC residencial de baja potencia con energía eléctrica y térmica. Para los sistemas de almacenamiento de energía, se sabe que la arquitectura de control de gas natural prevista extrae la máxima potencia de la energía solar fotovoltaica y efectúa la máxima transferencia de potencia activa del generador eólico. Mediante regulación de voltaje del bus de CC, extrae/entrega corrientes sinusoidales balanceadas en factor de potencia unitario (UPF) desde/hacia la red y monitorea la programación de energía para Cargas CC y térmicas. La energía solar fotovoltaica máxima se extrae a través de un algoritmo de conductancia incremental y la energía eólica máxima se rastrea utilizando un ecuación de ajuste de curva polinomial derivada de las curvas de potencia eólica sin implementación de ningún lazo de control de velocidad/par. La máxima transferencia de potencia activa del viento y UPF permite el funcionamiento de la red, utilizando un método de generación de corriente de referencia basado en la teoría de componentes simétricos de la estrategia de corriente igual sin transformaciones complejas. Se logra un factor de potencia de 0,99 con generación de corrientes sinusoidales equilibradas durante la importación y exportación de energía de la red. Además, el funcionamiento del DC NG propuesto en todos los modos posibles, como los modos en isla/conectado a la red/interconectado, se monitorea a través de un controlador de supervisión. El sistema se implementará en cualquier ubicación geográfica (terreno montañoso/rural/urbano) ya sea con disponibilidad limitada de fuentes renovables o suministro de red. El funcionamiento exitoso del sistema se validó a través de la experimentación en un prototipo de hardware reducido a 120 W.

Representa diferentes tipos de análisis de calidad de energía de un sistema fotovoltaico conectado a la red a través del modelado en MATLAB/SIMULINK. El modelo presentado se utiliza para simular diversas perturbaciones en la calidad de la energía. Los resultados de la forma de onda de salida permiten obtener conclusiones y esto es útil

para un mayor aprendizaje, investigación y desarrollo de la educación del sistema de potencia. En comparación con el tipo de dos niveles, el filtro LC se puede hacer más pequeño, cuya salida es una onda sinusoidal. Hay una menor pérdida de conmutación, lo que es adecuado para un diseño altamente eficiente; también es adecuado para sistemas de generación de energía fotovoltaica. Después de eso, usan un filtro LC para suavizar la forma de onda de salida. Luego, se ha realizado una detección adecuada a través del osciloscopio para obtener la forma de onda para la condición de isla.

En la matriz fotovoltaica, la potencia de salida está relacionada con diferentes condiciones de operación; la energía generada es mayor cuando la luz del sol es más alta. Un pequeño desequilibrio entre la radiación solar y la temperatura puede variar la salida de la matriz fotovoltaica. Hay una región donde tanto el voltaje como la corriente permanecen constantes. El voltaje debe controlarse para lograr más potencia de salida en el lado de la carga. El módulo fotovoltaico conectado a la red está diseñado en SIMULINK; este conjunto fotovoltaico se puede implementar en una disposición de seguimiento del punto de máxima potencia y utiliza el cálculo y la fórmula de una celda solar típica. Aquí aplican el método de transformación de wavelet, la señal de disparo se produce alrededor de 1300 muestras y lleva más tiempo, pero si aplicamos el método de transformación de wavelet fraccional, el disparo se produce cuando se produce una falla. Entonces, a partir de todos estos análisis, podemos decir que la técnica basada en la transformada fraccional de wavelet para las perturbaciones de la calidad de la energía en un sistema de interfaz es más precisa y relevante que la técnica basada en el transformador de wavelet [37].

2.2. Zonas No Interconectadas

Se presenta un panorama global y local sobre el uso y aprovechamiento de energías limpias alimentadas por radiación solar directa, las políticas nacionales que facilitan su acceso y los proyectos implementados a nivel de Zonas No Interconectadas (ZNI), de acuerdo a la Ley 855 de 2003 en Colombia, se entiende por ZNI (Zonas No Interconectadas), a todos los municipios o localidades que no están conectadas al SIN (Sistema Interconectado Nacional) [15]. Asimismo, las comunidades que habitan en estas zonas cuentan con importantes posesiones de minorías étnicas (indígenas, afrocolombianos y nativos isleños), [22] y del Sistema Interconectado Nacional (SIN), abarcando desde una mirada macro y micro, la era fotovoltaica en Colombia y su marco legal y técnico. En zonas no interconectadas, la utilización de microrredes se ha convertido en la única alternativa que tienen las personas para acceder al servicio de energía eléctrica. Debido a esto, es necesario optimizar estos sistemas y, de ser posible, expandir las ya existentes para aumentar la cobertura y de esta manera apoyar el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 7, planteado por Naciones Unidas: energía asequible y no contaminante. [38].

Según [22] en los últimos años se han llevado a cabo diferentes proyectos energéticos desarrollados en el sector rural de Colombia, cuyo objetivo es brindar tecnologías limpias a personas en zonas remotas para incrementar sus capacidades productivas y mejorar su calidad de vida; además estimulan el crecimiento económico, generando nuevas alter-

nativas de ingresos que redundan en bienestar social, sin embargo, la implementación de estos procesos es difícil, debido a que las comunidades no cuentan con sistemas de energía y servicio eléctrico continuos y confiables, o incluso peor no existe.

En Colombia, los recursos renovables son una excelente opción para contar con el servicio de energía eléctrica sin embargo se identifica un déficit en los tres elementos que permiten el desarrollo fotovoltaico en un país: la política siendo el primero, visto desde el marco legal, eliminación de barreras, propuestas e incentivos, entre otros. La investigación como segunda, vista desde la eficiencia energética, el ahorro y el desarrollo tecnológico. Finalmente el seguimiento, que permite, mantener en tiempo real cuánto proyecto evaluando los logros en base a error y acierto; incluso resalta que es necesario que los ingenieros adquieran habilidades buscando que las soluciones implementadas en las zonas rurales sean sostenibles, entendiendo el término sostenibilidad como la capacidad de tener un proyecto para aprovechar los recursos naturales preservándolos para las generaciones futuras. [15].

2.3. Pobreza Energética

La propuesta que se presenta en [39] cubre sólo una de estas áreas, estrategia que responde a la idea que la pobreza energética es un fenómeno real que afecta la calidad de vida de la población y que, debido a sus implicaciones económicas, sociales y ambientales, requiere abordarse con un enfoque científico.

Lewis (1982) es el autor que propuso la primera definición formal de pobreza de combustible bajo el enfoque de subsistencia, estableciendo que un hogar se encuentra en pobreza de combustible cuando no se puede pagar el combustible necesario para mantener el calor o temperatura que brinde confort térmico a los miembros de un hogar, pocos años después la Dra. Brenda Boardman plantea en su tesis doctoral lo que es, hasta hoy, la definición más conocida de pobreza de combustible: “un hogar se encuentra en pobreza de combustible si gasta más del 10 % de sus ingresos para tener la calefacción adecuada”, esta autora señala que además de las necesidades físicas, hay también necesidades sociales que dependen de la estructura social e institucional de un lugar y tiempo determinado, ya que la sociedad cambia e impone nuevas obligaciones a sus miembros.

En el Reino Unido una persona afectada por la pobreza energética se definió como una persona [que] es miembro de un hogar que vive con un ingreso más bajo en una casa que no se puede mantener caliente a un costo razonable” (willem van hove, Francesco Dalla Longa, Bob van der Zwaan)[40] ; sin embargo [39] menciona que la visión británica del estudio de la pobreza energética resulta difícil de aplicar en América Latina, ya que presenta una serie de dificultades teóricas y metodológicas, con este relativismo, parece que es muy difícil estimar un índice de pobreza energética que pueda medirse y evaluarse no sólo entre países, sino dentro de un mismo país. Para (Sen,1981), esto quiere decir que la pobreza es un fenómeno absoluto expresado en términos relativos.

Los esquemas de electrificación rural son necesarios para el desarrollo social y económi-

co. En varios países de África, Asia y América Latina este tema es fundamental y algunos gobiernos han adoptado nuevas políticas para aumentar la cobertura del servicio, un caso que se ha estudiado con interés es el de Colombia [41]. Colombia se muestra como un productor de energía eléctrica a partir de la hidroelectricidad, siendo esta la que genera el mayor impacto energético en Colombia con un 75,9%.

2.4. Microrred

Se define una MG como una arquitectura de red que pudiera gestionar la generación y la demanda de electricidad localmente en subsecciones de la red que podrían aislarse automáticamente de la red más grande para proporcionar servicios críticos incluso cuando falla la red en general. Sin embargo, la red actual no es una entidad estática; estamos recorriendo un arco histórico que comenzó con la generación distribuida a pequeña escala (reconocida como las microrredes de CC originales) promovida por Thomas Edison a fines del siglo XIX, que se consolidó y centralizó impulsada por la creciente demanda, y que ahora está experimentando los comienzos de un retorno a la descentralización. Una MG contiene principalmente diferentes RES que utilizan diversos avances tecnológicos, como tecnologías basadas en electrónica de potencia. Sin embargo, tiene una salida inestable, lo que provoca diferentes tipos de eventos de calidad de energía (PQ). Para mitigar los problemas de PQ debido a la integración de MG, se han propuesto varios métodos y estándares en los últimos años. El despliegue de energías renovables intermitentes con cargas flexibles co-ubicadas y tecnologías de almacenamiento en microrredes permite el equilibrio local de la oferta y la demanda, lo que hace que el despliegue de energías renovables distribuidas generalizadas sea más manejable.

Las llamadas microrredes "híbridas" que incorporan fuentes de energía renovable, a menudo como complemento de los sistemas basados en generadores diésel, muestran un gran potencial para diversificar la generación y reducir los costos operativos de las microrredes en comunidades insulares que dependen del costoso petróleo importado para generar electricidad y en áreas remotas lejos de la electricidad existente infraestructura. Las microrredes remotas no necesitan utilizar un enfoque único para el diseño del sistema; con una evaluación cuidadosa de los recursos y la comprensión de los perfiles de demanda, los proyectos pueden optimizarse para adaptarse a las condiciones locales. [3]

El hecho de que las microrredes se conviertan en la estrategia dominante para implementar grandes cantidades de energías renovables intermitentes y mejorar la resiliencia depende de si los beneficios se perciben como suficientemente grandes en relación con los costos, en comparación con los paradigmas alternativos de redes inteligentes los costos de la generación solar fotovoltaica y el almacenamiento en baterías están cayendo rápidamente, hasta el punto de que se acercan a la paridad de costos con las fuentes de electricidad tradicionales; como resultado, la adopción generalizada de estas tecnologías puede acelerarse rápidamente hasta el punto donde los usuarios finales puedan importar y exportar electricidad, sea la norma y no la excepción [3]. Con el rápido desarrollo de la generación distribuida, almacenamientos y técnicas de control, un número creciente

de las microrredes están interconectadas con las redes de distribución. Para Min-Zaho la capacidad de microrred que un sistema de distribución local puede permitirse, es importante para la planificación de redes de distribución y microrredes integración bien organizada. En los sistemas de generación solar fotovoltaica ubicados en zonas no interconectadas y operando en modo isla, los inversores influyen en la estabilidad de frecuencia considerablemente, debido a que la reducida inercia en estos sistemas conduce a una variación más rápida de este parámetro. Por esto, el análisis de estabilidad de pequeña señal es el método indicado para estudiar el comportamiento de microrredes ante variaciones de potencia demandada y generada, particularmente en los sistemas que operan en las zonas no interconectadas, porque ante pequeñas perturbaciones es posible identificar los cambios en la dinámica del sistema. [38]

Proponen una atractiva aplicación de microrred residencial que combina sistemas fotovoltaicos de azotea conectados a la red disponibles en el mercado, cargadores lentos/medios para vehículos eléctricos (EV) y un sistema de almacenamiento de energía (ESS) para el hogar o el vecindario. Durante el día, el PV cargará el ESS local y durante la noche lo descargará al EV. El efecto es doble: (1) los esquemas de tarifas de alimentación no son necesarios ya que se necesita intercambiar poca energía con la red principal; y (2) se mejora la calidad del voltaje en el PCC. La inclusión del ESS alivia las sobretensiones durante el día debido al exceso de generación de energía fotovoltaica y las bajas tensiones durante la noche causadas por la enorme corriente drenada para cargar el vehículo.[3]

Se analizó la estabilidad transitoria y de tensión, para una MG que incluye Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), para esto se realizaron estudios por medio de un software especializado en sistemas de potencia, en el cual se modelará el sistema eléctrico en estudio, donde se analizó el comportamiento del mismo, mediante contingencias y salidas de operación de los generadores del sistema, como también la viabilidad de mantener conectada o no la MG. Esta investigación muestra cómo se afecta la estabilidad de una MG ante la conexión de un sistema de potencia convencional cuando este es sometido a diferentes perturbaciones. Mediante el análisis de estabilidad transitoria, se pudo observar que al incorporar FNCER comparables con la convencional compromete de forma directa la estabilidad del sistema, cuando se presenta una falla el sistema se vuelve completamente inestable y sensible ante la duración de las perturbaciones, entonces la MG funciona en modo isla, obligando a realizar un desconexión deliberada de carga debido a que no puede suplir toda la demanda de la misma.

Para el análisis de estabilidad de tensión, se sometió el sistema de potencia a 8 contingencias, uno de los casos más críticos donde el sistema pierde un generador que aporta el 60 % de la generación total, provocando una caída en los niveles de tensión de más de un 4 %, se puede observar que la conexión de la MG al sistema de potencia permite mejorar los niveles de tensión en los buses del sistema y en el flujo de carga se observa que disminuyen las potencias inyectadas, lo que supone la mitigación de las pérdidas asociadas al transporte de la energía eléctrica desde los generadores convencionales

hasta la MG. Resalta la importancia de poder anticiparse al comportamiento de la incorporación desmedida de FNCER, por medio de paquetes de simulación especializados, donde se permita proyectar y pronosticar de forma adecuada los posibles efectos en la expansión de un sistema interconectado, ya sea con fuentes no convencionales o convencionales, garantizando la calidad, seguridad y confiabilidad en el suministro de la energía eléctrica.[42]

POr su parte [43] se enfoca específicamente en las islas de Providencia y Santa Catalina donde se presentan grandes retos en cuanto a sostenibilidad que se deben a factores como los altos costos que el uso de diésel representa para la isla y con ello los altos costos de prestación de servicio de energía eléctrica, ineficiencias en los equipos eléctricos empleados, prácticas inadecuadas que se le dan a los mismos y las cargas fiscales para el gobierno debido a los subsidios otorgados en prestación del servicio eléctrico.

Se presentan los estudios donde se muestra la propuesta de integrar una MG basada principalmente en FNCER a la canasta energética de las islas que logren sustituir en gran parte el uso de diésel, mantener una baja huella de carbono y desarrollar una industria sostenible en el largo plazo, representa un aporte significativo a las entidades de suministro energético y a la comunidad; después de analizar los recursos renovables de la isla se identifica que el recurso solar de las islas tiene un buen potencial para implementar proyectos que empleen este tipo de generación, con niveles de radiación entre 5,0 y 5,5 kWh/m²/día; mientras que, según cálculos realizados, sus vientos cuentan con densidades de potencia disponible de 74,04 W/m² a 10 m de altura y 97,75 W/m², lo cual abre la posibilidad de desarrollar proyectos a pequeña escala. Se determina que un escenario de mix energético, implementación de una MG concluye una viable, económica y ambientalmente técnica de generación alternativa para las islas de Providencia y Santa Catalina. Para esto se realizaron diferentes simulaciones a condiciones de radiación solar promedio de 143,83 kWh/m² y velocidad promedio del viento de 3,47 m/s, se obtuvo que en el escenario A donde se use un generador Cummins de 745 kW y una capacidad instalada de 3,39 MW en fotovoltaica, parte de la cual podría ir destinada a los hoteles y el resto en pequeñas centrales distribuidas.

2.5. Transición Energética

Los científicos del clima han llegado a la conclusión de que para evitar un aumento de la temperatura media global superior a 2°C por encima de los niveles preindustriales, actualmente aceptado como el umbral entre el cambio climático "seguro" y "peligroso", la sociedad humana necesita reducir la proporción de electricidad producida por la quema de combustibles fósiles del 70% (en 2010) a menos del 20% para 2050. El desafío de reducir radicalmente las emisiones de gases de efecto invernadero para evitar una alteración climática catastrófica también ha dado lugar a políticas gubernamentales que incentivan el despliegue de fuentes de generación libres de carbono, muchas de las cuales se prestan a aplicaciones distribuidas. Ahora, [3] se centra en partir de fines de la década de 1990 donde científicos e ingenieros de Estados Unidos y Europa comenzaron a explorar soluciones descentralizadas que pudieran gestionar la integración de miles o decenas de miles de recursos energéticos distribuidos de una forma que también

maximizan la confiabilidad y la resiliencia frente a desastres naturales, ataques físicos y cibernéticos. y cortes de energía en cascada.

Ban Ki-moon, Secretario General de Naciones Unidas, anunció en 2010 la meta de Acceso Universal a la Energía en la Cumbre de Alto Nivel de los ODM. Cabe mencionar al respecto que, en la actualidad, hay aproximadamente 2,400 millones de personas que utilizan leña o carbón vegetal como combustible para cocinar, 1,600 millones que no cuentan con energía eléctrica en sus viviendas y se espera que, para 2030, otros 1,400 millones de personas estén en la misma situación (Modi, et al., 2005: 1-2). Este escenario destaca la dimensión social de los usos de energía y, sobre todo, la relevancia de la meta de acceso universal a la energía establecida por Naciones Unidas por ejemplo, la Agencia Internacional de Energía destaca en sus informes anuales que emisiones de bióxido de carbono (CO₂) procedentes de la quema de combustibles fósiles anual de las emisiones de los países no Anexo I son significativamente mayores; se señala también que esta diferencia seguirá creciendo, por lo cual resulta indispensable que todos los países, independientemente de su nivel de desarrollo, se sumen a los esfuerzos de abatimiento de las emisiones globales de CO₂, todo esto de acuerdo a sus capacidades y manteniendo sus aspiraciones legítimas de desarrollo económico y social. Parece necesario conocer entonces a mayor detalle las responsabilidades ambientales relacionadas con los usos de energía de las distintas regiones del mundo. Sin embargo, hay que destacar que sólo 18 de la población mundial vive en los 40 países que conforman el grupo Anexo I (Las partes incluidas en el anexo 1 son los países industrializados que participan en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Estos países son: Australia, Austria, Bielorrusia, Bélgica, Bulgaria, Canadá, Croacia, la República Checa, Dinamarca, Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Islandia, Irlanda, Italia, Japón, Letonia, Liechtenstein, Lituania, Luxemburgo, Malta, Mónaco (Incluida con Francia), los Países Bajos, Nueva Zelanda, Noruega, Polonia, Portugal, Rumania, Federación Rusa, la República Eslovaca, Eslovenia, España, Suecia, Suiza, Turquía, Ucrania, El Reino Unido y Estados Unidos) y generan 45 de las emisiones totales; mientras que el 81 restante vive en los países no Anexo I y genera 55 de dichas emisiones. [39]

En el caso de América Latina, se puede comprobar que un latinoamericano emite en promedio 2.9% toneladas de CO₂, es decir, una sexta parte de lo que emite un estadounidense (18,2 toneladas) y 2.5 veces menos que un Europeo (7,2 toneladas). Así lo demuestra el trabajo de Kozulj, R. (2009), en el cual se analiza cómo los servicios energéticos resultan indispensables para alcanzar los ODM de reducción de la pobreza mundial, en 20 países de esta región se observa una focalización del tema de acceso a la energía en localidades rurales, aspecto que merece una revisión crítica ya que esta región, a pesar de contar con tasas de urbanización más altas en comparación con otras regiones (por ejemplo Asia y África), presenta una evolución creciente de la pobreza urbana respecto a la pobreza rural. El concepto de pobreza energética ha sido estudiado desde la crisis del petróleo en la década de 1970; es un campo de investigación activa, todavía se comprende poco, e identificar los hogares pobres en combustible y enfocarlos con políticas adecuadas sigue siendo un desafío (willem van hove, Francesco

Dalla Longa, Bob van der Zwaan) [40]

Actualmente, más de mil millones de personas en países en desarrollo y subdesarrollados carecen de acceso a electricidad confiable, o a electricidad en absoluto. En particular, para las áreas rurales de estos países, la electricidad es un recurso clave para satisfacer las necesidades humanas básicas, y las microrredes pueden ser la mejor manera de entregar esa electricidad [38]. Es importante saber que más del 40 % de la población no cuenta con servicios de buena calidad ni electricidad constante, y recibe solo 4 h de servicios de energía por día provenientes de plantas Diesel 98 % y un bajo porcentaje de energías renovables (1.2 %) Reconociendo que la tecnología fotovoltaica es la más viable para las zonas ZNI por la radiación promedio en Colombia, se reconoce que existe un déficit a nivel Nacional, ya que menos del 3 % de la población se abastece con este tipo de energía. [15]

En 2014, el Gobierno de Colombia presentó la Ley 1715 para Regular la Integración de las Energías Renovables No Convencionales al Sistema Energético Nacional. Esta Ley tiene como objetivo aumentar la penetración de las energías renovables en el país; y en 2016 se firmó el Tratado de Paz entre el Gobierno de Colombia y las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC-EP). [15] Afirma que estos dos eventos han allanado el camino hacia un nuevo país en el que el desarrollo rural basado en los avances tecnológicos y las energías renovables se vuelve tendencia. La generación eléctrica en Colombia se realiza a través de centrales hidroeléctricas 64 %, que es el principal factor que hace que Colombia ocupe el puesto 16 de 129 países en el ranking de sostenibilidad ambiental del Consejo Mundial de la Energía. El resto proviene de centrales térmicas y solo un 4,5 % de fuentes no convencionales de energías renovables. En Colombia, la demanda de energía va en aumento, según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME); la proyección es que entre 2010 y 2020 la demanda crecerá a una tasa promedio de 3.4 % en EEUU. La tecnología solar fotovoltaica aún no es rentable en Colombia, ya que el valor de su implementación y transferencia es muy alto debido a la escasa madurez del mercado y la falta de regulación vigente (3,2 US\$/W instalado frente a 1,9 US\$/W en Alemania). La última barrera es el costo de inversión, siendo la principal barrera que dificulta la aplicación de estos sistemas especialmente en ZNI, debido a su inversión inicial requerida, costos de operación y mantenimiento que no pueden ser pagados por las comunidades vulnerables pertenecientes a las ZNI cuando se considera de bajos ingresos.

Es importante indicar que actualmente de acuerdo al Acto Legislativo N° 155 de 2017, los recursos de los Fondos de Ciencia, Tecnología e Innovación; de Desarrollo Regional, y Compensación Regional, se realizará de conformidad con el Plan Nacional de Desarrollo y los planes de desarrollo, así como los planes de desarrollo de las entidades territoriales de las entidades territoriales, indicando que el cincuenta por ciento (50 %) de los recursos para financiar programas y/o proyectos en ciencia, tecnología e innovación de los departamentos, municipios y distritos, serán destinados al desarrollo y aprovechamiento de las Fuentes de Energía Renovable No Convencionales. Esto permitirá dar prioridad a las regiones vulnerables y garantizar el uso de este tipo de

tecnologías.

Se analiza la relación entre superficie, población y capacidad fotovoltaica instalada en cada departamento, lo que promueve un desarrollo energético del 34 %, 22 % y 12 % en los departamentos de Cundinamarca, Amazonas y Guajira respectivamente. Amazonas es el departamento Según la UPME, para el 2020 se pretende alcanzar hasta un 30 % de aporte energético con alternativas renovables no convencionales. Según el Balance Energético Nacional, el 67 % del consumo energético proviene de fuentes fósiles, el 13 % biomasa y el 20 % corresponde al consumo de energía eléctrica. La demanda eléctrica actual es de aproximadamente 61.684 GW/h/año. Según la UPME, el costo de implementar los incentivos previstos en la Ley 1715 de 2014 sería de 554 millones de dólares, con un beneficio de 775 millones de dólares en el aspecto económico, pero a su vez habrá beneficios sociales y ambientales como la reducción de emisiones y menores impactos en la salud. Todo lo anterior en los próximos quince años (2032) [15]

Se resalta que la energía solar es una energía renovable de más rápido crecimiento, en la que la energía de la radiación solar se convierte y se utiliza según las necesidades. Hay dos tipos de energía solar. La primera es la energía solar térmica en la que el calor de la energía solar se recoge y utiliza para diversas aplicaciones y la segunda es la energía fotovoltaica en la que la luz se convierte directamente en energía eléctrica [37], además menciona que la energía hidroeléctrica ya no representa la mitad de la energía renovable acumulada. capacidad de energía en operación, cayendo por debajo del 48 % a finales de 2018. La energía eólica aumentó hasta representar aproximadamente el 25 % de la capacidad instalada de generación de energía renovable, mientras que la energía solar fotovoltaica superó el 20 % por primera vez. Generalmente, la energía renovable ha crecido hasta representar más del 33 % de la capacidad total de generación de energía instalada en el mundo. Sin embargo, debido a su dependencia de las condiciones climáticas, los tipos de combustible (es decir, celdas de combustible) y la pequeña cantidad de energía que generan, las fuentes de energía renovable (RES) se combinan con los generadores de distribución (DG) y los sistemas de almacenamiento de energía (ESS) existentes.

Además, muchos países fomentan las conexiones de GD basadas en RES a una red de distribución conocida como fuentes de energía distribuida (DES). Por lo tanto, se desarrolla el concepto de microrred (MG), que se define como un conjunto de DES y cargas interconectadas dentro de límites eléctricos claramente delineados que funcionan como una sola red, es un sistema de energía a pequeña escala con un grupo de cargas y generadores distribuidos que operan juntos a través de software y dispositivos de administración de energía que actúan como una sola entidad controlable con respecto a la red; las RES se combinan con los generadores de distribución (DG) y los sistemas de almacenamiento de energía (ESS) existentes. [34]

3. SISTEMA DE PRUEBAS

El sistema de pruebas empleado en este trabajo de grado está basado en [44]. En este proyecto se modela y se controla una topología Híbrida Serie (Series Hybrid, SH)

alimentado por un arreglo fotovoltaico compuesto por dos ramas paralelo, cada una con dos paneles en serie. Para ello se usa un sistema de procesamiento de energía, el cual corresponde al convertidor DC-DC Buck-Boost de inductores acoplados con red de amortiguación y al convertidor DC-AC o inversor trifásico de tres ramas. Cada una de las partes de este sistema se describen a continuación:

- Modelo de un convertidor DC-DC Buck-Boost de inductores acoplados con rama de amortiguación: es un convertidor de modo conmutado donde el voltaje de salida del convertidor puede ser mayor o menor al voltaje de entrada. Entre las ventajas del uso de este tipo de convertidor se encuentran la alta eficiencia de conversión de potencia y poder controlar tanto tensiones como corrientes de entrada y salida. Además, tiene la posibilidad de funcionar en tres modos diferentes dependiendo de las tensiones que se tenga a la entrada y a la salida. En el primer modo funciona como reductor (Buck) donde el voltaje de la entrada es mayor al de la salida ($V_g > V_o$); el segundo modo funciona como elevador (Boost) donde el voltaje de entrada es menor que el voltaje de salida ($V_g < V_o$) y el tercer modo, corresponde al modo Buck-Boost donde el voltaje de entrada es aproximadamente igual al voltaje de salida ($V_g = V_o$)
- Convertidor DC-AC: es el inversor trifásico, consiste en seis interruptores de potencia y seis diodos de libre circulación, cada una de las ramas se forman mediante dos interruptores de potencia (Q1-Q6) conectados en paralelo con los diodos (D1-D6) que garantizan la continuidad de la corriente de la carga a alimentar. Las señales de control de Q1-Q6 de cada rama deben ser complementarias, de este modo se evita el cortocircuito en la fuente. A la entrada del inversor se encuentra una fuente de corriente continua mientras que, en el lado de corriente alterna cada convertidor se relaciona con la fase de la red. Se realizaron simulaciones de la etapa DC-DC, etapa DC-AC, junto con diferentes escenarios de prueba, donde se comprueba el correcto funcionamiento de los lazos propuestos.
- Etapa DC-DC: Consiste en un arreglo PV paralelo compuesto cada uno de dos paneles en serie con un filtro RC a la salida del panel. Luego, se encuentra un filtro RC a la entrada del convertidor puesto que este permite lograr el desacoplo de Interferencias Electromagnéticas (Electromagnetic Interferences, EMI's). Seguido a este, se presenta el convertidor DC-DC, el cual se encarga de controlar el lazo de extracción de máxima potencia del panel, este convertidor modular permite regular la tensión de operación o tensión nominal de la batería y a su vez, permite proteger la máxima estimación del estado de carga (State Of Charge, SOC) de la batería.

Finalmente, se modela la batería con su correspondiente circuito serie RC, luego, se conecta en cascada un segundo convertidor modular, con el fin de controlar y proteger la batería con el SOC mínimo y la tensión de salida del bus DC. En el bus DC se adiciona un elemento serie RC, en lugar de ser capacitivo puro, con la finalidad de obtener una cancelación algebraica en el modelo de impedancia del mismo y compensar su polo adicional El subcircuito del Buck-Boost consiste en una combinación de una etapa Buck con una etapa Boost en cascada, con

inductores de entrada y salida acoplados magnéticamente donde las entradas de este bloque corresponden a los pulsos $u1$ y $u2$ necesarios para activar los MOSFET y la tensión de entrada del convertidor V_{in+} mientras que, las salidas del bloque corresponden a la medición de tensión a la entrada y la salida del convertidor (V_{ig} y V_{io}) y la tensión de salida del convertidor V_{o+} .

- Etapa DC-AC: Para acoplar la etapa DC-DC con la red se hace necesario el uso de un convertidor DC-AC o inversor que consta de dos etapas, la primera es la etapa de potencia que abarca una fuente DC de 48V, con la finalidad de emular el comportamiento de regulación de la tensión del bus DC $V_o=48V$, de esta manera se reduce tiempo de computo al realizar la correspondiente simulación, el diagrama de bloques del inversor y el equivalente de red trifásico fijado a un valor de 230V de línea y la segunda etapa, corresponde al subcircuito de control que permite lograr la conexión en sincronía con el equivalente de red.

Para la elaboración del presente trabajo de grado, se ha empleado un modelo simplificado de la batería, este es capaz de simular un comportamiento adecuado en el sistema. Cuando la microrred se encuentre conectada a la red (On-grid) el esquema de gestión de energía diseñado permite suministrar parcialmente o en su totalidad la energía requerida por la carga en los casos en que la irradiancia del arreglo fotovoltaico disminuya.

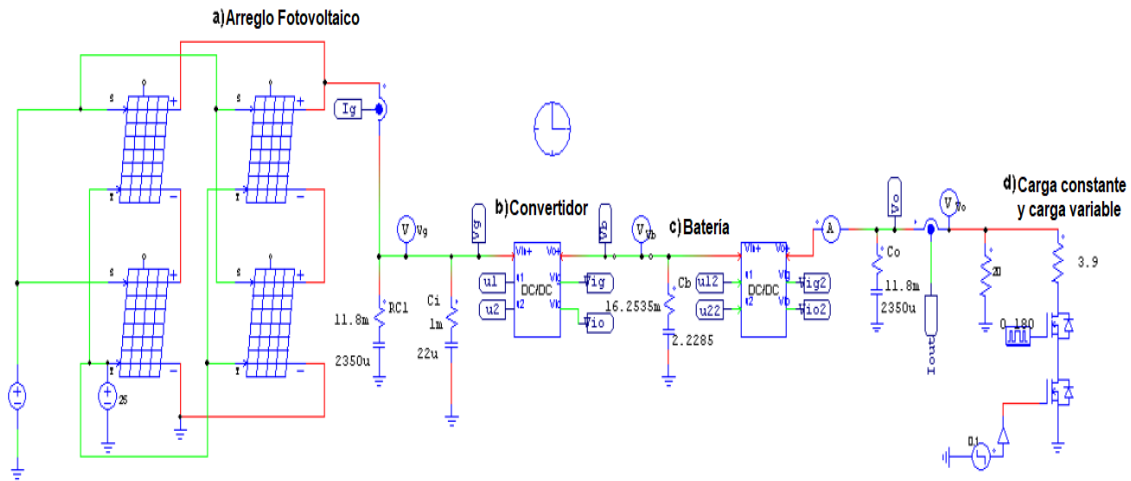


Figura 1: Circuito de Pruebas

Para los resultados presentados en este documento se ha hecho una adaptación del sistema descrito a una zona del Departamento del Cauca. La zona de donde se obtienen los datos para simular es un resguardo indígena, que se encuentra ubicado en la parte Nororiental del Municipio de Timbiquí, esta zona limita con el río Saija, esta región indígena es rica en biodiversidad, abundancia en flora y fauna gracias a sus manglares y fuentes hídricas; posee condiciones climatológicas de alta humedad, nivel de salinidad medio, y temperatura media. A partir de la georreferenciación de la localidad se hace un cálculo promedio anual de parámetros importantes como los son la radiación

solar, la temperatura y la humedad; parámetros tomados de las entidades IRENA, NASA, UPME. Los datos promedio son: radiación solar varía entre 3 a 4 [kWh/m² /d], temperatura de entre 20 y 25 °C y la humedad en 80 %.

Por sus características se ha establecido el problema, esta zona no tiene una fuente estable de electricidad, sin energía eléctrica las comunicaciones no son posibles, afectando la educación de la región y sin la capacidad de preservar los alimentos, por esto se originan pérdidas tanto para el consumo como la venta de moluscos y pescados, proporcionados por sus recursos hídricos, además de posibles enfermedades al descomponerse los alimentos. Los pobladores indican que estas zonas están dedicadas a la conservación ambiental, para ellos son sagradas y están ligadas a su alimento principalmente; después de analizar estas características y con el objetivo de no afectar de forma negativa a la población local se resalta que no es favorable la opción de utilizar la energía eólica ya que no se tiene una buena disponibilidad del viento, tampoco se podrían utilizar sus recursos hídricos, si se interviene en estos recursos se pueden causar impactos afectando la alimentación, el comercio y transporte en la zona; es por esto que el proyecto que se ha desarrollado esta basado en energía solar como fuente no renovable; de esta manera no se afectan estas zonas de conservación de la comunidad, debido a que su intervención en el medio ambiente es muy baja, además se utilizaron los lugares construidos por lo cual no se realiza un impacto a la base cultural de la comunidad.

Para aclarar la elección del circuito previamente mencionado en [45] se describe la implementación de un sistema fotovoltaico para brindar electricidad en áreas aisladas y asegurar la sostenibilidad de los proyectos de electrificación rural específicamente el proyecto de Electrificación para cadenas de frío en el resguardo indígena “Calle Santa Rosa”, ubicado en la zona rural de Timbiquí en el departamento del Cauca en Colombia. En el proyecto se realiza el abordaje del proceso productivo asociado a la cadena frigorífica entre otros servicios, se identifica que el sistema solar ubicado tiene una capacidad de 1.5 Kw en energía AC y DC, pero se resalta que el centro de refrigeración es exclusivamente en DC.

Además se resalta que la economía de la región está basada en su agricultura, artesanía, caza, pesca y aprovechamiento forestal, se destacan las necesidades que se podrían mejorar al tener acceso a la energía eléctrica. Por ende el uso de los recursos renovables para generar energía eléctrica para la población serían el ofrecer electricidad para mejorar sus condiciones de educación y también la importancia de la refrigeración de alimentos, pues se ayuda a la comunidad con la conservación de alimentos tanto para el consumo como para el comercio.

Para mostrar con mayor claridad los datos de la zona, se ha consultado los Atlas en línea del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), los cuales poseen datos actualizados necesarios para el correcto análisis de la región. A continuación se presentan los mapas de radiación solar tanto en Colombia como en la zona seleccionada (Figura 2 y 3)

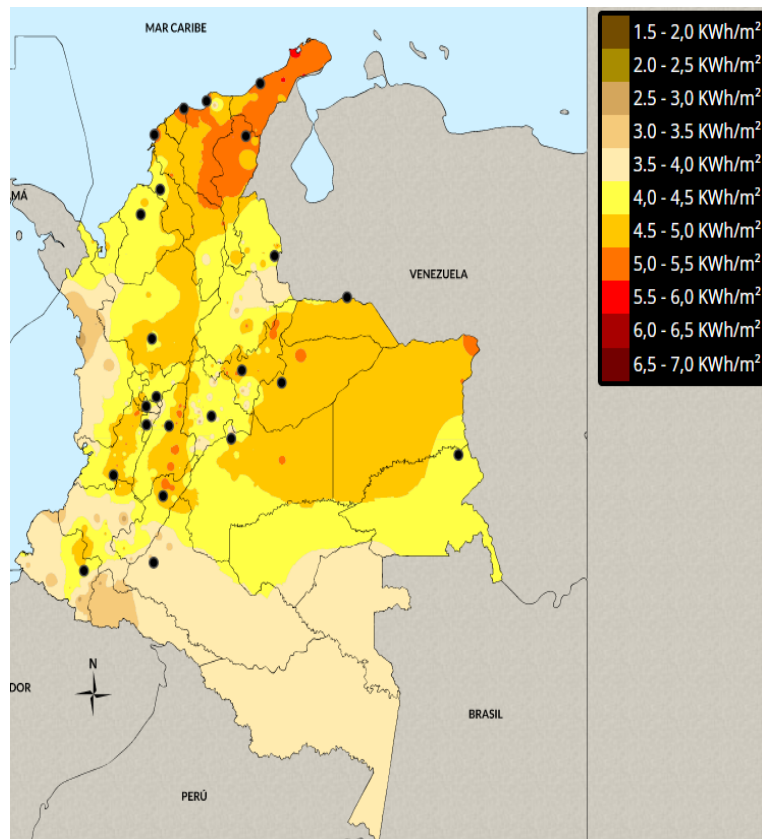


Figura 2: Radiación Solar en Colombia

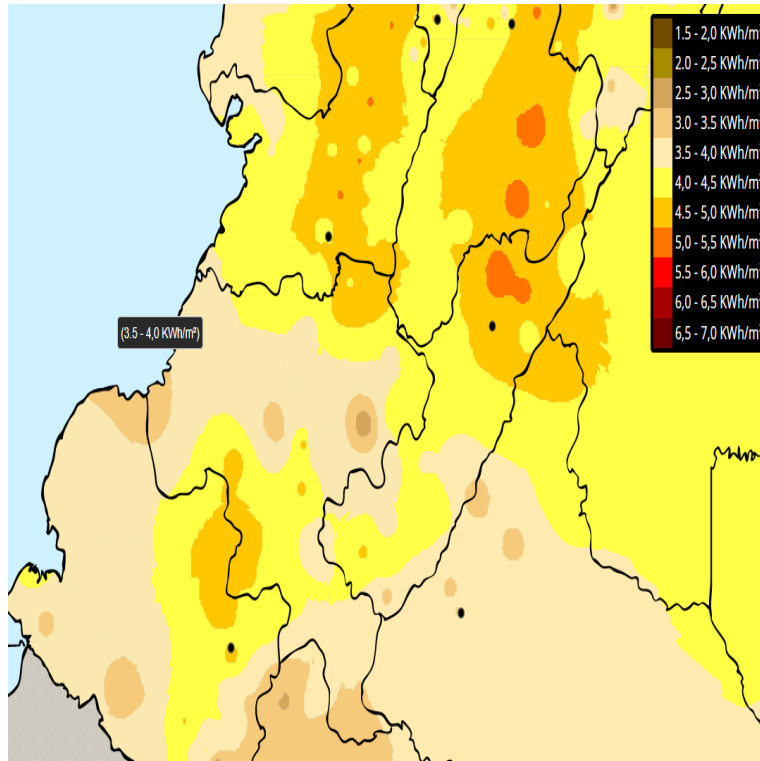


Figura 3: Radiación Solar en Resguardo Indígena

En las Figura 4 y 5 se presentan los mapas temperatura tanto en Colombia como en la zona seleccionada

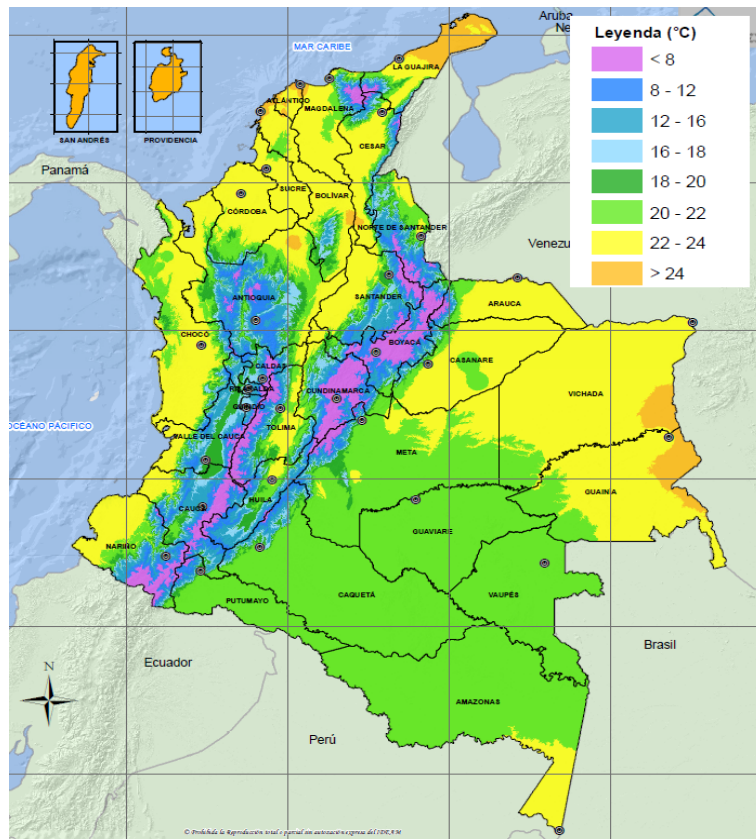


Figura 4: Temperatura en Colombia

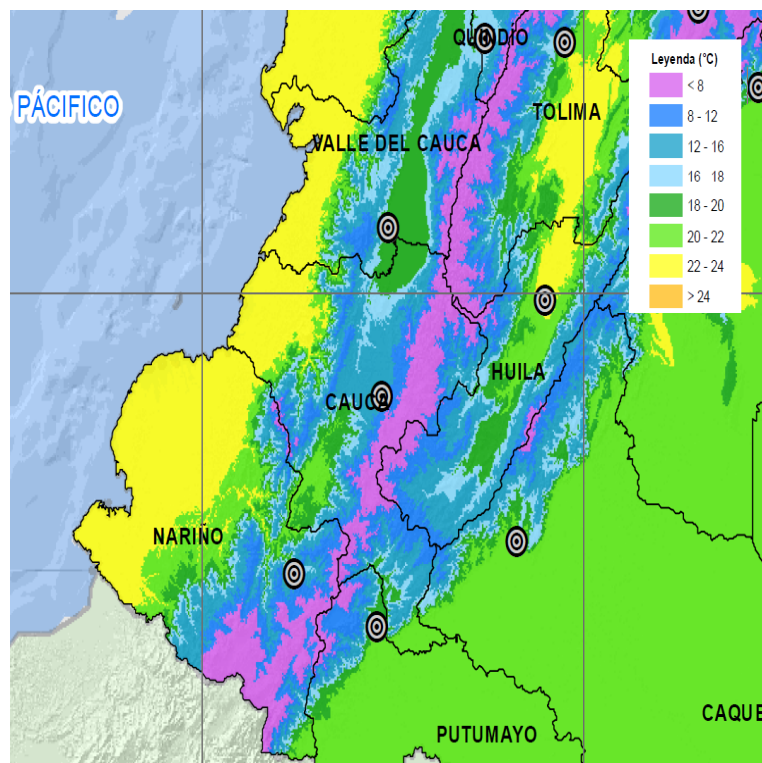


Figura 5: Temperatura de la zona seleccionada

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presenta una descripción de los resultados obtenidos los cuales dan una guía para analizar la calidad de potencia de un sistema a partir de técnicas de análisis frecuencial.

En [46] se describe como las Fuentes de Generación de Energía Renovable presentan nuevos desafíos relacionados con problemas de calidad de energía, como la estabilidad del voltaje y la frecuencia, por eso se desarrolla e implementa la metodología para el análisis de señales en sistemas de potencia que involucran fuentes de energía renovables no convencionales.

Una de las estrategias más comunes de uso en los sistemas de potencia para el análisis de señales ha sido la Transformada Rápida de Fourier (en inglés FFT), pero tiene la limitación de resolución en el dominio del tiempo, se necesitan nuevos métodos que permitan tener buena resolución tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, involucrando el concepto de frecuencia instantánea para una detección precisa y rápida de perturbaciones, para resolver este problema ha surgido la transformadas de Hilbert-Huang (HHT).

La idea básica de un análisis tiempo-frecuencia, es el diseño de una estrategia que pueda describir las características de una señal en ambos dominios, de manera que sea posible detectar la presencia de cualquier componente frecuencia y el instante de tiempo en el que se presenta. La Transformación de Hilbert Huang comprende la Descomposición de modo empírico (EMD) y la Transformación de Hilbert (HT) que hace posible el cálculo de la Frecuencia Instantánea (IF). La noción de IF no se ha explorado a fondo en el análisis de los sistemas de energía eléctrica y, por esta razón, se exploró la aplicación de HHT en los sistemas de potencia moderno bajo la creciente penetración de las plantas de energía fotovoltaica. La HHT es un método adaptativo para el análisis en ambos dominios, que permite ser utilizada para trabajar sobre señales con el comportamiento previamente descrito, basado en el principio de frecuencia instantánea, buscando una detección precisa e inmediata de las perturbaciones. La HHT tiene la habilidad de detectar patrones de comportamiento con mayor facilidad en señales con fuertes oscilaciones, en un menor tiempo computacional y obtener una mayor eficiencia comparado con los demás métodos convencionales de análisis para este tipo de señales.

Con la información mostrada por [46] se realiza una descripción breve de las Técnicas de Análisis en Señales Eléctricas

4.1. Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Los fenómenos presentados en el Sistema Eléctrico de Potencia se monitorean de manera discreta, como un vector de valores a cierta frecuencia de muestreo. La Transformada de Fourier no tiene la capacidad de analizar funciones discretas, es por ello que surge una modificación a su algoritmo, la cual es la Transformada Rápida de Fourier (FFT) avanza

un algoritmo computacional eficiente para convertir señales del dominio del tiempo en el dominio de frecuencia. Una variación de la FFT es la Transformada Discreta de Fourier (DTF)

4.2. Transformada de Hilbert-Huang (HHT)

La HHT de una función $x(t)$ es un concepto presentado por Norden E. Huang. Se creó inicialmente para estudiar las olas oceánicas, que son de naturaleza no estacionaria y no lineal, pero su aplicación se ha extendido a otros campos que presentan las mismas características. La HHT consta de dos partes importantes: Descomposición Empírica de Modos (EMD) y la Transformada de Hilbert (HT). Descomposición Empírica Modal (EMD): Su objetivo es descomponer la señal no lineal y no estacionaria $x(t)$ en una suma finita de modos independientes llamados Función Intrínseca de Modos (IMF), estos obtienen de la señal original y satisfacen dos condiciones:

1. El número de cruces extremos y el número de cruces por cero deben ser iguales o diferentes como máximo en uno.
2. En cualquier punto, el valor medio de la envolvente definida por los máximos locales y la envolvente definida por los mínimos locales es cero.

El algoritmo EMD para la señal $x(t)$ se puede resumir de esta manera:

1. Identifique todos los extremos (máximos y mínimos) en $x(t)$.
2. Calcule la envolvente superior $e_u(t)$ y la envolvente inferior $e_l(t)$ por interpolación (splines cúbicos).
3. Determine la media local como $m(t) = (e_u(t) + e_l(t))/2$.
4. Obtenga el residuo $r(t) = x(t) - m(t)$.
5. Iterar hasta el número de extremos = número de cruce por cero ± 1
6. Reste la función de modo intrínseco (IMF) obtenida de la señal original.
7. Itere en el residuo hasta que $r(t)$ se vuelva monótono.

4.3. Transformada de Hilbert (HT)

Nace como solución al problema de funciones holomórficas, desarrollada por David Hilbert en 1905. Define la convolución de una señal $x(t)$ y $1/(phi * t)$. De otra manera, se puede definir como la respuesta de la señal $x(t)$ al impulso de $1/(phi * t)$.

4.4. Frecuencia Instantánea (IF)

En la práctica, las señales no son verdaderamente sinusoidales y el concepto de frecuencia debe analizarse con mayor profundidad. En general, las señales procedentes del mundo físico se han analizado utilizando la transformada de Fourier, que proporciona valores de amplitud y frecuencia invariables en el tiempo. El principio de incertidumbre heredado asociado con la transformación de Fourier hace que el concepto de una frecuencia instantánea sea difícil de definir porque el principio de incertidumbre es una consecuencia de la transformación de Fourier (o cualquier otro tipo de transformación integral). Si no se aplica una transformación integral en el cálculo de frecuencia, no estén limitados por el principio de incertidumbre.

En el análisis de Fourier, la frecuencia de una señal se derivaría de su periodo de tiempo, que es el tiempo necesario para completar un periodo de tiempo estacionario. Sin embargo, para una forma de onda no estacionaria, la frecuencia sería difícil de definir. Otra forma de definir la frecuencia es como la velocidad angular que corresponde con la velocidad de cambio de su fase. Si es posible definir una fase única para una señal, sería posible calcular su tasa de cambio y su frecuencia. La frecuencia obtenida de esta manera es única en cualquier instante en el tiempo y se llama frecuencia instantánea. Es posible definir solo una frecuencia instantánea para una señal en cualquier momento. Este método tiene un problema con las señales de múltiples componentes y, por lo tanto, requiere una descomposición previa, donde se puede recurrir a EMD.

IF se calculó a partir de Señales Analíticas (AS) a través de la transformada de Hilbert. El HT maneja mal las señales de múltiples componentes. HHT estima la frecuencia instantánea y la amplitud de una señal dada y para hacer esto, primero descompone cualquier señal en mono componentes llamada función de modo intrínseco (IMF) mediante el uso de la descomposición en modo empírico (EMD).

4.5. Espectro de Hilbert (HS)

El objetivo al desarrollar HHT es tener una herramienta para gestionar el paradigma de datos de tiempo-frecuencia-energía. Una forma de expresar la no estacionariedad es encontrar la frecuencia instantánea y la amplitud instantánea. El análisis espectral es una herramienta poderosa para analizar las características estadísticas de los datos estocásticos. Un espectro de Hilbert es una representación 3D de la amplitud y frecuencia instantáneas en función del tiempo para cada IMF.

Las señales eléctricas observadas en los sistemas de energía modernos pueden ser lineales y no lineales, estacionarias y no estacionarias, periódicas y no periódicas, y esto se debe a la variabilidad de las fuentes de generación (energía eólica y solar) y al uso masivo de cargas no lineales y dispositivos electrónicos conectados. Es posible ver una aplicación para analizar la potencia activa y reactiva absorbida por diferentes tipos de cargas con generación convencional utilizando FT y HHT. El HHT permite la extracción de las propiedades características de las señales eléctricas, que no son identificables utilizando FFT. Al aplicarse diversos refinamientos del algoritmo EMD y una Trans-

formación de Hilbert local para extraer y caracterizar el comportamiento temporal en los sistemas de potencia. En bajas frecuencias, el algoritmo tiene un buen rendimiento. El método permite la extracción y caracterización automatizada del comportamiento modal temporal sin suposiciones previas sobre los procesos gobernantes que impulsan las oscilaciones y puede aplicarse a una amplia variedad de señales encontradas en los procesos oscilatorios del sistema de potencia.

La aplicación de la HHT puede detectar fallas en una red de distribución de energía eléctrica al obtener la frecuencia y amplitud instantánea de una señal, teniendo la capacidad de percibir y clasificar cualquier variación en tiempo real con una eficiencia del 93,4%. Se puede emplear la HHT con técnicas de inteligencia artificial que permiten generar métodos de reconocimiento y clasificación en tiempo real, con la capacidad de actuación independiente en el sistema y una eficiencia del 95,3%.

Con esas descripciones y análisis [46] afirma que el HHT tiene una mejor eficiencia informática, lo que significa que el HHT es más adecuado para el análisis de señales de gran tamaño. Se destaca que una buena selección de IMF permite tener una nueva señal sin ruido y con los principales componentes de frecuencia. Esto podría aplicarse para suavizar las fluctuaciones de potencia reactiva de los inversores fotovoltaicos en las estrategias convencionales de control de voltaje. Finalmente, el uso del simulador digital nos permite garantizar que los resultados obtenidos puedan adaptarse en sistemas reales.

4.6. Gráficas Obtenidas del Sistema de Pruebas

A continuación se presentan las gráficas obtenidas mediante la simulación del sistema de prueba en el software PSIM bajo condiciones de irradiancia = 1000 [Wh/m² /d] y temperatura = 25 grados centígrados en el arreglo de paneles solares para t = 1 segundo. Posteriormente se mostrarán las gráficas obtenidas al utilizar algunas de las técnicas de análisis en señales eléctricas descritas previamente.

La Figura 6. corresponde a la potencia de salida del arreglo fotovoltaico (P_g), se evidencia que hay un pico que llega hasta los 910W, luego desciende rápidamente hasta 90W y se mantiene así hasta los 0.1 segundos, donde empieza a aumentar hasta los 400W y en los 0.4 segundos se estabiliza en 430W aproximadamente hasta el final de la simulación.

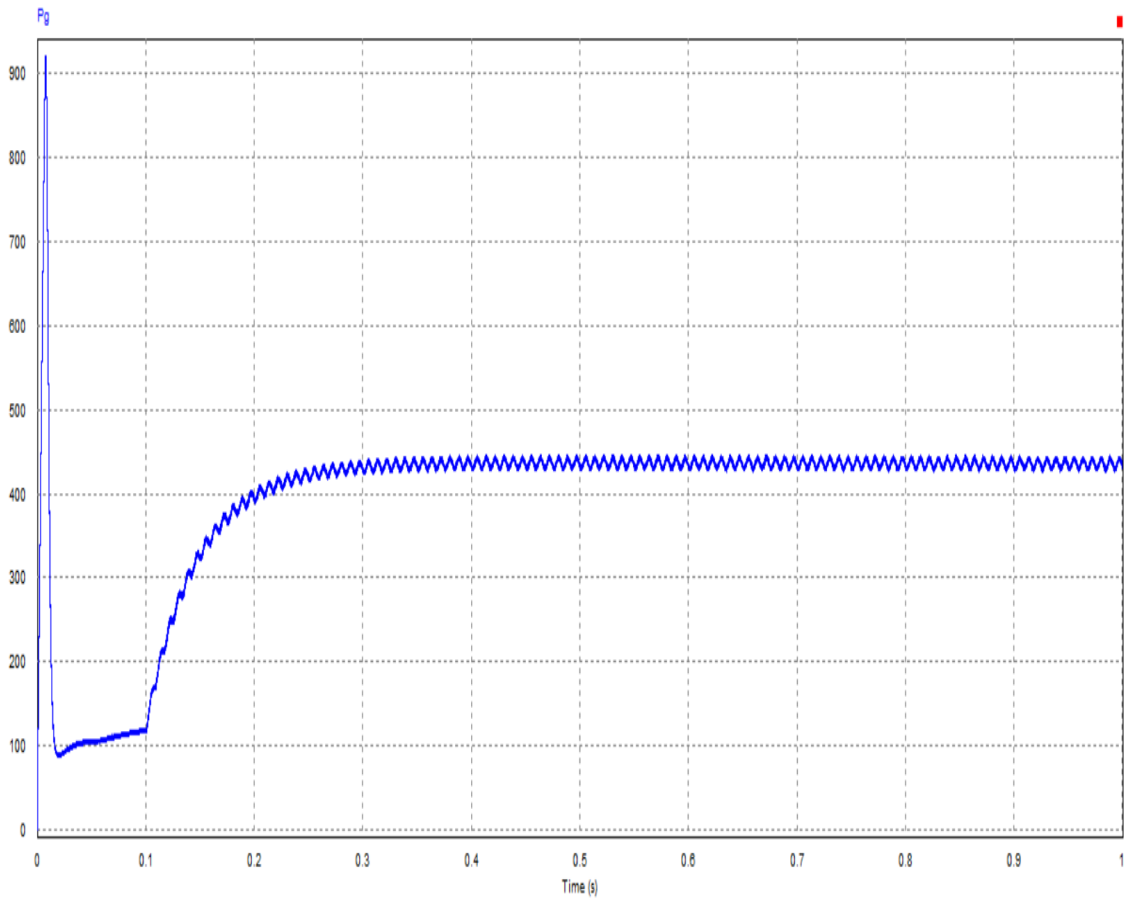


Figura 6: Potencia de Salida del Arreglo Fotovoltaico (P_g)

La Figura 7 representa la potencia de salida del sistema (P_{out}), en un principio muestra que se mantiene en los 120W durante el momento de 0.1 segundos, a partir de ese momento y por el resto de la simulación presenta una oscilación desde los 700W hasta los 120W.

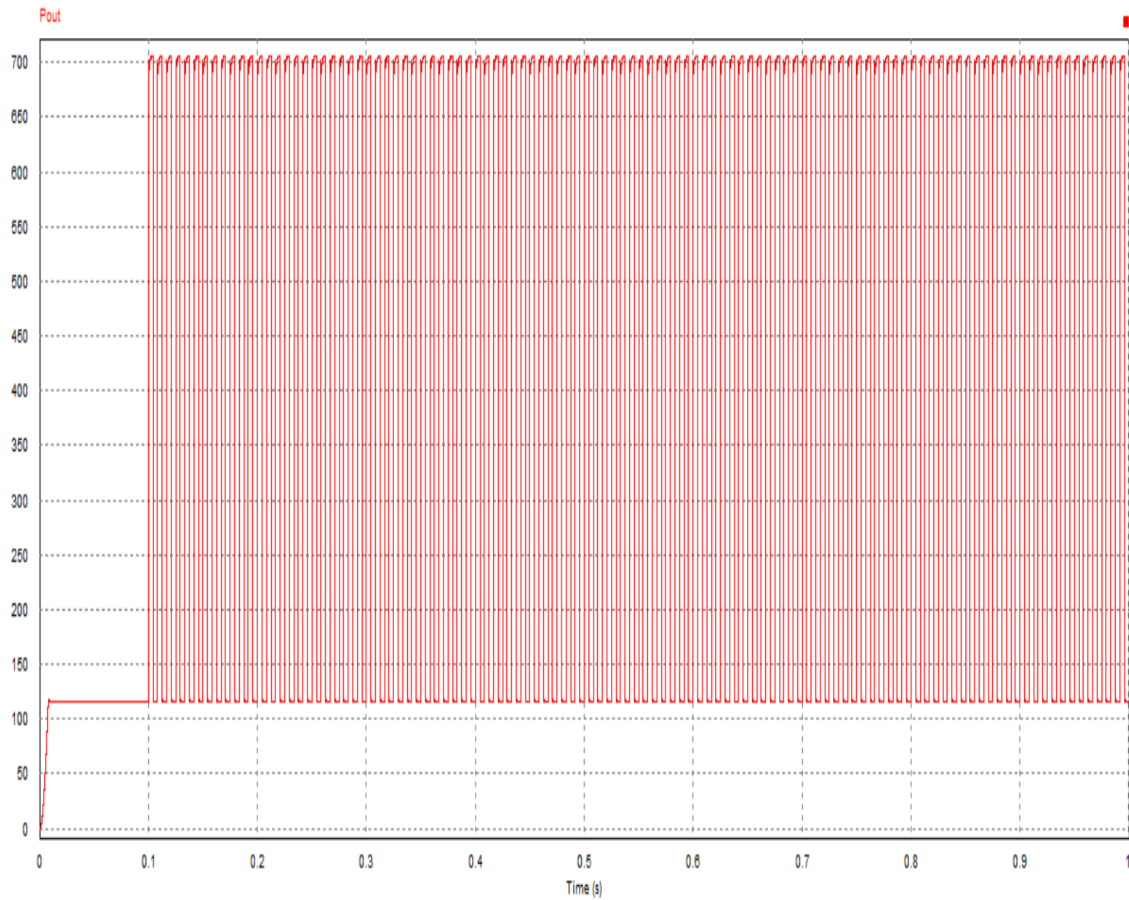


Figura 7: Potencia de Salida del Sistema (P_{out})

La Figura 8. representa la corriente en la batería (I_{cb}) en la cual se presenta un comportamiento oscilatorio, esto debido a la carga y descarga de la batería, cuando está entregando sus medidas son positivas y cuando se está cargando sus medidas son negativas, de esta manera se ve como la primera medida descendiendo hasta los $-17.5A$ y luego se mantiene oscilando entre $3.5A$ y $-5A$ hasta los 0.1 segundos, a partir de los 0.2 segundos se mantiene oscilando entre los $-13.5A$ y $10.4A$.

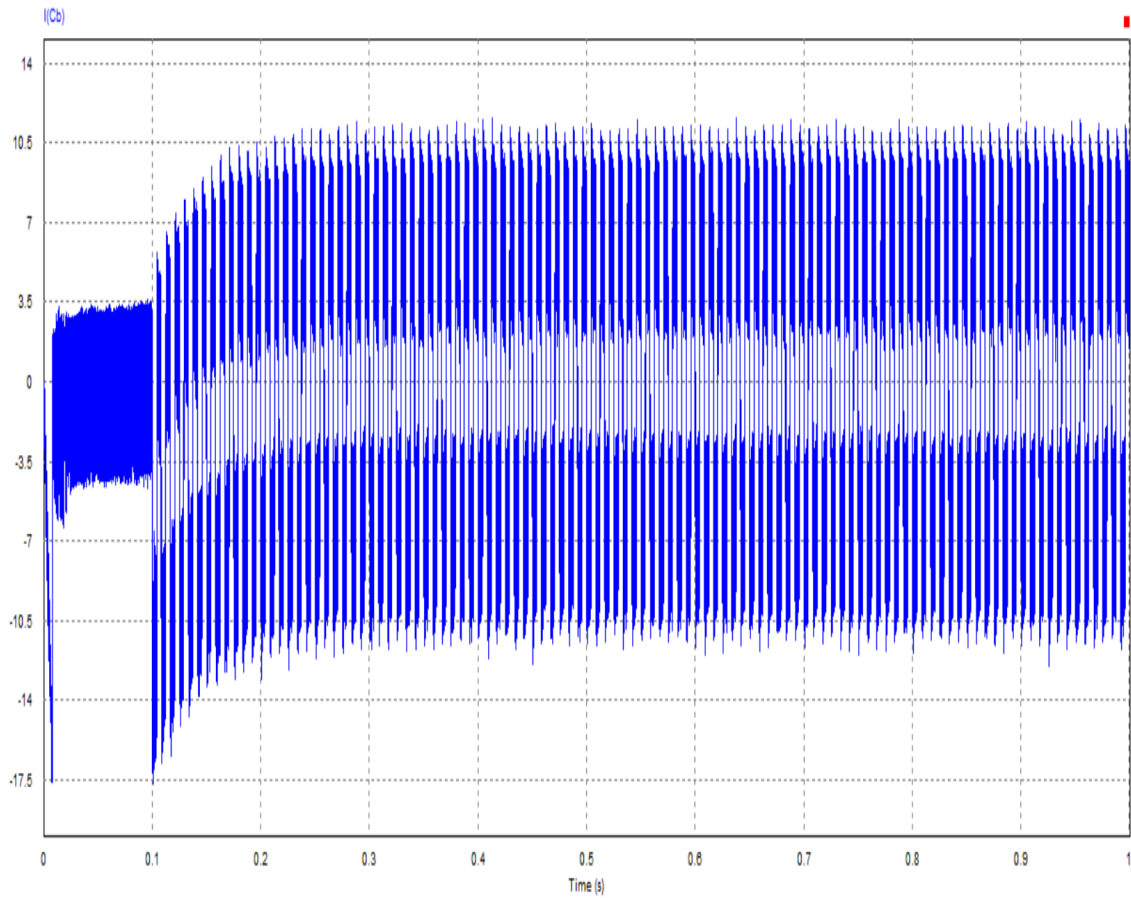


Figura 8: Corriente en la Batería (I_{Cb})

La Figura 9. Representa la corriente de salida del circuito, presenta un pico al rededor de 17.5A luego desciende y tiene un comportamiento oscilatorio entre 0 y 4A en el primer momento de 0.1 segundos, a partir de allí varia su amplitud entre 17A y 0.5A durante el resto de la simulación.

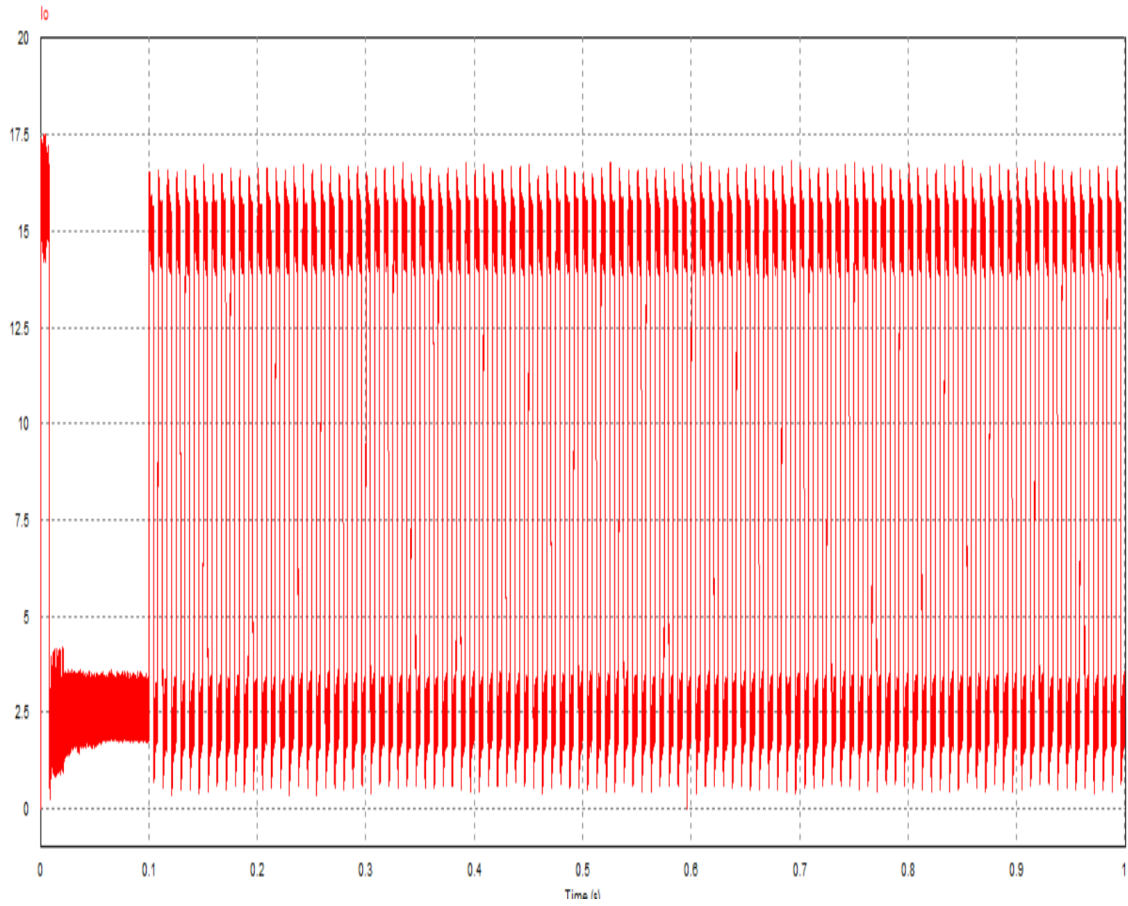


Figura 9: Corriente de Salida (I_o)

La Figura 10. Muestra el comportamiento del voltaje de salida del sistema, el cual se mantiene, desde el inicio de la simulación, con un comportamiento oscilatorio al rededor de los 48 VDC.

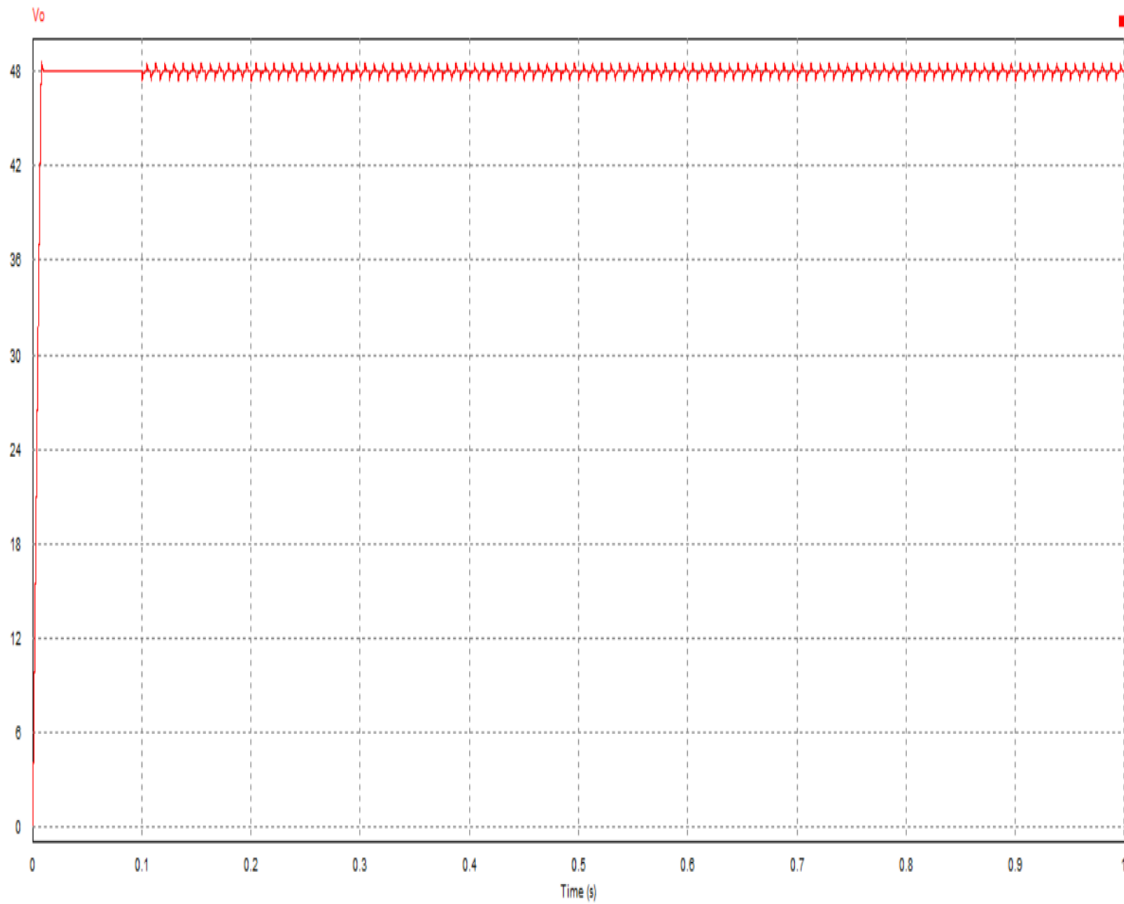


Figura 10: Voltaje de Salida (V_o)

La Figura 11 muestra un aumento hasta 48V aproximadamente, hasta el momento 0.1 segundos oscila entre 48V y 47.9V aproximadamente, luego de ese tiempo oscila entre 48V y 47.6V hasta el final de la simulación.

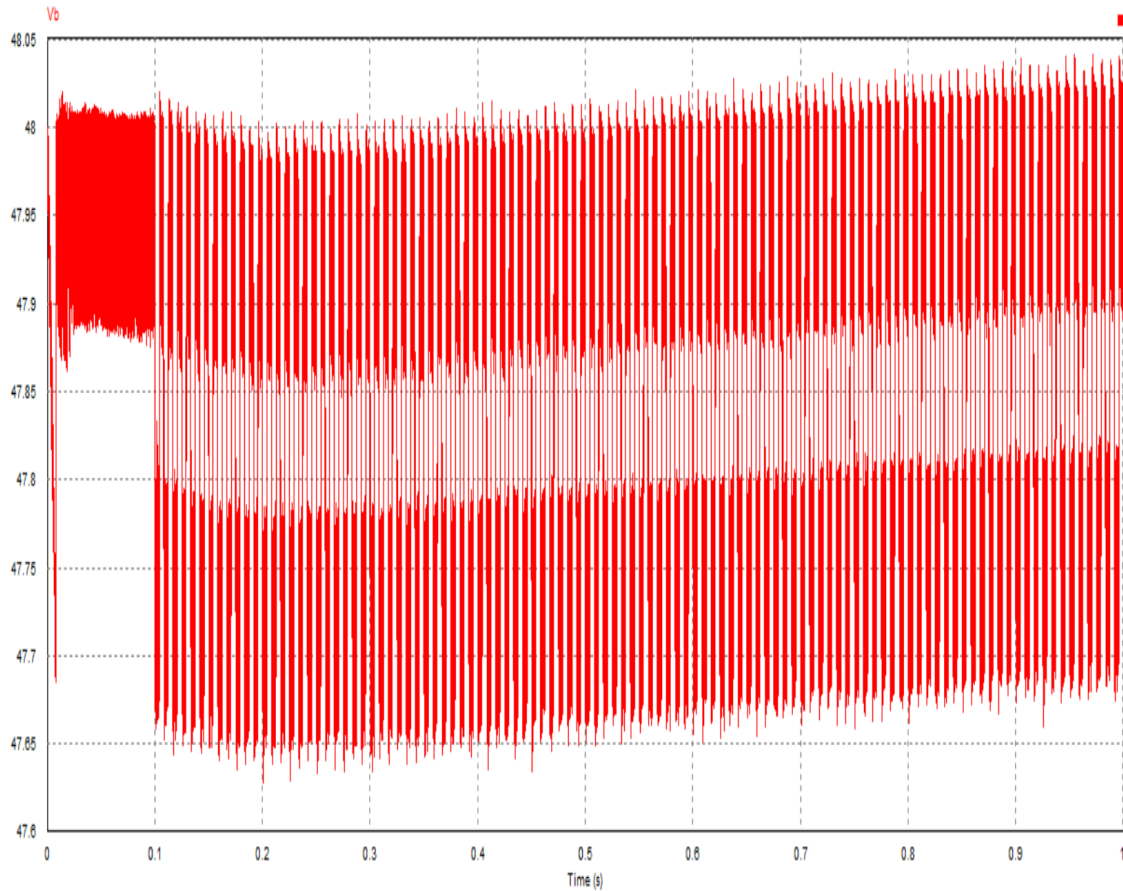


Figura 11: Voltaje en la Batería (V_b)

La Figura 12 representa el voltaje en el arreglo fotovoltaico; tiene un comportamiento creciente hasta 73V y luego decae para establecerse en 70V donde permanece constante desde el segundo 0,2.

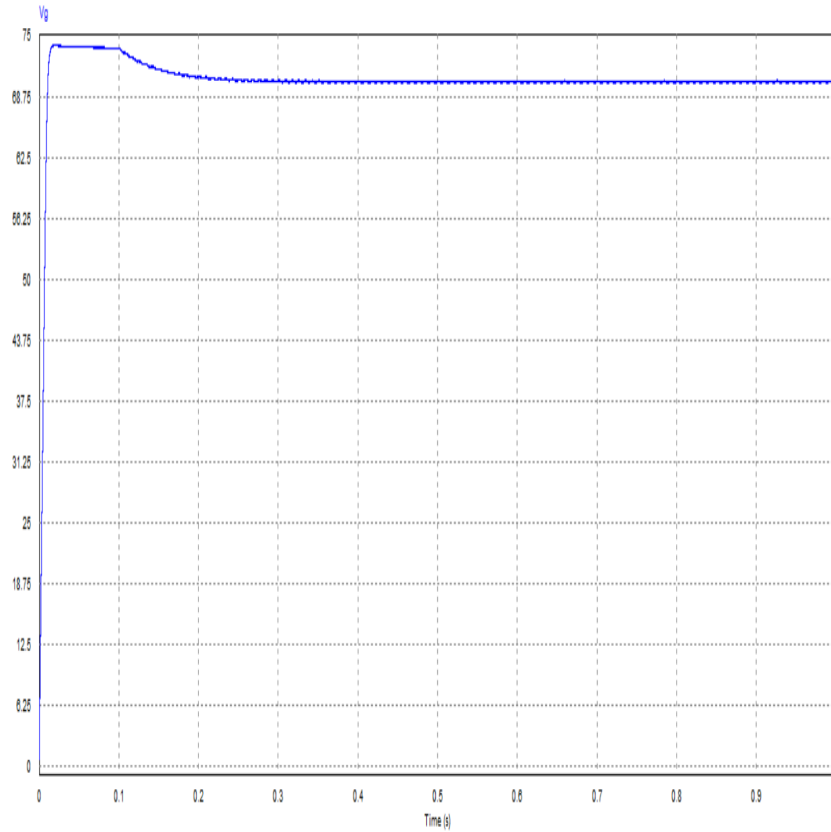


Figura 12: Voltaje en el arreglo fotovoltaico (Vg)

Con la simulación del sistema en el software PSIM los datos obtenidos son ingresados al sistema de cómputo Matlab en donde se procede a aplicar la transformada de Hilbert-Huang la cual usa el método de descomposición del modo empírico (EMD) para descomponer una señal en funciones de modo intrínseco (IMF), para nuestro caso: la corriente de salida (I_o) Figuras 13, 14 y 15, el voltaje de salida (V_o) Figuras 18, 19 y 20, el voltaje en la batería (V_b) Figuras 23,24 y 25 y Voltaje de salida en arreglo fotovoltaico (V_g) Figuras 28, 29 y 30.

La Figura 13 permite visualizar el comportamiento de las señal original, el residuo y las 3 primeras IMFs de la señal I_o .

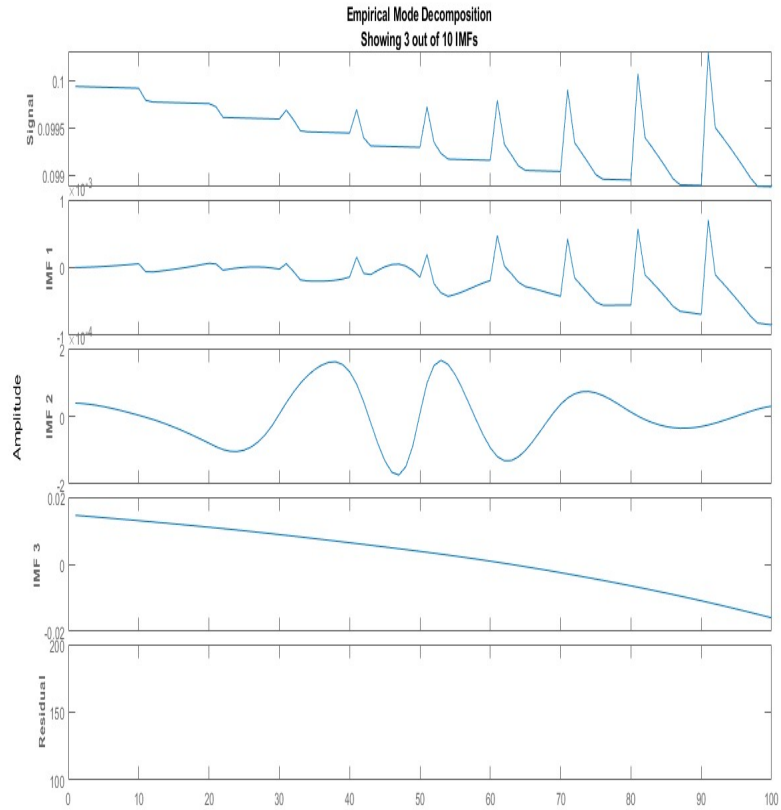


Figura 13: Descomposición en 3 IMFs de I_o

Para mostrar con mayor claridad las gráficas se han dividido, de esta manera en la Figura 14 se muestra como las primeras 5 IMFs tienen más ruido en la señal I_o

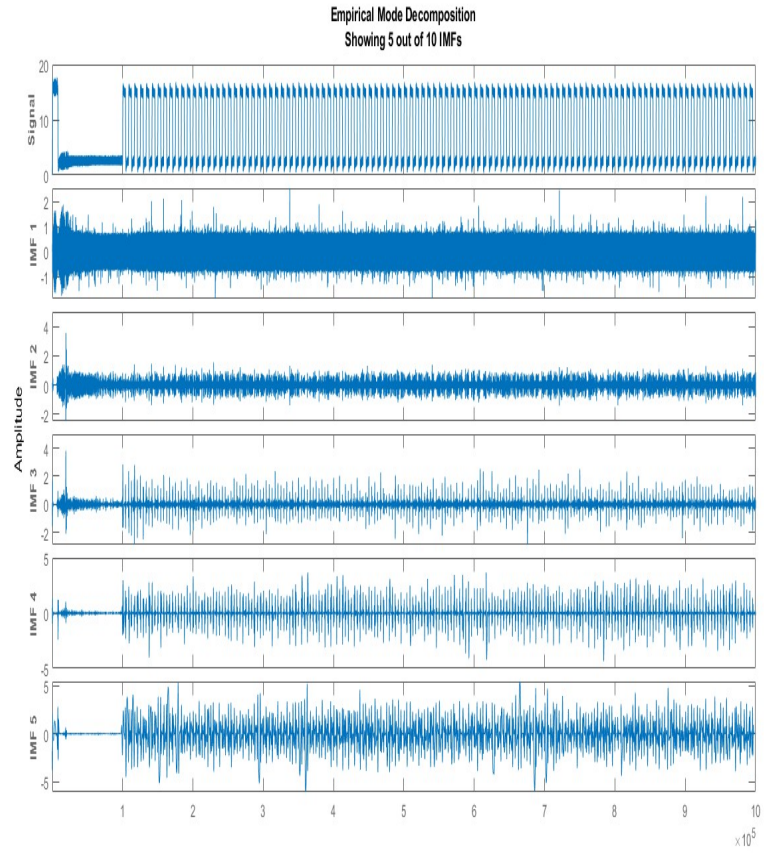


Figura 14: Descomposición en IMFs de I_o

En las 5 IMFs restantes en la Figura 15 se muestra que la señal se ha suavizado.

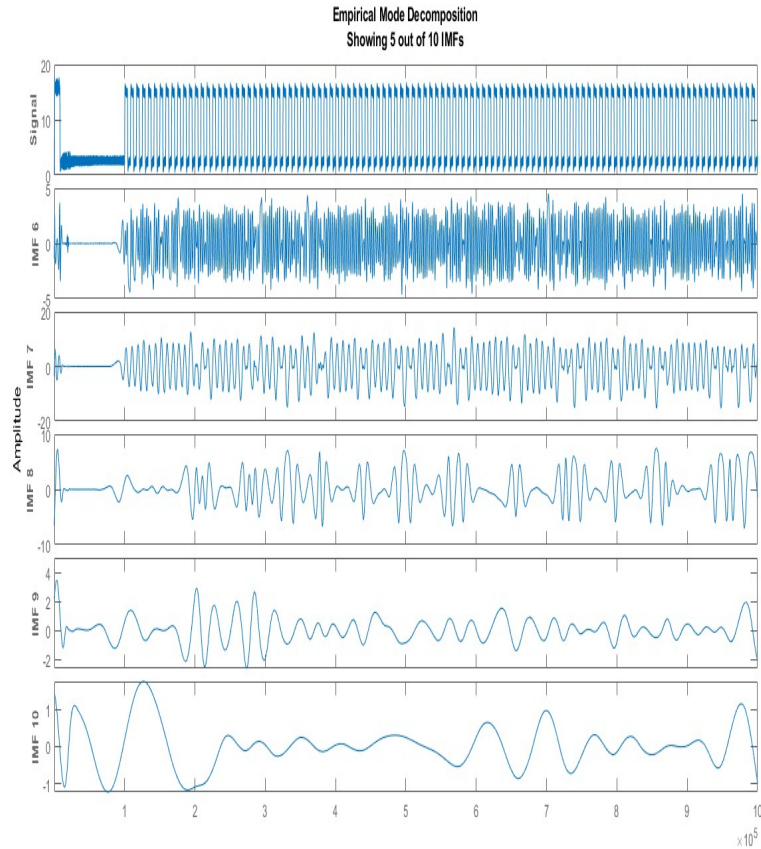


Figura 15: Descomposición en IMFs de I_o

La Transformada de Hilbert-Huang (HHT) es una forma de obtener la frecuencia instantánea de datos que se desean analizar, señales de I_o (Figura 16), V_o (Figura 21), V_b (Figura 26) y V_g (Figura 32). Para obtener las gráficas correspondientes nos remitimos al software Matlab.

En la Figura 16 corresponde al comportamiento de la señal de IF para I_o , la cual presenta un comportamiento decreciente desde los 70-80 Hz hasta lo 10 Hz aproximadamente, en un tiempo de 1.2 segundos.

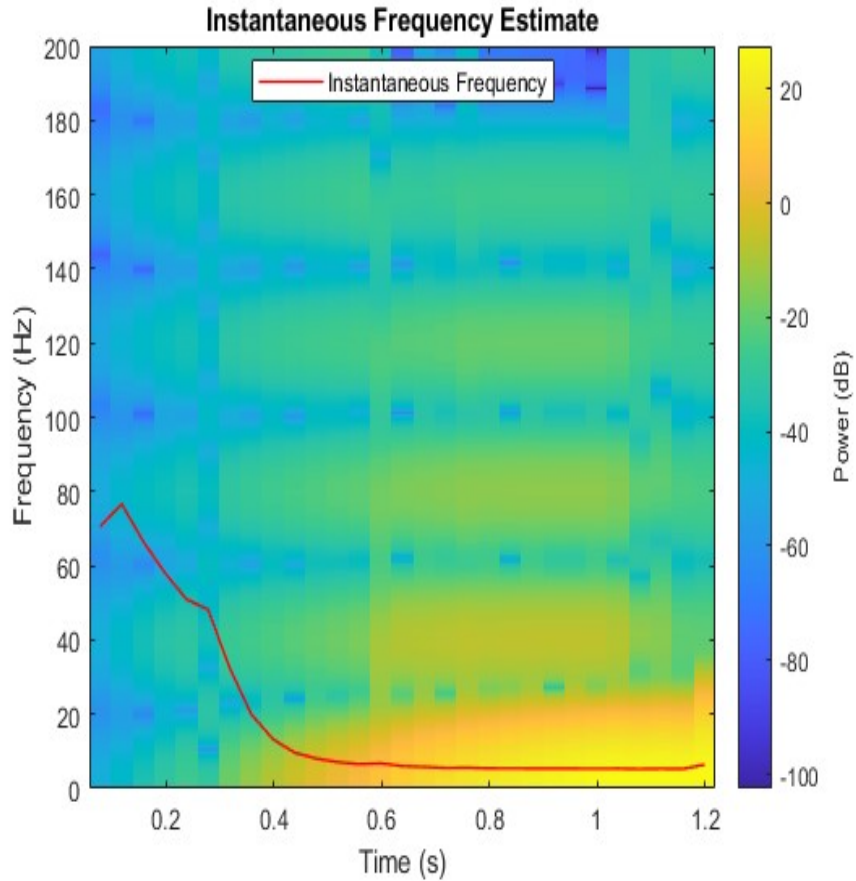


Figura 16: Frecuencia Instantánea de I_o

A continuación, se hace uso de la Transformada rápida de Fourier (FFT), este algoritmo implementa la Transformación Discreta de Fourier (DFT); en este proceso se descompone una señal en sus componentes espectrales individuales proporcionando información sobre su composición, los cuales son oscilaciones sinusoidales simples a frecuencias discretas, cuya amplitud y fase están determinadas. De esta manera se puede ver una señal en el dominio de la frecuencia. Se resalta que el FFT tiene dos parámetros centrales, los cuales pueden utilizarse para determinar otros parámetros de la medición.

1. La tasa de muestreo (fs) del sistema de medición: la cual indica la frecuencia con la que se muestrea la señal analógica que se va a analizar
2. El número seleccionado de muestreos: la longitud del bloque (BL) define la duración de la medición y la resolución de la frecuencia.

Con ayuda de Matlab es posible ajustar y visualizar las gráficas de FFT de acuerdo a los requerimientos de medición para las señales I_o (Figura 17), V_o (Figura 22), V_b (Figura 27) y V_g (Figura 32).

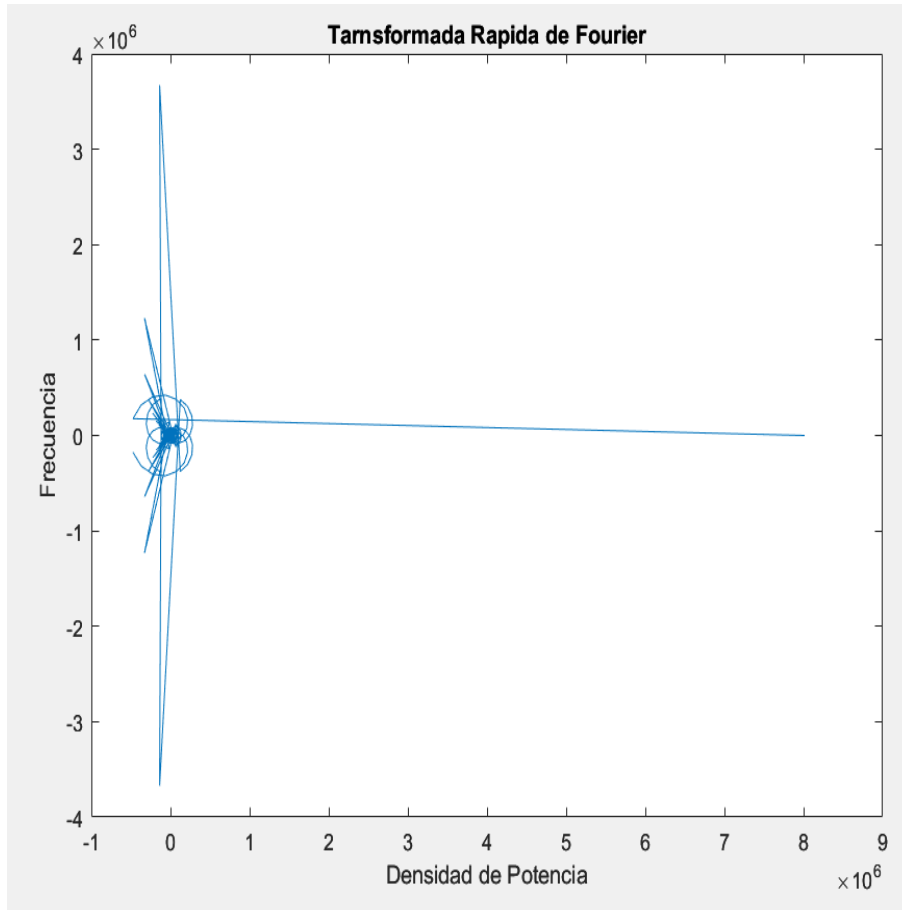


Figura 17: Transformada rápida de Fourier de I_o

La Figura 18 representa el comportamiento de la señal V_o descompuesta en las primeras 3 IMFs y el residuo.

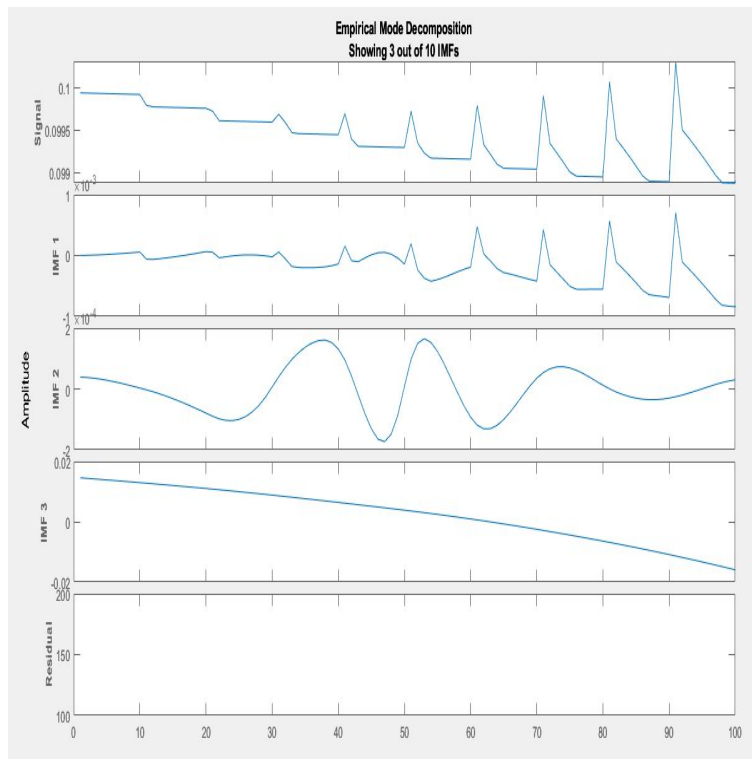


Figura 18: Descomposición en 3 IMF de V_o

La Figura 19. muestra que las primeras 5 IMFs tienen más ruido en la señal del voltaje de salida del sistema (V_o) que en las últimas 5 IMFs (Figura 20).

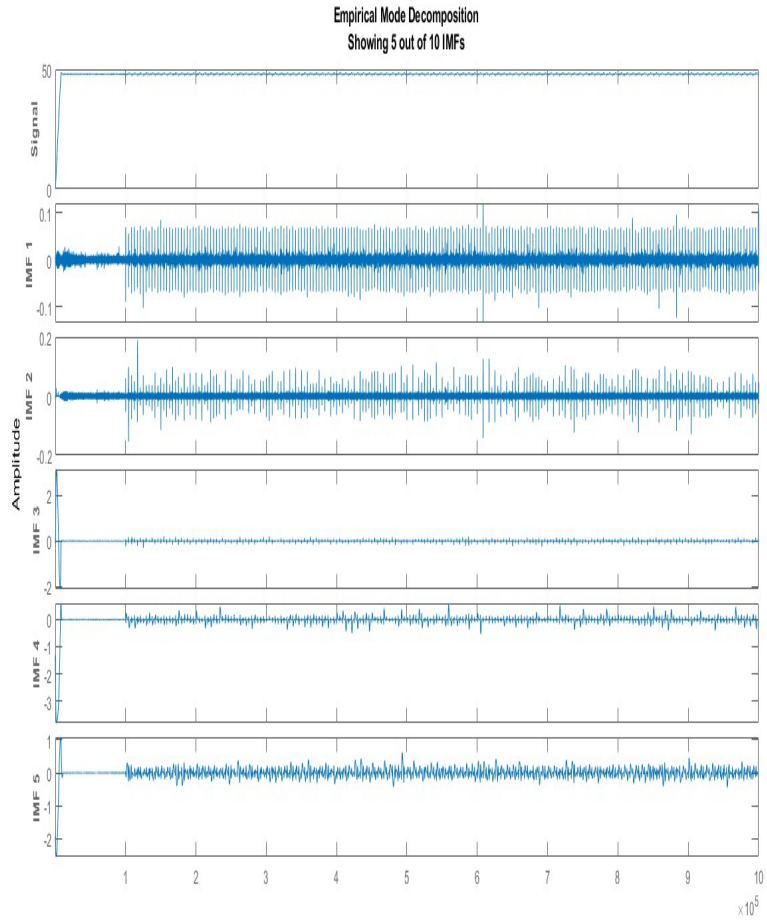


Figura 19: Descomposición de las primeras IMF de V_o

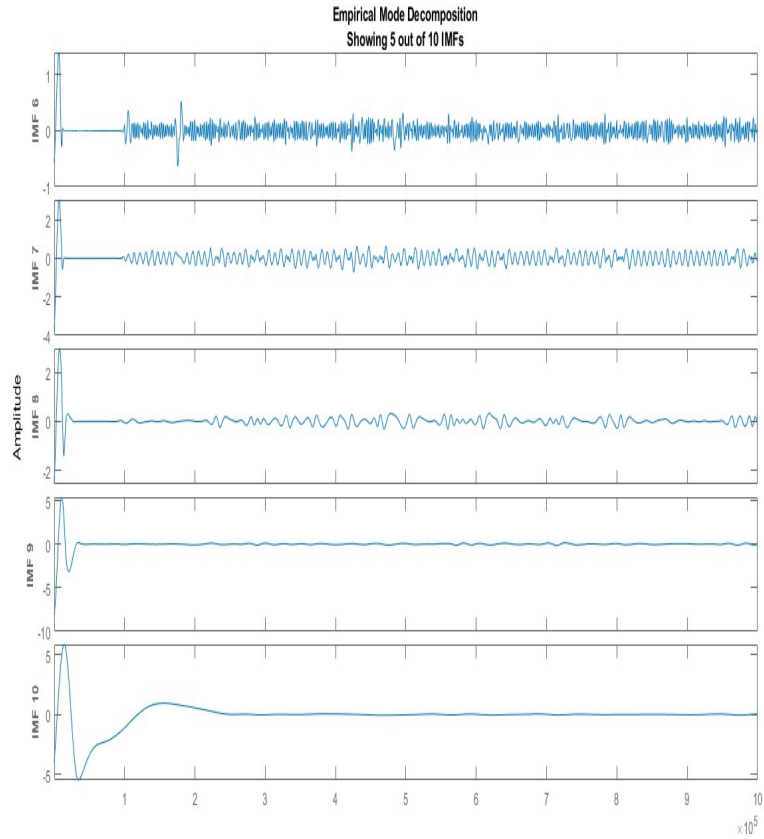


Figura 20: Descomposición de las ultimas IMF de Vo

En la Figura 21. se muestra la señal correspondiente a la frecuencia instantánea de los datos analizados de Vo.

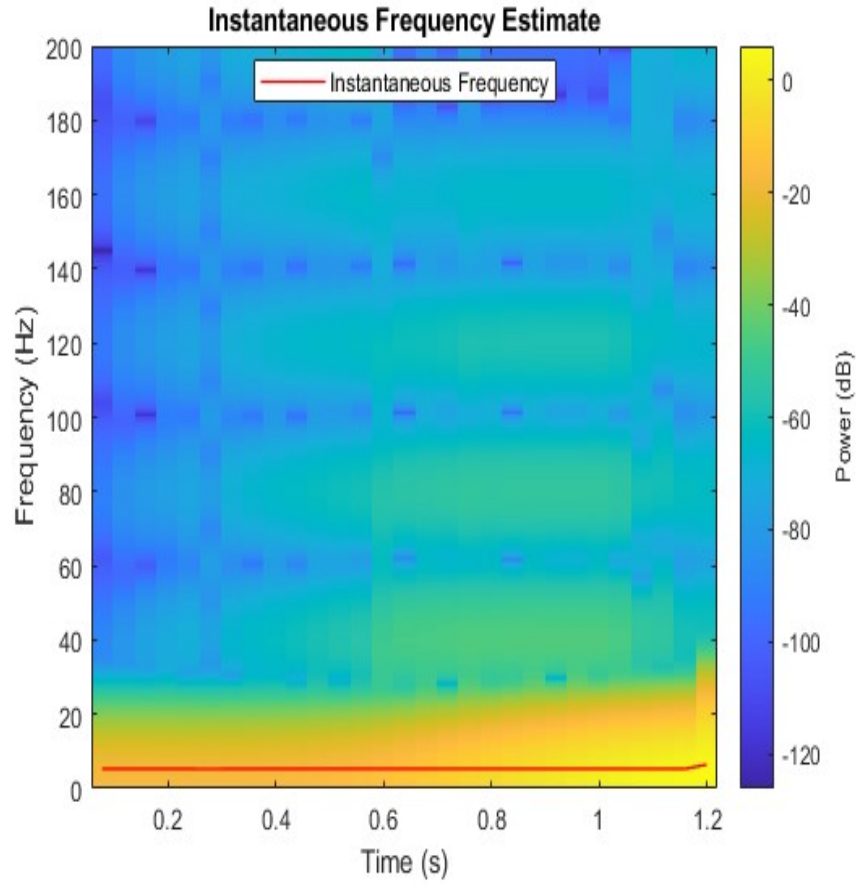


Figura 21: Frecuencia Instantánea de V_o

Con ayuda de Matlab es posible ajustar y visualizar las gráficas producto de aplicar la FFT a las señal de V_o .

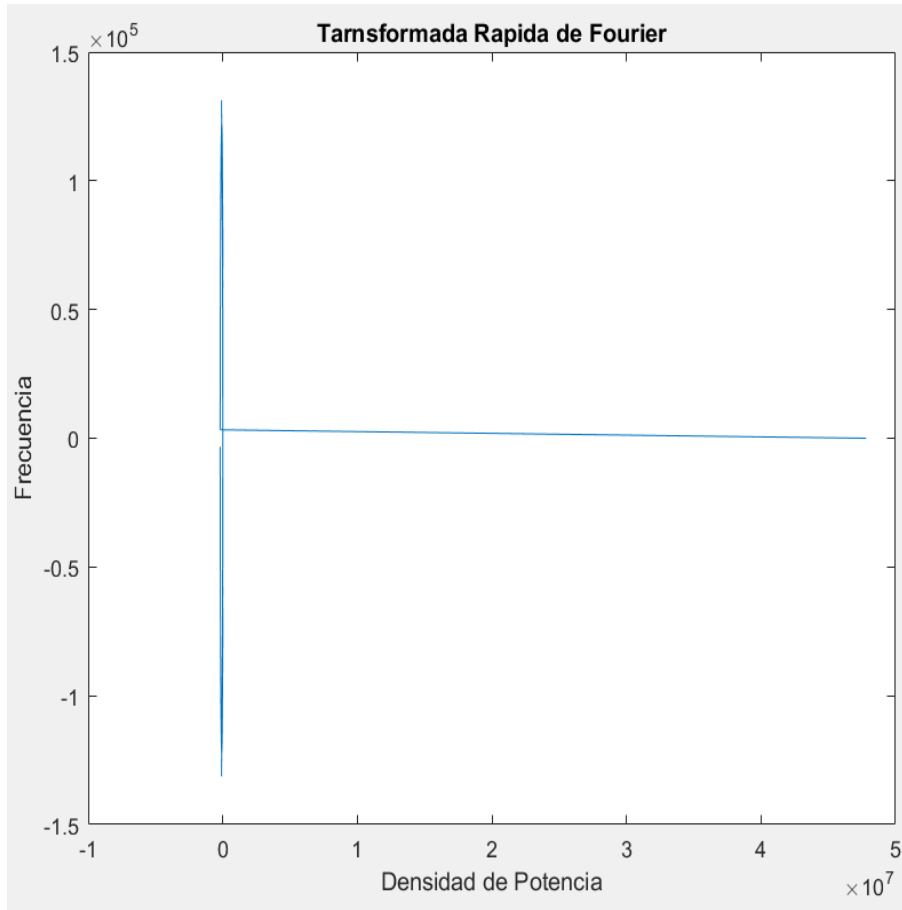


Figura 22: Transformada Rápida de Fourier de Vo

La Figura 23 representa la señal original, la descomposición en 3 IMFs y el residuo de la señal de Vb.

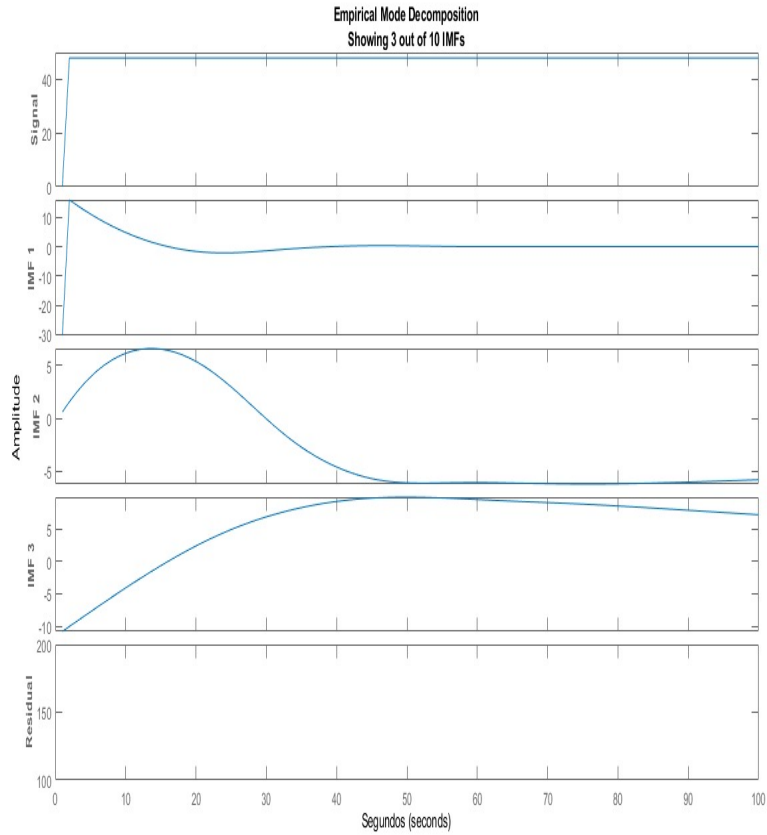


Figura 23: Descomposición en 3 IMF de Vb

En la Figura 24. se muestra como las primeras 5 IMF's presenta un comportamiento relativamente constante, sin embargo en la figura 25 las IMF's 7,8 y 9 contienen ruido, pero este reduce considerablemente en la IMF 10, para la señal del voltaje en la batería (Vb).

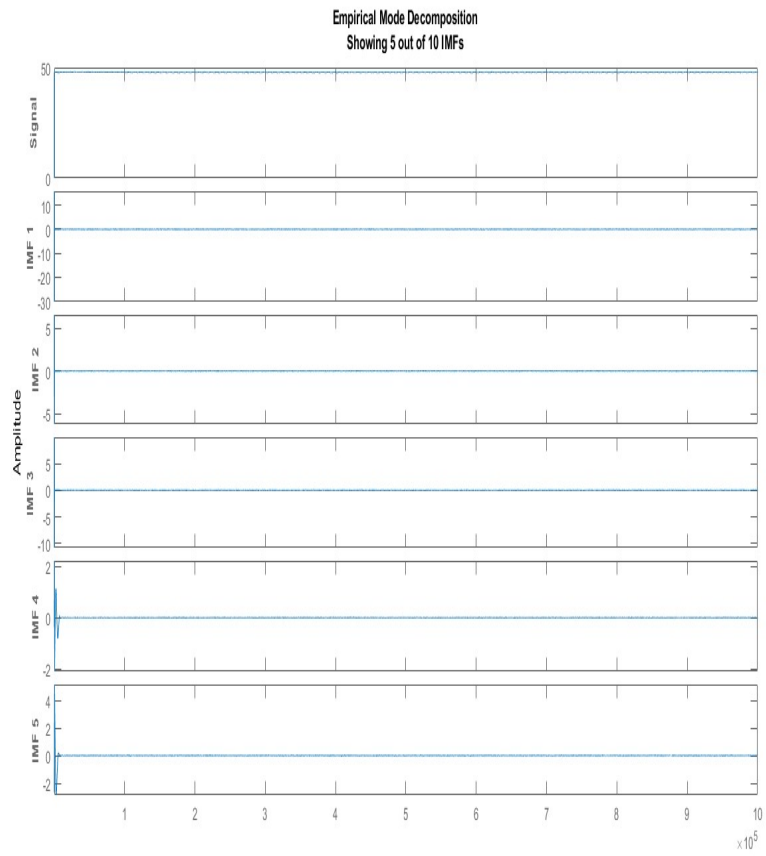


Figura 24: Descomposición en IMF de Vb

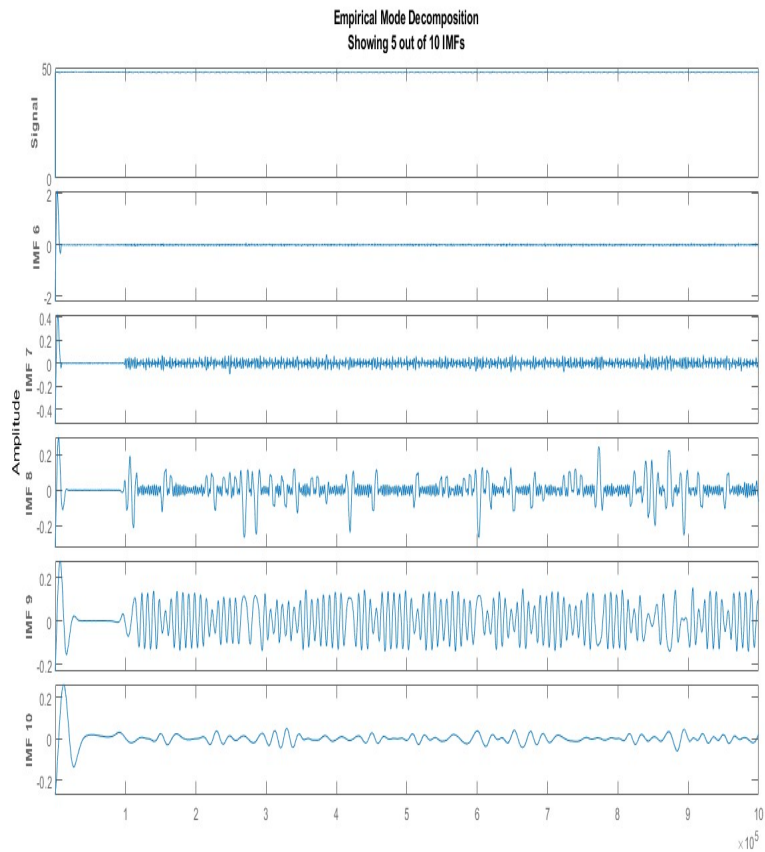


Figura 25: Descomposición en IMF de Vb

En la Figura 26. se muestra la frecuencia instantánea de los datos de Voltaje en la batería Vb con un comportamiento casi constante al rededor de 5Hz aproximadamente.

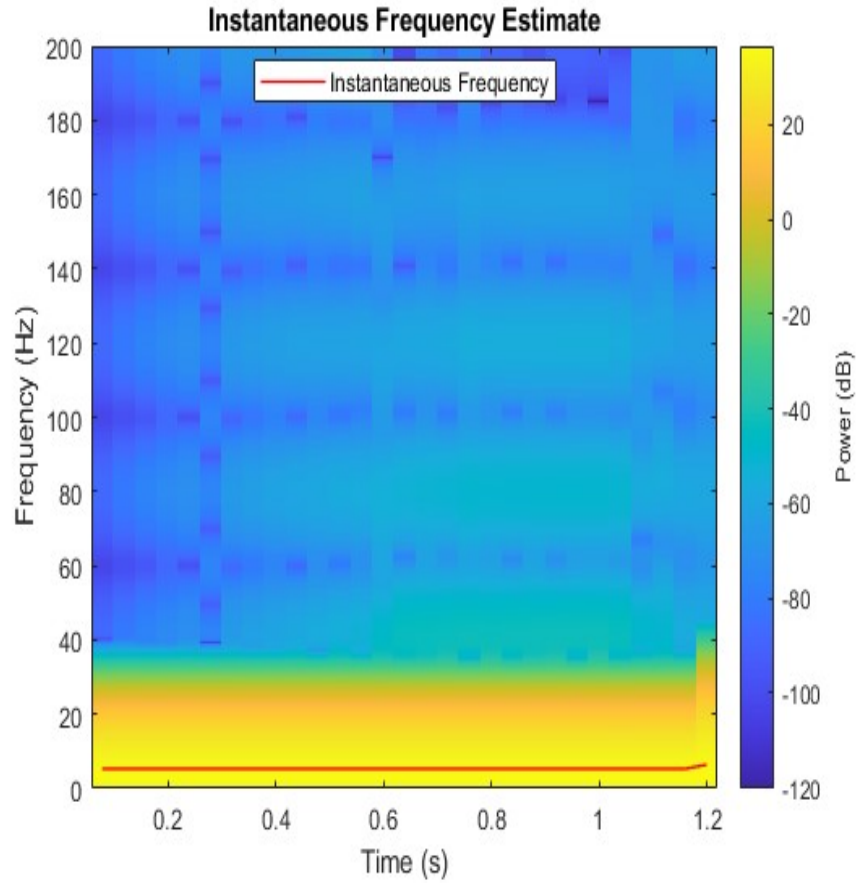


Figura 26: Frecuencia Instantánea de Vb

La Figura 27 presenta el comportamiento de la señal Vb cuando se aplica la FFT, presenta un comportamiento lineal decreciente desde 440 hasta -50 en el segundo 2, a partir de ahí es constante en -50 hasta el segundo 10.

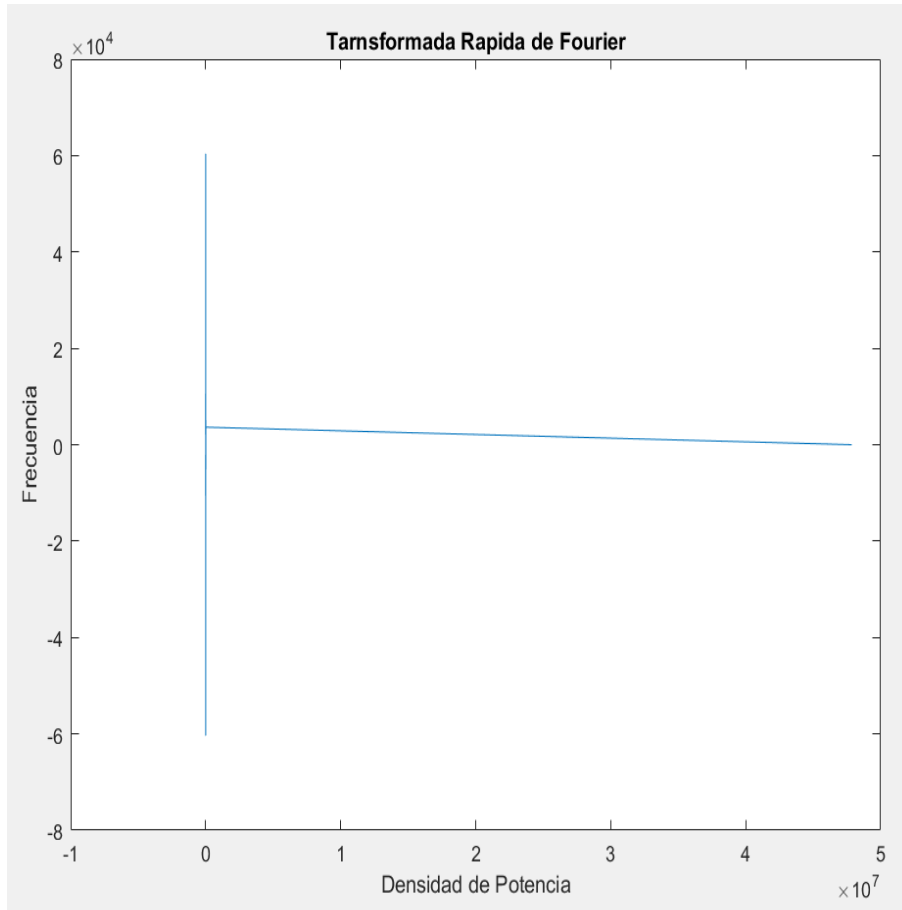


Figura 27: Transformada Rápida de Fourier de Vb

La Figura 28 muestra la señal, la descomposición en 3 IMFs y el residuo del voltaje de salida del arreglo; las señales presentan un comportamiento lineal, en la IMF 1 es decreciente pero en IMFs 2 y 3 es creciente, y no se presenta residuo.

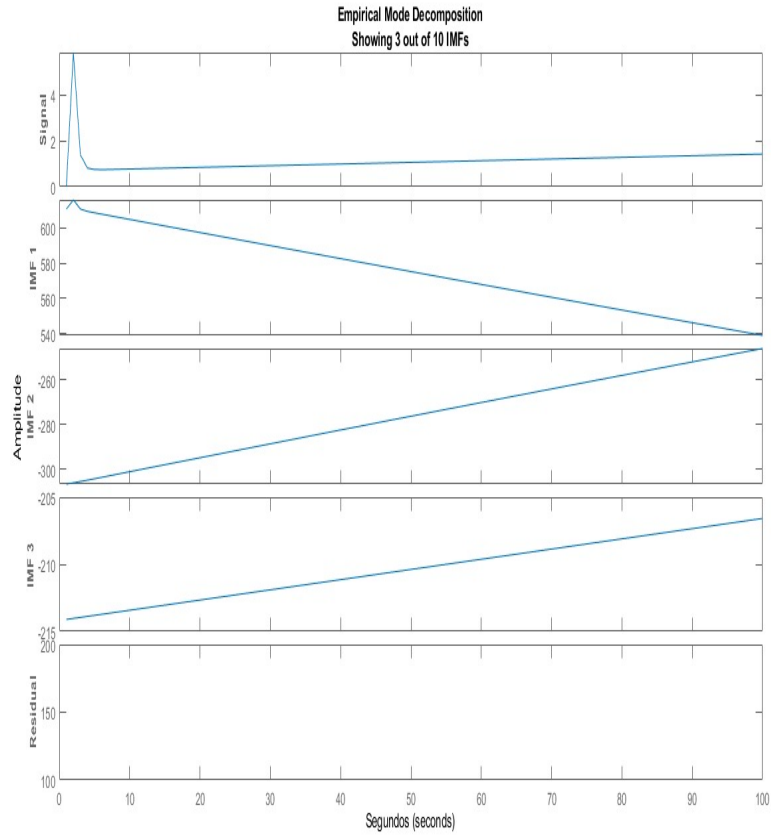


Figura 28: Descomposición en 3 IMF de V_g

La Figura 29 muestra como las primeras 5 IMFs tienen comportamiento lineal casi constante, sin embargo a partir de la IMF 6 (Figura 30) empieza a tener un comportamiento sinusoidal ligero, esto para la señal del voltaje de salida en el arreglo fotovoltaico (V_g).

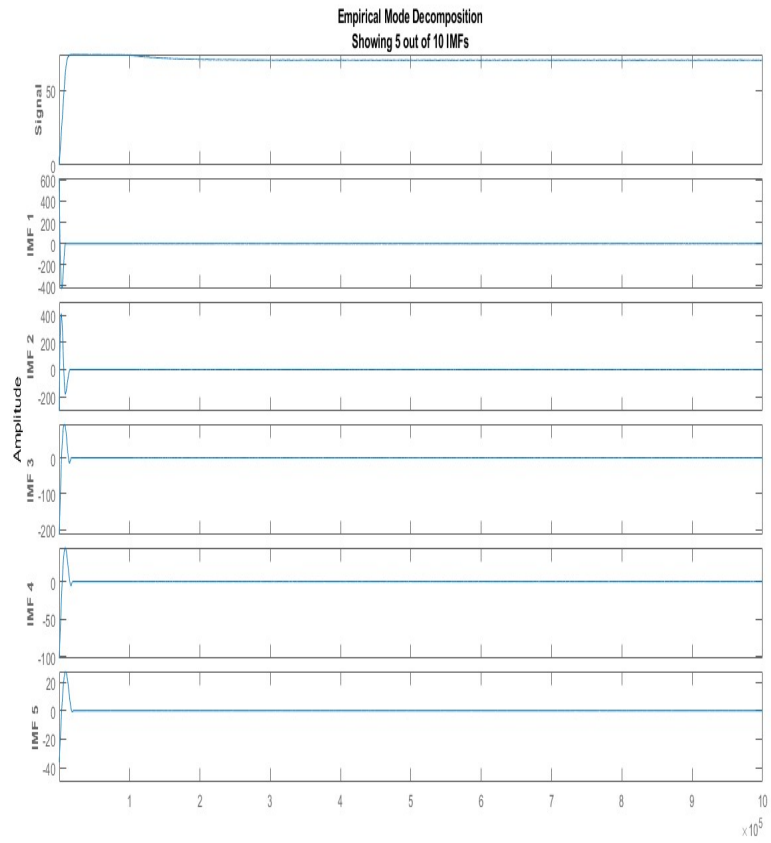


Figura 29: Descomposición en IMF de V_g

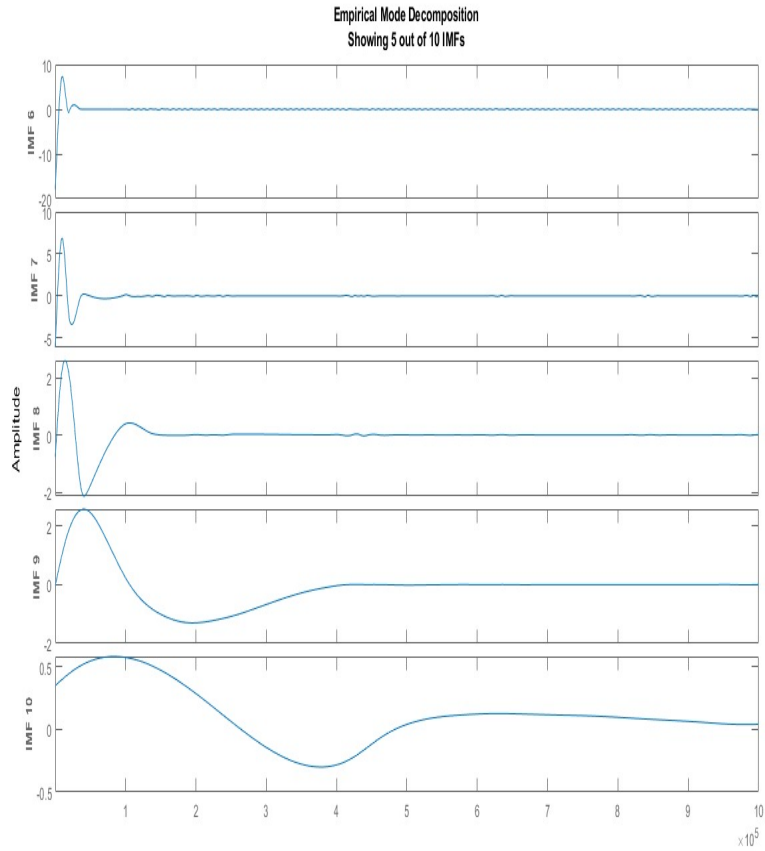


Figura 30: Descomposición en IMF de V_g

En la Figura 31. se muestra la señal obtenida a partir de la frecuencia instantánea de los datos de Voltaje de salida en el arreglo fotovoltaico (V_g). la señal es de tipo lineal constante al rededor de 5Hz.

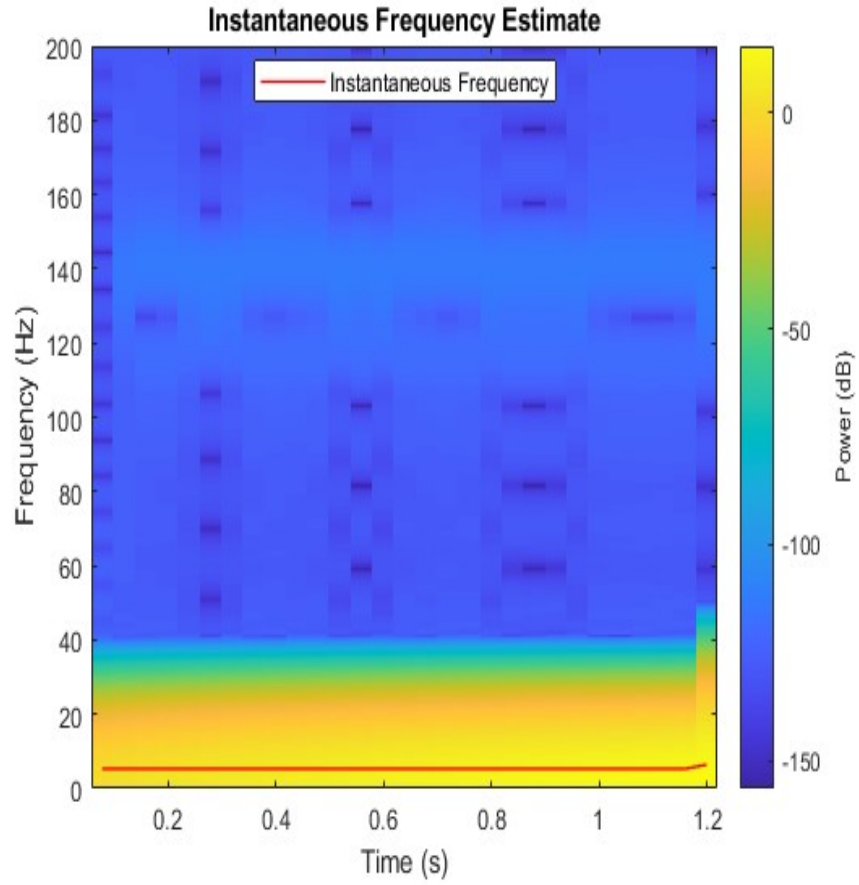


Figura 31: Frecuencia Instantánea de V_g

La Figura 32 muestra el resultado de aplicar la Transformada de Fourier a los datos del voltaje de salida del arreglo fotovoltaico.

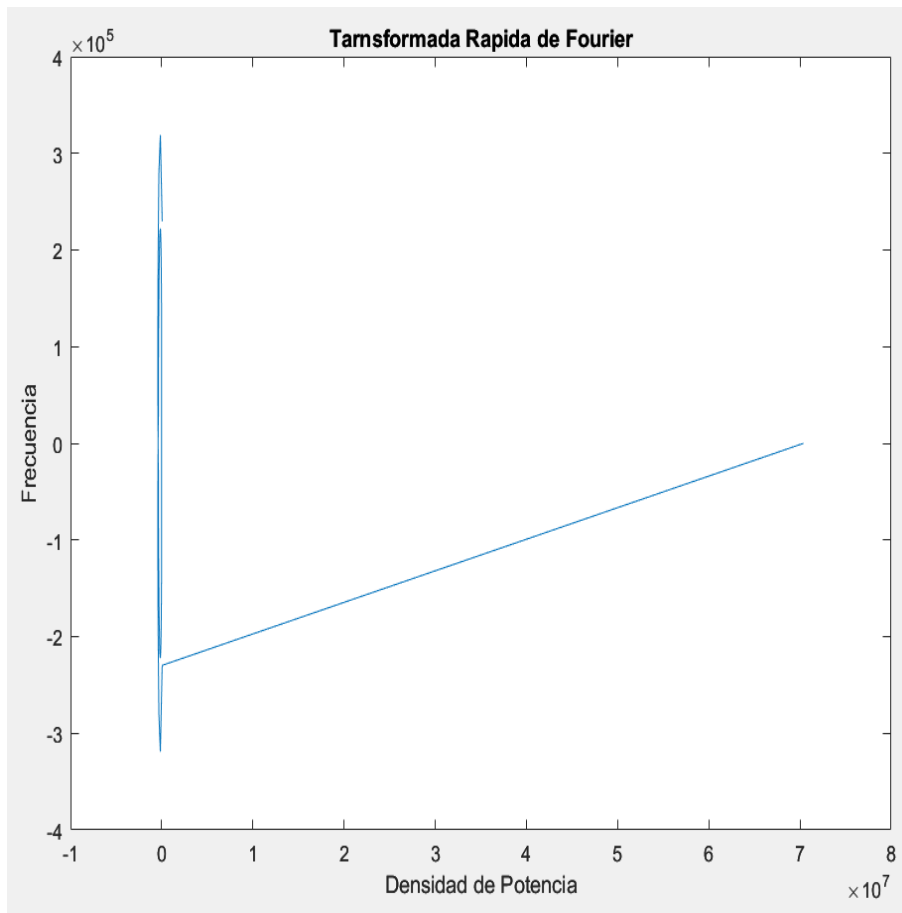


Figura 32: Transformada Rápida de Fourier de V_g

5. CONCLUSIONES

1. En este trabajo se propone el diseño de una micro-red que involucre generación distribuida basada en fuentes no convencionales para una zona aislada en el departamento del Cauca, para el cumplimiento del mismo. En el capítulo 3 se analiza el trabajo desarrollado por [44] quien presenta un conjunto de modelos de micro-red basado en un sistema fotovoltaico, uno de los escenarios de prueba se ajusta a la necesidad del presente trabajo. El escenario se ha adaptado para una zona no interconectada en el Departamento del Cauca, esto permitirá hacer múltiples estudios en sistemas de energía.
2. La calidad de potencia en micro-redes es un tema en pleno desarrollo. Las perturbaciones que se originan por cambios en la radiación y condiciones de la carga afectan este tipo de sistemas y en este trabajo se han presentado maneras de cuantificar este efecto. La frecuencia instantánea se ha convertido en la mejor manera de concluir sobre el comportamiento en sistemas de potencia que involucran fuentes no convencionales de energía desde la perspectiva de calidad de potencia.
3. Mediante el uso de algunas técnicas de análisis en señales eléctricas como las transformadas de Hilbert-Huang y Fourier, fue posible observar con mayor claridad diversos aspectos de cada una de las señales obtenidas del escenario seleccionado, donde se emplea energía solar, este tipo de energía no es de comportamiento lineal con lo cual su inestabilidad introduce diferentes armónicos que alteran la calidad de la señal, por esta razón en las señales se presentan perturbaciones, y como se muestra en cada una de las gráficas de las IMFs se logró suavizar las señales con perturbaciones a señales mucho más definidas, además de descomponer sus componentes en el dominio de la frecuencia con FFT mostrando en cada señal la información sobre su composición.
4. La transformada de Fourier es una herramienta computacional que permite hacer un adecuado análisis de señales provenientes de sistemas de potencia donde es fácil controlar la frecuencia de operación. Esto pasa en aquellos que no tienen variaciones del recurso primario, por ejemplo en aquellos donde la generación proviene de centrales hidroeléctricas. Para el caso de la investigación presentada en este documento se ha considerado variación en la radiación que recibe el sistema solar y esto muestra cambios en la frecuencia de operación y en el switcheo que aparece en la conversión de DC a AC. La frecuencia instantánea permite observar estas variaciones y cuantificar el efecto de las variaciones debido a factores externos de operación.
5. Cualquier energía renovable presenta dificultades en su uso por lo variado que puede llegar a ser el recurso natural que sea usado, en el caso de la energía solar, las medidas pueden llegar a cambiar según la cantidad de sol que pueda darse durante el día en el sector donde se encuentre el sistema, gracias a los gráficos en los IMFs fue posible identificar picos, variaciones de frecuencia, caídas de tensión, entre otras perturbaciones en cada una de las señales iniciales. En el mundo físico

todas estas perturbaciones pueden causar efectos negativos, tanto en el circuito, como en los elementos eléctricos conectados al sistema, al detectarlos es posible investigar y probar diversas formas para corregirlos y evitarlos.

6. REFERENCIAS

Referencias

- [1] E. Banguero, A. J. Aristizábal, A. Habib, and D. Ospina, “Experimental investigation and optimal power flow modelling of the first renewable microgrid in chocó, colombia,” *Energy Procedia*, vol. 157, pp. 953–965, 2019, technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability (TMREES). [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218312335>
- [2] R. J. C. Pinto, S. J. Pinto Simões Mariano, and M. d. R. A. Calado, “Power quality experimental analysis on rural home grid-connected pv systems,” *International Journal of Photoenergy*, vol. 2015, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2015/791680>
- [3] A. Hirsch, Y. Parag, and J. Guerrero, “Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues,” *Renewable and sustainable Energy reviews*, vol. 90, pp. 402–411, 2018.
- [4] P. S. Sonali N. Kulkarni, “A review on power quality challenges in renewable energy grid integration,” *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 6, pp. 1573–1578, 2016. [Online]. Available: [Availableathttp://inpressco.com/category/ijcet](http://inpressco.com/category/ijcet)
- [5] E. M. N. Gonzales, C. cusgüen and F. Pavas, “Estrategias de control de calidad de energía en microrredes rurales,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 16, 2017. [Online]. Available: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/5746>
- [6] C. Marnay, S. Chatzivasileiadis, C. Abbey, R. Iravani, G. Joos, P. Lombardi, P. Mancarella, and J. von Appen, “Microgrid evolution roadmap,” in *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*, 2015, pp. 139–144.
- [7] E. Mahidin, H. H. Zaki, and M. Muhibbuddin, “A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies,” *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 6, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s41601-021-00181-3>
- [8] J. Oviedo, J. Solano, and J. Bastidas, “Técnicas de análisis y control para la mejora de la estabilidad de micro-redes eléctricas: revisión en la literatura,” in *SICEL 2017*, 2017, pp. 1–10.
- [9] E. A. Mertens, L. F. S. Dias, F. A. Fernandes, B. D. Bonatto, J. P. Abreu, and H. Arango, “Evaluation and trends of power quality indices in distribution system,” in *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, 2007, pp. 1–6.
- [10] G. Ezhiljenekha and M. MarsalineBeno, “Review of power quality issues in solar and wind energy,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 24, pp.

- 2137–2143, 2020, international Conference on Advances in Material Science & Nanotechnology. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320324524>
- [11] R. Majumder, “Some aspects of stability in microgrids,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3243–3252, 2013.
- [12] E. I. Come Zebra, H. J. van der Windt, G. Nhumaio, and A. P. Faaij, “A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, p. 111036, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121003269>
- [13] R. Mosobi, T. Chichi, and S. Gao, “Power quality analysis of hybrid renewable energy system,” *Cogent Engineering*, vol. 2, p. 1005000, 01 2015.
- [14] W. Ben Abdesslem and S. Karaa, “Ma-rem: A multi-agent system for renewable energy management,” in *2014 5th International Renewable Energy Congress (IREC)*, 2014, pp. 1–6.
- [15] M. Rodríguez Gámez, A. Vázquez Pérez, A. M. Velez Quiroz, and W. M. Saltos Arauz, “Mejora de la calidad de la energía con sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales,” *Revista Científica*, vol. 33, no. 3, p. 265–274, sep. 2018. [Online]. Available: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/revcie/article/view/13104>
- [16] A. Collazos Ortiz, C. L. Esquivel García, and A. Paz Parra, “De los hidrocarburos a las energías renovables en colombia.” *Cultura Latinoamericana*, vol. 29, no. 1, pp. 138–162, ene. 2019. [Online]. Available: <https://editorial.ucatolica.edu.co/index.php/RevClat/article/view/2743>
- [17] O. P.-R. . J. Campillo, D. Ingham, K. Hughes, and M. Pourkashanian, “Large scale integration of renewable energy sources (res) in the future colombian energy system,” *Energy*, vol. 186, p. 115805, 2019.
- [18] S. T. M.-S. P. Valverde-Granja Agustínde, “Study of the electrical power quality in the common connection point between a 7.8 kwp pv system and a low-voltage network,” *Ingeniería y Competitividad*, 2018. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291356699006>
- [19] L. Ortiz, J. W. González, L. B. Gutierrez, and O. Llanes-Santiago, “A review on control and fault-tolerant control systems of ac/dc microgrids,” *Heliyon*, vol. 6, no. 8, p. e04799, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240584402031642X>
- [20] H. Lee, G.-S. Byeon, J.-H. Jeon, A. Hussain, H.-M. Kim, A. O. Rousis, and G. Strbac, “An energy management system with optimum reserve power procurement function for microgrid resilience improvement,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 42 577–42 585, 2019.
- [21] D. Sierra, A. J. Aristizábal, J. A. Hernández, and D. Ospina, “Life cycle analysis of a building integrated photovoltaic system operating in bogotá, colombia,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 10–19, 2020,

- technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719308522>
- [22] M. Bueno Lopez, D. N. González Cely, and A. Muñoz Rincón, “Análisis de expansión de una microrred en una zona no interconectada,” *Tecnura*, vol. 24, no. 63, p. 40–56, ene. 2020. [Online]. Available: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/15480>
- [23] V. Patel and J. J. Patel, “Power quality improvement of grid using solar photovoltaic farm,” in *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, 2017, pp. 1–6.
- [24] S. Murugesan and V. Murali, “Decentralized unintentional islanding identification for converter-interfaced multiple dgs,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 7, pp. 4512–4520, 2021.
- [25] P. James B. Rossman, P. Anthony M. Murphy, P. Kristin Britt Hensley, and P. David C. Deloach, “Evaluating the power quality impacts of large-scale solar and wind-generation applications on tennessee valley authority’s (tva) power system,” in *2019 SoutheastCon*, 2019, pp. 1–6.
- [26] M. M. Samy, H. H. Sarhan, S. Barakat, and S. A. Al-Ghamdi, “A hybrid pv-biomass generation based micro-grid for the irrigation system of a major land reclamation project in kingdom of saudi arabia (ksa) - case study of albaha area,” in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*, 2018, pp. 1–8.
- [27] F. A. I. Hernández, J. E. C. Becerra, and J. Guerrero, “Modeling and simulation of a grid-tied 21.0 kwp real solar power plant as case study, using the vhdl-ams language,” in *2018 IEEE 2nd Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA)*, 2018, pp. 1–5.
- [28] A. Ouammi, “Model predictive control for optimal energy management of connected cluster of microgrids with net zero energy multi-greenhouses,” *Energy*, vol. 234, p. 121274, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054422101522X>
- [29] J. Alshehri and M. Khalid, “Power quality improvement in microgrids under critical disturbances using an intelligent decoupled control strategy based on battery energy storage system,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 147 314–147 326, 2019.
- [30] A. H. Elmetwaly, A. A. Eldesouky, and A. A. Sallam, “An adaptive d-facts for power quality enhancement in an isolated microgrid,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 57 923–57 942, 2020.
- [31] Y. Pavan Kumar and B. Ravikumar, “A simple modular multilevel inverter topology for the power quality improvement in renewable energy based green building microgrids,” *Electric Power Systems Research*, vol. 140, pp. 147–161, 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779616302358>

- [32] J. Pascual, D. Arcos-Aviles, A. Ursúa, P. Sanchis, and L. Marroyo, “Energy management for an electro-thermal renewable-based residential microgrid with energy balance forecasting and demand side management,” *Applied Energy*, vol. 295, p. 117062, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921005183>
- [33] M. Golla, S. Sankar, and K. Chandrasekaran, “Renewable integrated uapf fed microgrid system for power quality enhancement and effective power flow management,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 133, p. 107301, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521005408>
- [34] A. A. Alkahtani, S. T. Y. Alfalahi, A. A. Athamneh, A. Q. Al-Shetwi, M. B. Mansor, M. A. Hannan, and V. G. Agelidis, “Power quality in microgrids including supraharmonics: Issues, standards, and mitigations,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 127 104–127 122, 2020.
- [35] S. Negri, F. Giani, A. Massi Pavan, A. Mellit, and E. Tironi, “Mpc-based control for a stand-alone lvdc microgrid for rural electrification,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 32, p. 100777, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352467722000911>
- [36] M. Keerthana, G. Uma, and U. Sowmmiya, “A study of a solar pv and wind-based residential dc nanogrid with dual energy storage system under islanded/ interconnected/grid-tied modes,” *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, vol. 143, p. 108473, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061522004811>
- [37] B. K. Panigrahi, J. Mohanty, A. Maity, S. S. Medinray, and S. P. Ray, “Power quality analysis in a pv connected hybrid system,” in *2018 2nd International Conference on Data Science and Business Analytics (ICDSBA)*, 2018, pp. 132–137.
- [38] D. N. G. Cely, A. M. Rincón, and M. B. López, “Análisis de expansión de una microrred en una zona no interconectada,” *Tecnura*, vol. 24, no. 63, pp. 40–56, 2020.
- [39] R. García Ochoa, “Pobreza energética en américa latina,” Tech. Rep., 2014.
- [40] W. van Hove, F. Dalla Longa, and B. van der Zwaan, “Identifying predictors for energy poverty in europe using machine learning,” *Energy and Buildings*, vol. 264, p. 112064, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778822002353>
- [41] V. Aabrek, I. Forseth, M. Bueno-López, and M. Molinas, “Design and implementation of a monitoring system for decision support in a micro-business based on solar energy microgrid in rural colombia,” in *2018 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, 2018, pp. 1–8.
- [42] M. A. Silva Rios and N. Trujillo Alfaro, “Análisis de estabilidad de una microrred conectada a un sistema de potencia convencional,” 2019.
- [43] M. d. l. Pinto Calderón, “Propuesta y evaluación de una microrred para las islas de providencia y santa catalina, colombia.”

- [44] V. Vera Saldaña, “Control de potencia en microrredes ac,” 2020.
- [45] M. Bueno-Lopez and S. Garzon Lemos, “Electrification in non-interconnected areas: Towards a new vision of rurality in colombia,” *IEEE Technology and Society Magazine*, vol. 36, no. 4, pp. 73–79, 2017.
- [46] J. M. Sanabria Villamizar, “Herramienta computacional para el análisis de señales en sistemas de potencia con alta penetración de fuentes no convencionales de energía,” 2020.

7. ANEXOS

7.1. ANEXO A Importación de datos de PSIM a MATLAB

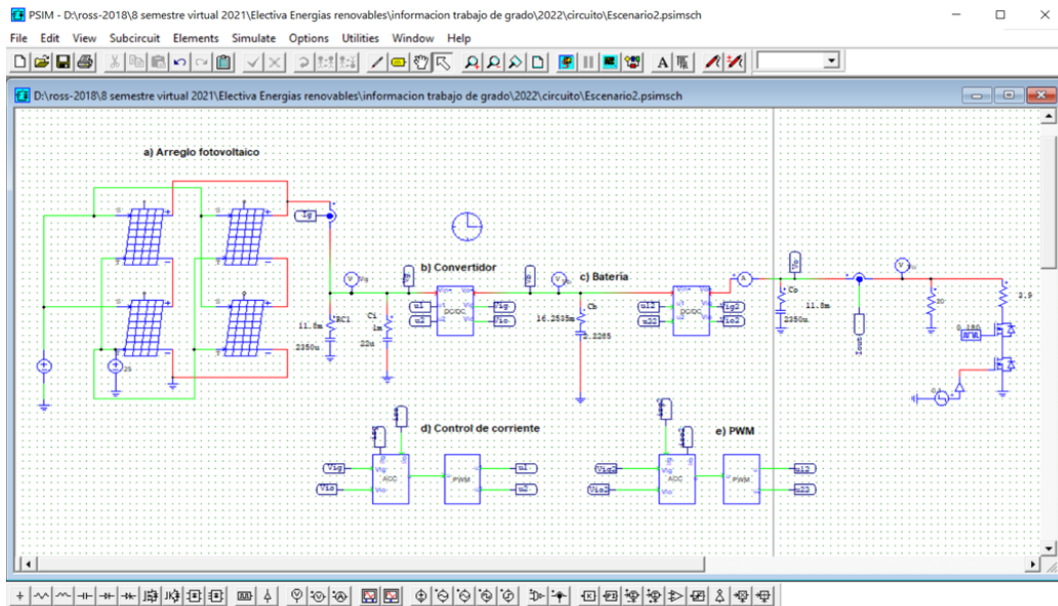


Figura 36. En PSIM se abre el circuito

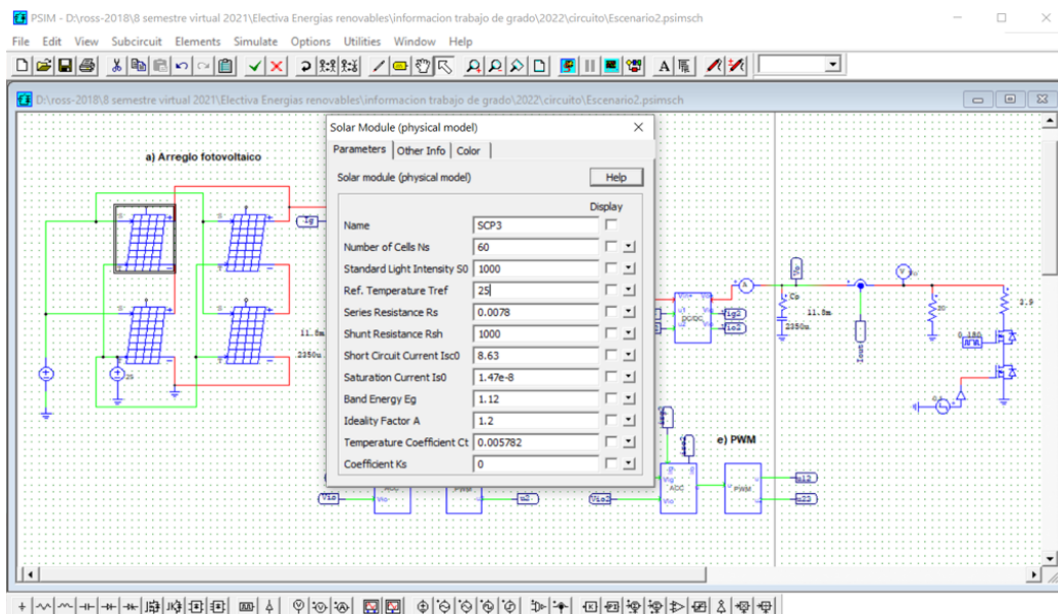


Figura 37. Se establecen los valores de irradiancia y temperatura en cada panel fotovoltaico

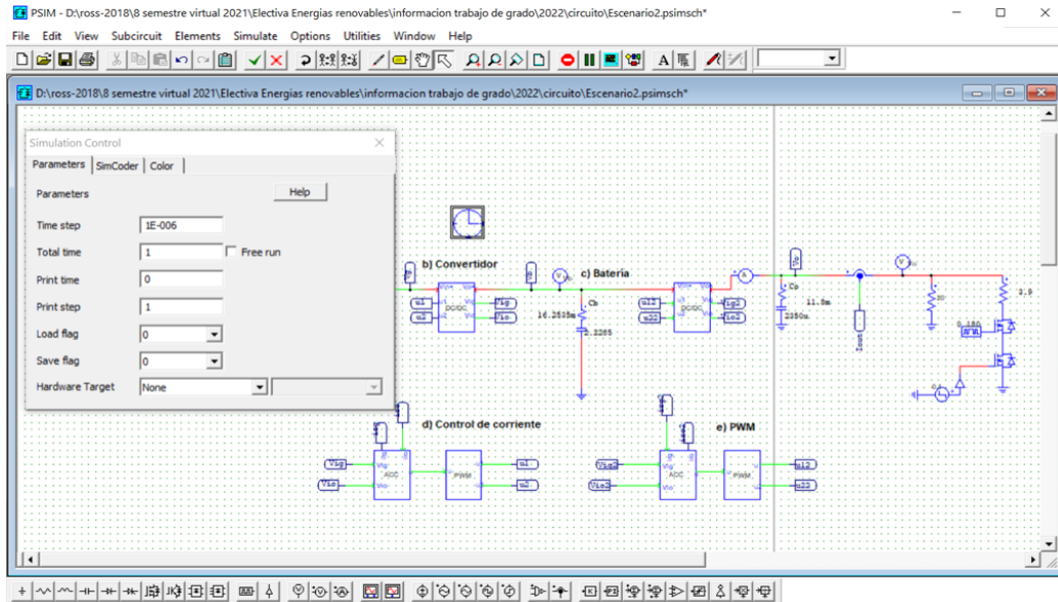


Figura 38. Se establecen los parámetros para graficar, en este caso se usará I_o

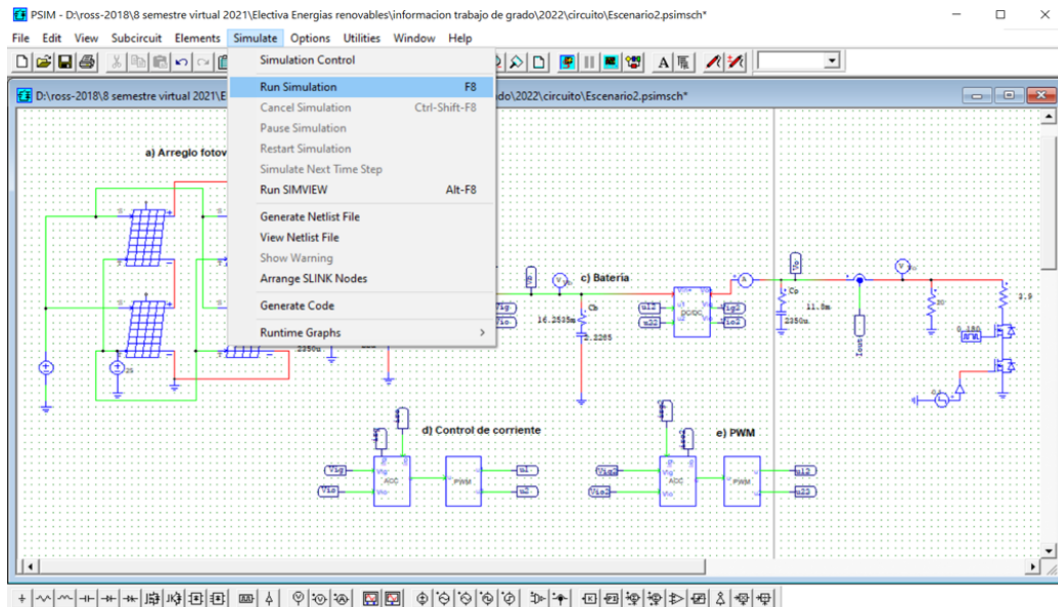


Figura 39. Se ejecuta la simulación

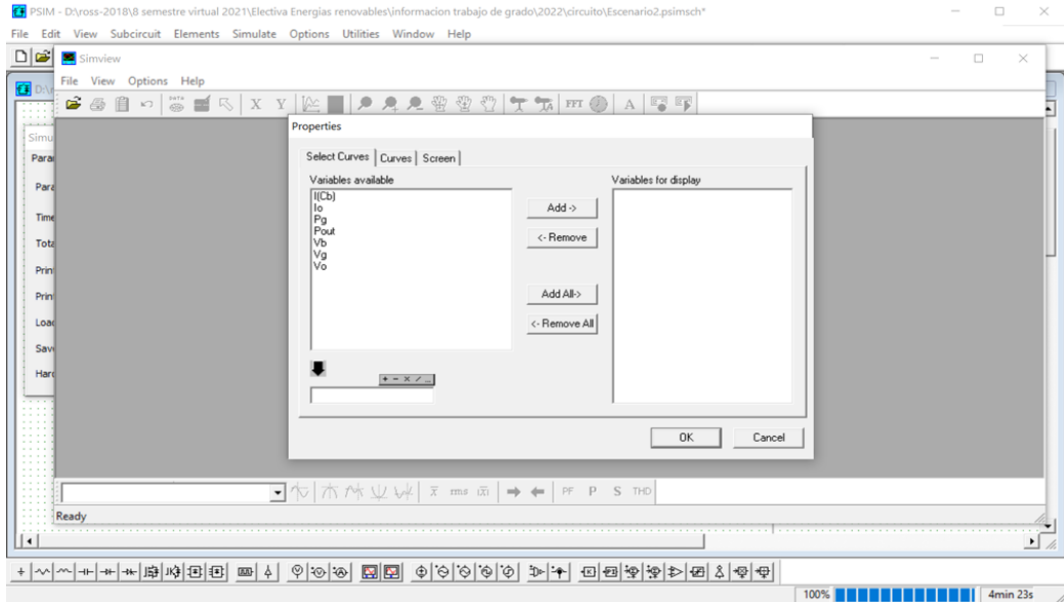


Figura 40. Se escoge la señal para graficar

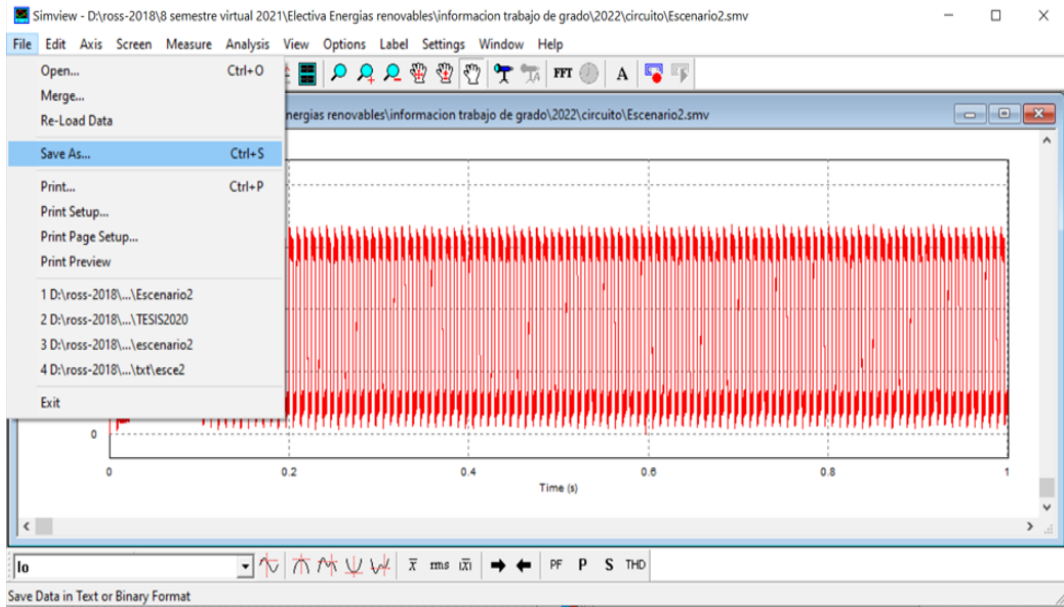


Figura 41. Se guardan los datos de la simulación

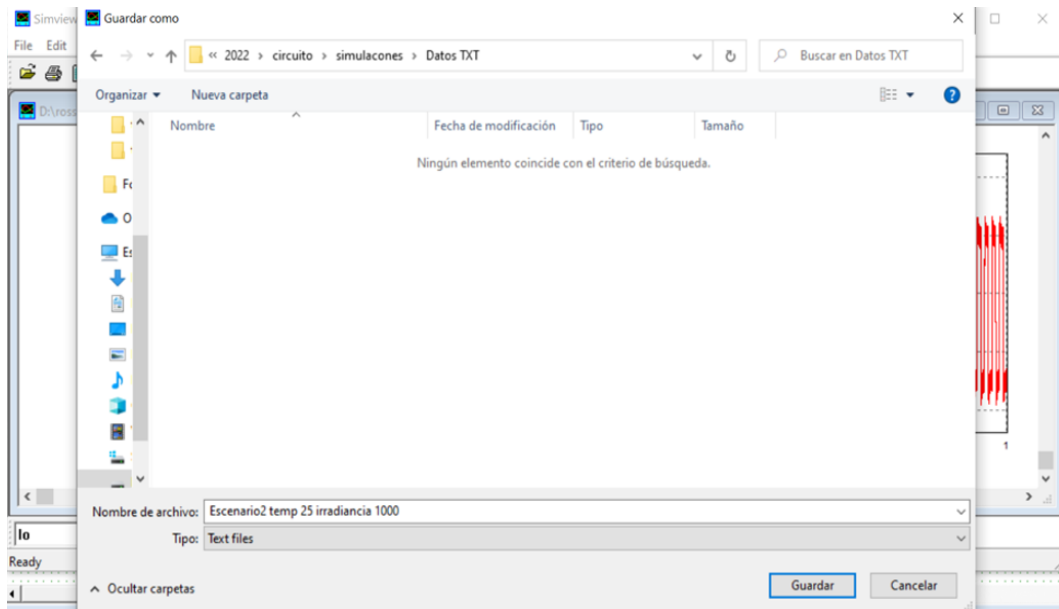


Figura 42. Al guardar los datos se guardan en el formato txt

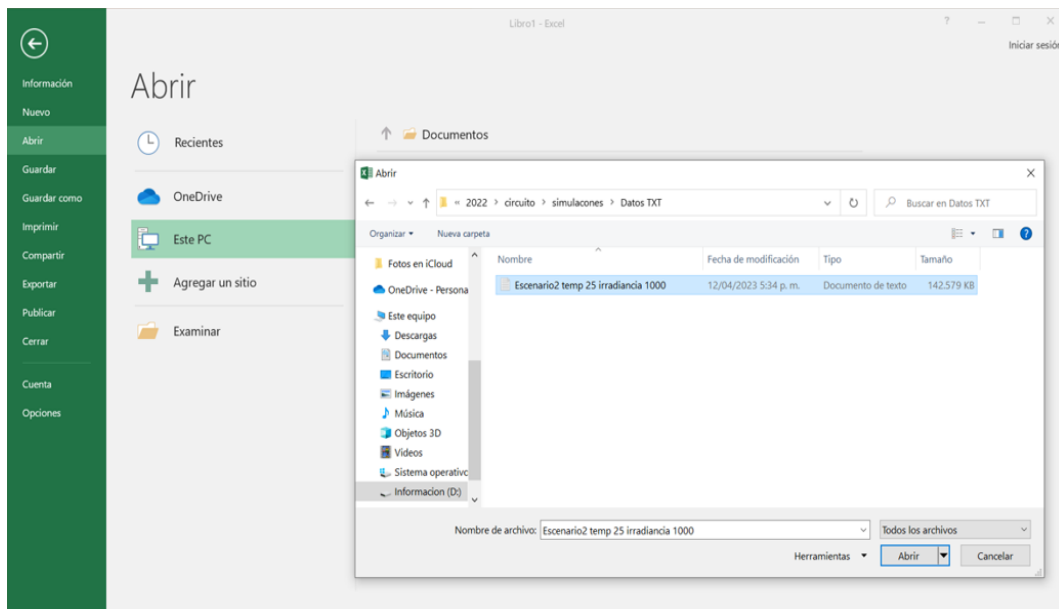


Figura 43. En el Programa Excel se abre el documento previamente guardado

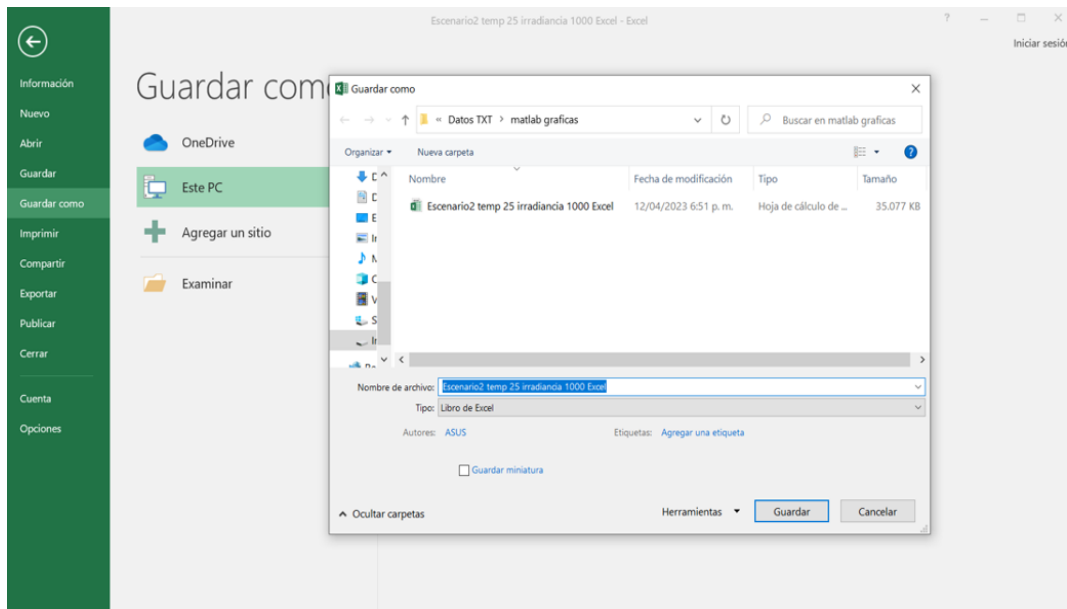


Figura 44. Se guardan los datos con el formato de Excel

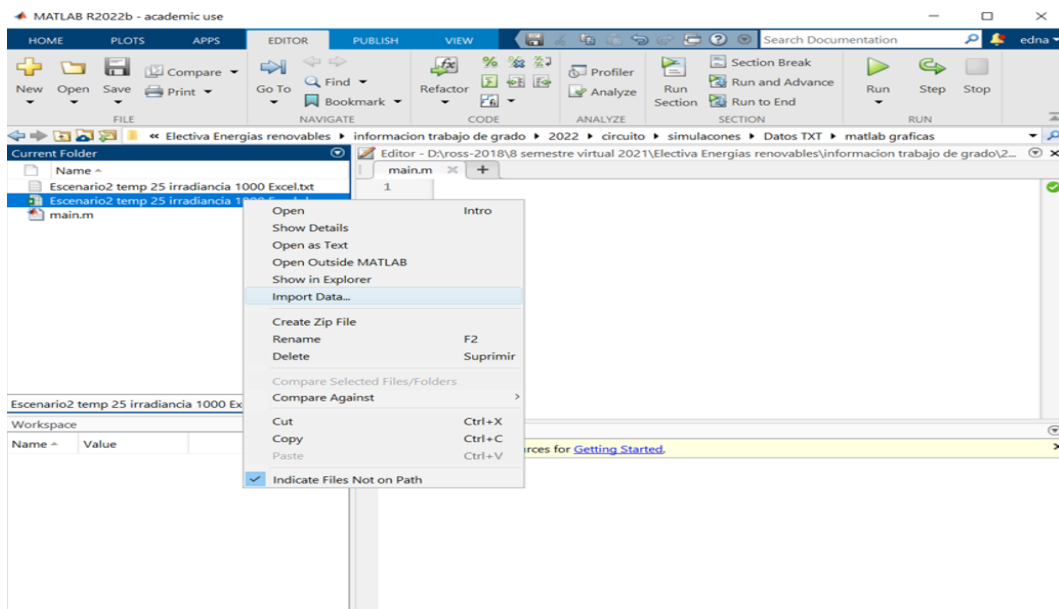


Figura 45. En Matlab se abre la carpeta y se importan los datos del documento de Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Time	ICb	Io	Vo	Vg	Vb	Pg	Pout
1	1000	-1.2600e+09	1.3400e+09	116000000	5.8700e+09	4.8000e+10	0	0
2	2000	-1.0800e+09	1.2400e+09	116000000	1.3900e+09	4.8000e+10	1.0100e+11	675000
3	3000	-897000000	1.1400e+09	115000000	817000000	4.8000e+10	2.3900e+10	668000
4	4000	-705000000	1.0300e+09	114000000	756000000	4.8000e+10	1.4100e+10	659000
5	5000	-512000000	928000000	113000000	749000000	4.8000e+10	1.3000e+10	650000
6	6000	-317000000	820000000	112000000	753000000	4.8000e+10	1.2900e+10	641000
7	7000	-123000000	713000000	111000000	761000000	4.8000e+10	1.3000e+10	630000
8	8000	-9110	642000000	111000000	768000000	4.8000e+10	1.3100e+10	620000
9	9000	-9090	632000000	111000000	776000000	4.8000e+10	1.3300e+10	614000
10	10000	-9090	621000000	111000000	783000000	4.8000e+10	1.3400e+10	615000
11	11000	7960	611000000	111000000	790000000	4.8000e+10	1.3500e+10	617000
12	12000	-9100	601000000	111000000	797000000	4.8000e+10	1.3600e+10	618000
13	13000	-9100	591000000	111000000	805000000	4.8000e+10	1.3800e+10	620000
14	14000	-9100	581000000	112000000	812000000	4.8000e+10	1.3900e+10	621000
15	15000	-9100	570000000	112000000	819000000	4.8000e+10	1.4000e+10	623000
16	16000	-9100	560000000	112000000	826000000	4.8000e+10	1.4100e+10	624000
17	17000	-9100	550000000	112000000	834000000	4.8000e+10	1.4300e+10	625000
18	18000	-9100	540000000	112000000	841000000	4.8000e+10	1.4400e+10	627000
19	19000	-9110	529000000	112000000	848000000	4.8000e+10	1.4500e+10	628000
20	20000	-9110	519000000	112000000	856000000	4.8000e+10	1.4600e+10	629000
21	21000	8140	509000000	112000000	863000000	4.8000e+10	1.4800e+10	630000
22	22000	-9110	499000000	112000000	870000000	4.8000e+10	1.4900e+10	631000
23	23000	-9110	489000000	113000000	877000000	4.8000e+10	1.5000e+10	632000

Figura 46. En el proceso de importación se muestran los datos, se establecen en columnas y se procede a importarlos al Workspace

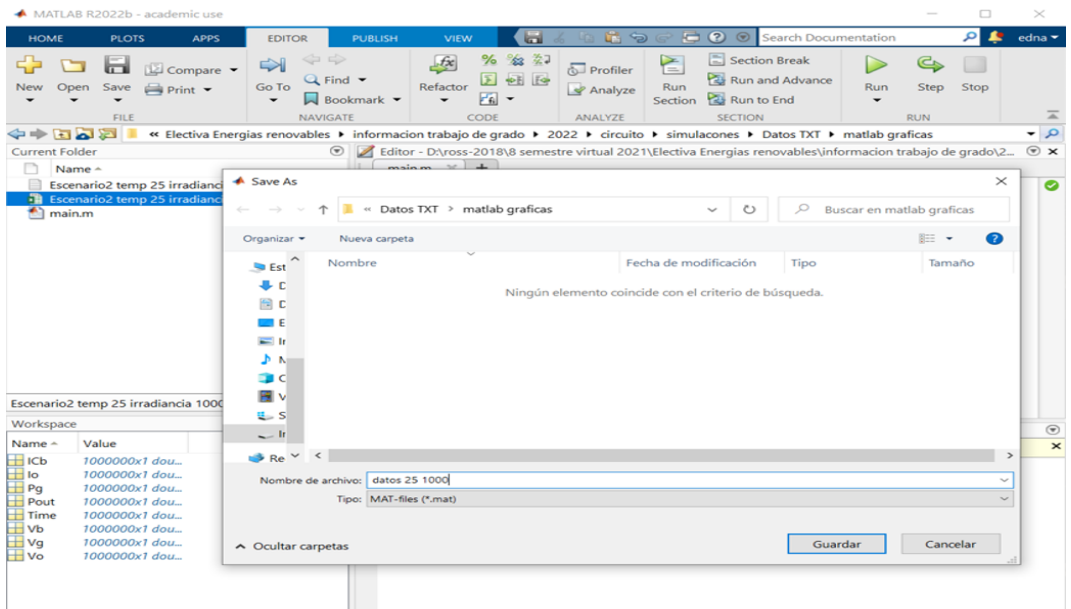


Figura 47. Al tener los datos en el Workspace se procede a guardarlos

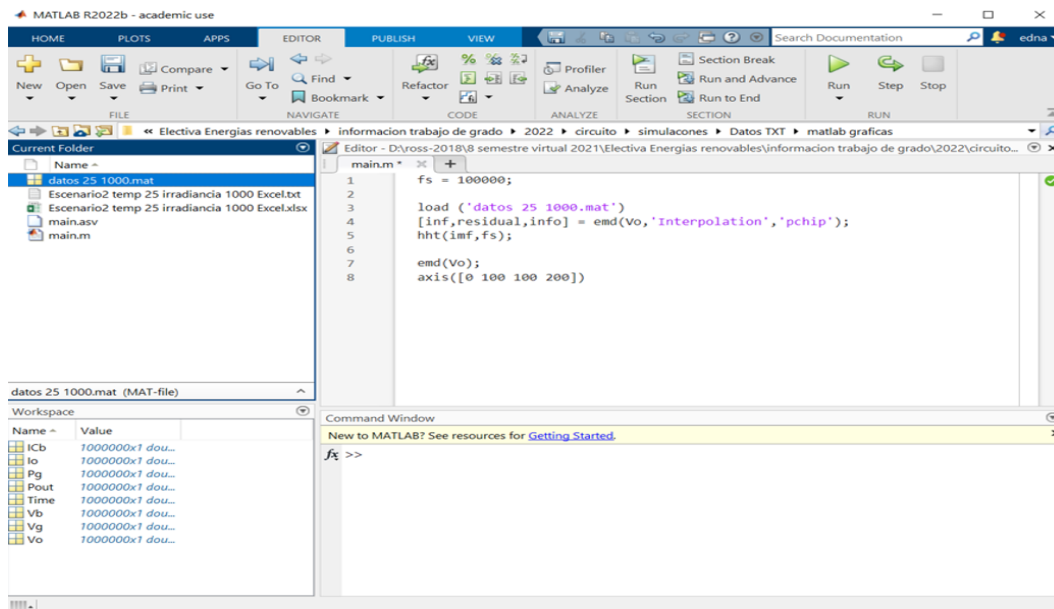


Figura 48. Con todos los datos cargados en el workspace se corren los códigos

7.2. ANEXO B Códigos

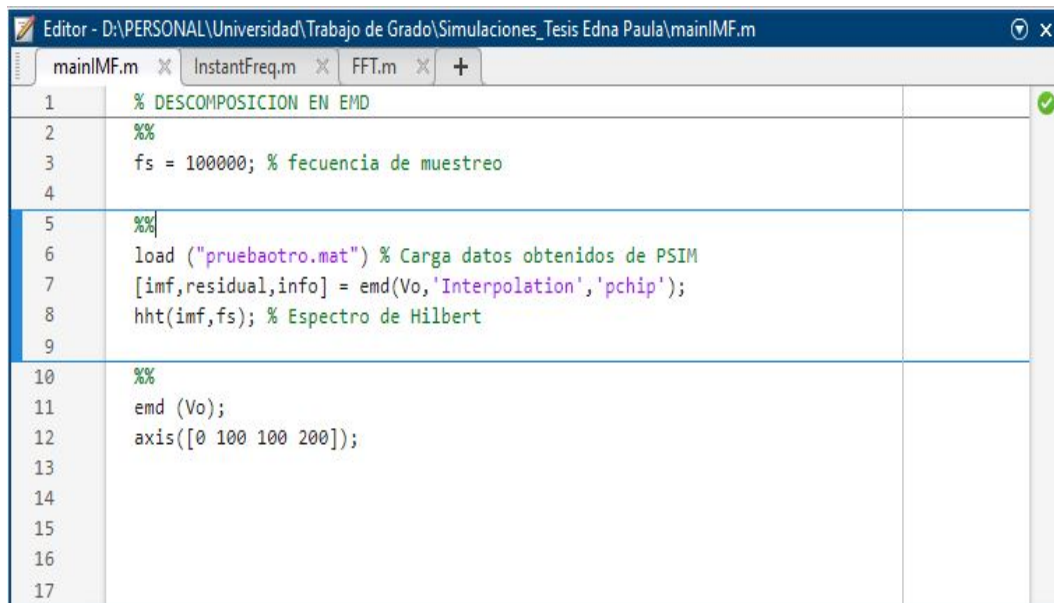


Figura 33. Código fuente descomposición en EMD

```
Editor - D:\PERSONAL\Universidad\Trabajo de Grado\Simulaciones_Tesis Edna Paula\InstantFreq.m
mainIMF.m x InstantFreq.m x FFT.m x +
1 % FRECUENCIA INSTANTÁNEA
2 fs = 400; %frecuencia de muestreo
3 %%
4 load ("pruebaotro.mat") % Cargar datos obtenidos de PSIM
5 [imf,residual,info] = emd(Vo,'Interpolation','pchip');
6
7 %%
8 figure() % Grafica de FI
9 title("Frecuencia Instantánea Io");
10 instfreq(Vo(1:500),fs);
```

Figura 34. Código fuente Frecuencia Instantánea

```
Editor - D:\PERSONAL\Universidad\Trabajo de Grado\Simulaciones_Tesis Edna Paula\FFT.m
mainIMF.m x InstantFreq.m x FFT.m x +
1 % TRANSFORMADA RAPIDA DE FOURIER
2
3 %%
4 load ("pruebaotro.mat")
5
6 %%
7 fs = 100;
8 %Transformada rápida
9 a = fft(Vg);
10 plot(a);
11
12
13
14
15
16
```

Figura 35. Código fuente Transformada Rápida de Fourier

7.3. ANEXO C Interfaz Gráfica de Usuario GUI

```
Editor - D:\MIS DOCUMENTOS\Usuario\Desktop\GUICopia1\Ensayo1GUI.m
Ensayo1GUI.m  x +
54
55 % Cargar los datos obtenidos de PSIM
56 load ('DatosFinal.mat');
57
58 % Asignar una variable a los datos cargados
59 handles.actual = 0;
60 handles.Io = Io;
61 handles.Vb = Vb;
62 handles.Vg = Vg;
63 handles.Vo = Vo;
64
65
66 |
67 % Choose default command line output for Ensayo1GUI
68 handles.output = hObject;
69 % Update handles structure
70 guidata(hObject, handles);
71
72 % UIWAIT makes Ensayo1GUI wait for user response (see UIRESUME)
73 % uiwait(handles.figure1);
74
75
76 % --- Outputs from this function are returned to the command line.
77 function varargout = Ensayo1GUI_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
78 % varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
79 % hObject handle to figure
80 % eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

Figura 36. Código fuente GUI

```
Editor - D:\MIS DOCUMENTOS\Usuario\Desktop\GUICopia1\Ensayo1GUI.m
Ensayo1GUI.m  x +
86
87 % Código para el boton1
88 % Corresponde a la Transformada Rapida de Fourier
89 function boton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
90 handles.actual = fft(handles.actual);
91 plot(handles.actual);
92 title ('Transformada Rapida de Fourier');
93 ylabel ('Frecuencia');
94 xlabel('Densidad de Potencia');
95
96 % Código para el boton2.
97 % Corresponde a las IMFs (Funciones de Modo Intrínseco)
98 function boton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
99 [imf, residual1, info] = emd(handles.actual, 'Interpolation', 'pchip');
100 handles.actual = imf;
101 plot(handles.actual);
102 title ('IMFs');
103 ylabel('Amplitud');
104 xlabel('Tiempo');
105
106 % Código para el boton3.
107 % Corresponde a la Frecuencia Instantánea
108 function boton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
109 fs = 400; %frecuencia de muestreo
110 [imf, residual1, info] = emd(handles.actual, 'Interpolation', 'pchip');
111 FI = instfreq(handles.actual(1:500), fs);
112 plot(FI);
113 title("Frecuencia Instantánea");
114 ylabel('Frecuencia');
115 xlabel('Tiempo');
116
Command Window
>> Ensayo1GUI
>> Ensayo1GUI
```

Figura 37. Código fuente GUI

```

Editor - D:\MIS DOCUMENTOS\Usuario\Desktop\GUICopia1\Ensayo1GUI.m
Ensayo1GUI.m
134 % --- Voltaje de Salida
135     handles.actual = handles.Vo;
136 end
137
138 guidata(hObject,handles);
139
140
141
142 % --- Executes during object creation, after setting all properties.
143 function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
144 % hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)
145 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
146 % handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
147
148 % Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
149 % See ISPC and COMPUTER.
150 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
151     set(hObject,'BackgroundColor','white');
152 end
153
154
155 %Codigo para el boton4.
156 %Borrar Gráfica, limpia el espacio de la grafica
157 function boton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
158     handles.actual = 0;
159     plot(handles.actual);
160
Command Window

```

Figura 38. Código fuente GUI

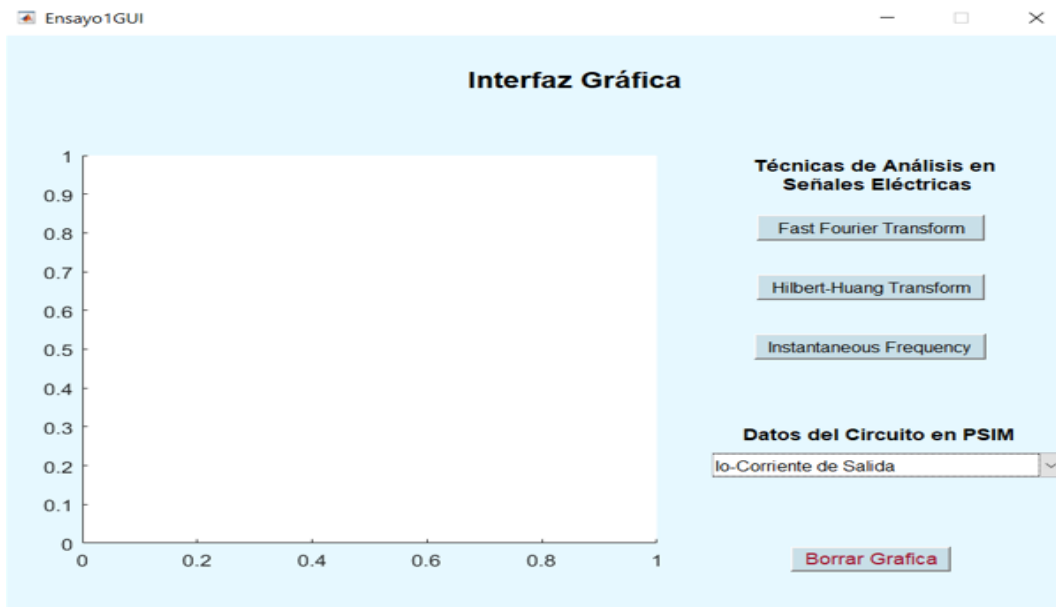


Figura 39. Visualización de GUI

Acceso a la GUI

<https://drive.google.com/drive/folders/1efLfuqVY0GnBGIZ43SjcbwqhJL2ixcvM?usp=sharing>