

**Evaluación técnica de una Microred de energía renovable solar-baterías, en el
laboratorio de testeo del parque tecnológico de Guatiguará**

Kevin Esteban Álvarez Londoño, Felipe Andrés Almeyda Herrera

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Mecatrónico

Director

John Leonardo Quiroga Pineda

M.Sc. en Ingeniería Electrónica

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad Ingeniería Mecatrónica

2023

Dedicatoria

Se este trabajo lo dedico a mis amigos que conocí en este proceso de formación, son grandes personas que me ayudaron a progresar en todas las áreas de la vida y merecen una gran mención por todo el apoyo, también a mi familia ya que todos de una u otra forma apoyaron este proceso. Pero principalmente a mis padres Martha Álvarez y Jaime Reyes ambos apoyaron este proceso y permitieron que esta etapa este culminando. Dejar una lista de personas sería imposible por lo que dedico este trabajo a todas las personas que hicieron parte de otra forma en este proceso de formación.

Kevin Esteban Álvarez Londoño

Esto es para todas las personas que formaron parte del proceso. En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres, Nelly y Pedro, por su amor, apoyo y comprensión a lo largo de los años de estudio. Esto no habría sucedido sin ustedes. También quisiera agradecer a mis compañeros y amigos, con quienes hemos establecido un vínculo de amistad y apoyo mutuo desde los primeros semestres, permitiéndonos mejorar cada día. Gracias por compartir conmigo varias alegrías y tristezas y por estar ahí en los momentos más difíciles de esta etapa. Su amistad fue un regalo invaluable. Finalmente quisiera agradecer a todos los profesores que me acompañaron con su sabiduría, paciencia y dedicación. Sus enseñanzas tuvieron un profundo impacto en mi aprendizaje profesional y personal.

Felipe Andrés Almeyda Herrera

Agradecimientos

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a la Universidad Santo Tomás por proporcionarnos los equipos de medición y suministros eléctricos que resultaron fundamentales para la ejecución exitosa de este proyecto. De igual manera, extendemos nuestro profundo reconocimiento al Laboratorio de Testeo de la Universidad Industrial de Santander Sede Guatiguara, que amablemente nos brindó el espacio necesario para llevar a cabo las conexiones y pruebas esenciales que formaron parte integral de nuestra investigación. Así mismo, a los ingenieros que nos guiaron en el proceso de corrección de este, Ing. Jhon Leonardo Quiroga Pineda e Ing. Luis Rodrigo Mancilla López.

Contenido

Introducción	14
1. Evaluación técnica de una Microred de energía renovable solar-baterías, en el laboratorio de testeo del parque tecnológico de Guatiguará	16
1.1 Formulación del problema del problema y motivo	16
1.2 Justificación.....	17
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo general	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	18
1.4 Organización del documento.....	18
2. Marco referencial	19
2.1 Marco teórico	20
2.2 Marco conceptual	21
2.3 Marco legal.....	23
2.4 Marco tecnológico y científico.....	24
2.5 Condiciones iniciales del proyecto.....	26
3. Diseño metodológico	26
3.1 Diseño técnico general	27
3.1.1 Dimensionamiento de la microred.....	27
3.1.2. Diseño e implementación del circuito eléctrico	28
3.1.3. Red de monitoreo	28
3.1.4 Plataforma iot	29
3.1.5. Evaluación	29

3.1.6. Productos esperados	29
3.2 Descripción de etapas y su respectivo manejo	30
3.3 Descripción de los productos finales.....	31
4. Resultados y desarrollo	32
4.1. Diseño	33
4.1.1. Diseño eléctrico	33
4.1.2. Estimación de la demanda energética.....	34
4.1.3. Topologías de red	34
4.1.4. Paneles solares.....	37
4.1.5. Baterías	38
4.1.6. Inversores	40
4.1.7. Controladores de carga	41
4.1.8. Elementos seleccionados y conexión eléctrica.....	43
4.1.9. Selección y puesta en marcha del sistema de monitorización	47
4.1.10 Servidor	50
4.1.11 Placa de adquisición de datos	51
4.1.12. Sensores para medición	52
4.1.13. Conexión sistema IoT.....	53
4.1.14 Integración y código de sensores.....	57
4.2. Simulaciones-pruebas- caracterización	61
4.2.1. Pruebas de software antes de conexión	61
4.2.2. Pruebas parte eléctrica antes de conexión a carga.....	63
4.2.3 Pruebas de conexión a la infraestructura eléctrica del laboratorio	65

4.3. Resultados	67
4.3.1. Resultados gráficos de variables en el sensor AC inversor	68
4.3.2. Resultados gráficos de variables en el sensor ac cocina.....	72
4.3.3. Resultados gráficos de variables en el sensor DC baterías.....	76
5. Discusión de resultados.....	81
5.1 Validación técnica	81
5.2 Validación ambiental.....	82
5.3 Validación económica	82
6. Conclusiones y trabajos futuros	84
6.1 Conclusiones	84
6.2 Trabajos futuros	84
Referencias.....	86

Lista de tablas

Tabla 1.*Establecimiento de la carga en términos de potencia* 34

Tabla 2.*Costo de equipos instalados*..... 83

Lista de figuras

Figura 1. <i>Divisiones del proyecto</i>	27
Figura 2. <i>Descripción de las fases y manejo general</i>	30
Figura 3. <i>Casa modelo del laboratorio testeo</i>	32
Figura 4. <i>Parte superior de la casa</i>	33
Figura 5. <i>Ejemplo sistema off-grid</i>	35
Figura 6. <i>Ejemplo sistema on-grid</i>	36
Figura 7. <i>Ejemplo sistema hibrido</i>	37
Figura 8. <i>Paneles solares</i>	38
Figura 9. <i>Batería de plomo acido VR</i>	39
Figura 10. <i>Batería de gel</i>	39
Figura 11. <i>Batería de iones de litio</i>	40
Figura 12. <i>Batería Netion NPD12-55Ah 12V</i>	40
Figura 13. <i>Inversor de onda pura</i>	41
Figura 14. <i>Representación de la onda pura senoidal</i>	41
Figura 15. <i>Controlador KTD1210</i>	43
Figura 16. <i>Diagrama conexiones generales</i>	44
Figura 17. <i>Diagrama de conexión paneles, controlador, baterías inversores</i>	45
Figura 18. <i>Tablero trifásico</i>	46
Figura 19. <i>Tablero bifásico</i>	47
Figura 20. <i>Logo Home Assistant</i>	49
Figura 21. <i>Comparativa entre Raspberry Pi 3 y Raspberry Pi 4</i>	51
Figura 22. <i>ESP32 y GPIO</i>	52

Figura 23. <i>Sensor PZEM-004T V3 - 100A (AC)</i>	53
Figura 24. <i>Sensor PZEM-017 50A (DC)</i>	53
Figura 25. <i>Sistema domótico general</i>	54
Figura 26. <i>Comunicaciones entre dispositivos</i>	55
Figura 27. <i>Pasos implementación</i>	56
Figura 28. <i>Código yaml para sensor ac inversor pzem004t v3</i>	57
Figura 29. <i>Código yaml para sensor AC cocina PZEM004T V3</i>	58
Figura 30. <i>Código yaml para sensor DC de batería</i>	59
Figura 31. <i>Esphome y el pzemcocina</i>	59
Figura 32. <i>Sensor pzemcocina específico</i>	59
Figura 33. <i>Añadir bloque de sensor</i>	60
Figura 34. <i>Sensor puesto en dashboard</i>	60
Figura 35. <i>Datos de la máquina virtual.</i>	61
Figura 36. <i>Demostración servidor virtualbox</i>	62
Figura 37. <i>Prueba servidor virtualizado</i>	63
Figura 38. <i>Prueba de controlador de carga y baterías</i>	64
Figura 39. <i>Verificación de corriente entregada por el panel</i>	64
Figura 40. <i>Conexión de prueba a infraestructura del laboratorio</i>	66
Figura 41. <i>Prueba de conexión sensor PZEM-017</i>	67
Figura 42. <i>Corriente en la salida del inversor</i>	68
Figura 43. <i>Medición de energía proporcionada por el inversor</i>	69
Figura 44. <i>Factor de potencia por el inversor</i>	70
Figura 45. <i>Frecuencia proporcionada por el inversor</i>	71

Figura 46. <i>Medición de potencia proporcionada por el inversor.....</i>	71
Figura 47. <i>Voltaje a la salida del inversor</i>	72
Figura 48. <i>Medición de corriente ubicado en la cocina</i>	73
Figura 49. <i>Medición de energía sensor ubicado en la cocina</i>	73
Figura 50. <i>Factor de potencia en la cocina</i>	74
Figura 51. <i>Medición de frecuencia ubicado en la cocina.....</i>	75
Figura 52. <i>Potencia activa en el sensor de cocina AC</i>	75
Figura 53. <i>Medición de voltaje con el sensor de cocina.....</i>	76
Figura 54. <i>Comportamiento de la corriente en las baterías.....</i>	77
Figura 55. <i>Energía en las baterías mediante sensor DC.....</i>	77
Figura 56. <i>Medición de potencia en las baterías sensor DC.....</i>	78
Figura 57. <i>Voltaje en las baterías usando el sensor DC</i>	79
Figura 58. <i>Potencia de entrada vs potencia de salida del inversor.....</i>	80
Figura 59. <i>Eficiencia del inversor en el tiempo</i>	80

Lista de apéndices

Apéndice A. *Guía paso a paso del software iot*

Nota: (véase archivo externo)

Resumen

En el marco de este proyecto, se ha desarrollado una microrred de energía solar con una topología off-grid, lo que implica su desconexión de la red eléctrica convencional. Para llevar a cabo la monitorización de esta microrred, se ha empleado el sistema de domótica Home Assistant, el cual se ha revelado como una solución óptima. Home Assistant, un proyecto de código abierto se distingue por su versatilidad y cuenta con numerosos complementos que lo hacen idóneo tanto para aplicaciones residenciales como para pequeñas industrias. La monitorización de la microrred se centra en variables críticas, como la corriente y el voltaje, permitiendo un análisis preciso del consumo de energía en tiempo real. Este enfoque es particularmente valioso para hogares e industrias que desean emanciparse de la dependencia de las compañías eléctricas tradicionales. La capacidad de acceder a datos en tiempo real sobre el consumo de energía ofrece la oportunidad de implementar prácticas de consumo responsable y ahorro de energía, lo que, a su vez, contribuye a la reducción de la huella de carbono. En un contexto más amplio, este proyecto no solo representa un avance tecnológico y energético, sino que también tiene implicaciones sociales significativas. La implementación de microrredes fotovoltaicas en áreas no interconectadas puede mejorar las condiciones de vida de las comunidades, reducir la huella de carbono y fomentar la independencia energética. Estas iniciativas están alineadas con la creciente aceptación de las energías renovables en Colombia y su impacto positivo en el medio ambiente y la economía. En resumen, este proyecto representa un paso importante hacia un futuro energético más sostenible y responsable.

Palabras clave: home assistant, microrred, off-grid, energía fotovoltaica, tiempo real

Abstract

Within the framework of this project, a solar energy microgrid has been developed with an off-grid topology, which implies its disconnection from the conventional electrical grid. To carry out the monitoring of this microgrid, the Home Assistant home automation system has been used, which has proven to be an optimal solution. Home Assistant, an open-source project, is distinguished by its versatility and has numerous add-ons that make it ideal for both residential applications and small industries. Microgrid monitoring focuses on critical variables, such as current and voltage, allowing accurate analysis of power consumption in real time. This approach is particularly valuable for households and industries that want to emancipate themselves from dependence on traditional electric companies. The ability to access real-time data on energy consumption offers the opportunity to implement responsible consumption and energy saving practices, which, in turn, contributes to the reduction of the carbon footprint. In a broader context, this project not only represents a technological and energy breakthrough, but also has significant social implications. The implementation of photovoltaic microgrids in non-interconnected areas can improve the living conditions of communities, reduce the carbon footprint and promote energy independence. These initiatives are aligned with the growing acceptance of renewable energies in Colombia and its positive impact on the environment and the economy. In summary, this project represents an important step towards a more sustainable and responsible energy future.

Keywords: home assistant, microgrid, off-grid, photovoltaic energy, real time

Introducción

La energía en un breve periodo de tiempo ha evolucionado y se ha adaptado a nuevas formas de generación que sean amigables con el medio ambiente; como lo es la energía solar, es por esto, que debemos hacer frente al futuro y pensar en un equilibrio tanto ambiental como económico. En Colombia, la transición energética ha estallado, dando lugar a nuevas posibilidades para las comunidades más olvidadas y recónditas del país. Además, la energía solar es una fuerte opción para todos, ya que por las condiciones geográficas-ambientales y de posición de nuestro territorio tendríamos una excelente captación de radiación solar que se traduciría en mayor eficiencia de los sistemas energéticos tanto on-grid como off-grid. Los sistemas de generación de energía renovables posicionados en Colombia no tienen un complemento de monitorización para que las personas tengan un conocimiento general de su estado red. Por consiguiente, el proyecto busca brindar apoyo al sector de las energías renovables de la mano del IoT. El proyecto en términos generales plantea un sistema funcional realizado en una casa modelo del parque tecnológico de Guatiguará. Se implementará un sistema de generación de energía solar off-grid, el cual estará conectado y respaldado por un sistema de baterías, dicho sistema será monitorizado con ayuda del IoT y se podrá visualizar de manera fácil en cualquier dispositivo. Las principales variables para monitorizar serán la corriente eléctrica de tanto entrada como de salida, teniendo en cuenta que el voltaje de entrada será regulado por el controlador PWM a 12V como lo requiere el inversor.

Es importante que las personas sepan su gasto energético para así aprender a ser sostenibles realmente. En la región la monitorización en tiempo real del consumo energético no había sido tan importante ya que siempre se ha dependido del proveedor. Sin embargo, En la actualidad, contar con energía es fundamental, y es por esta razón que los sistemas de monitorización pueden ser de

gran ayuda para identificar qué electrodomésticos consumen más energía y cuándo ocurre este consumo a lo largo del día. Además, esta información nos permite evaluar la salud de los equipos y detectar posibles fallos o problemas de funcionamiento. Todo esto tendrá un impacto en la comunidad general que use energías limpias ya que sabrán el estado actual de su red (generación y consumo) y podrán planificar métodos energéticos de ahorro eficaces. A la vez es importante la incursión de la ingeniería mecatrónica en la energía renovable y su apoyo al medio ambiente por lo que este tipo de proyectos generan un gran impacto.

1. Evaluación técnica de una Microred de energía renovable solar-baterías, en el laboratorio de testeo del parque tecnológico de Guatiguará

1.1 Formulación del problema del problema y motivo

La generación hidráulica en Colombia representa el 68% de la energía generada mientras las generadoras térmicas suplen el 30.7% de la energía consumida [1]. Estas plantas térmicas funcionan mediante combustibles fósiles como carbón y gas de lo que se desprende que el consumo energético en los hogares colombianos contribuye en la emisión de dióxido de carbono y de gases de efecto invernadero en el mismo porcentaje. Además, bajo condiciones climáticas desfavorables (verano, fenómeno del niño) las reservas de agua pueden disminuir, y las plantas térmicas, deban suplir la energía que las plantas hidráulicas ya no puedan generar, aumentando el porcentaje de consumo de energía de combustible fósil desde los hogares. Así mismo, aunque la generación hidroeléctrica se presenta como energía renovable tiene efectos negativos sociales y ambientales [2], ya que implica mudar forzosamente a la población, generar deforestación ambiental e invertir en grandes costos de mantenimiento [3]. Otro problema que aún existe en el país es la existencia de zonas no interconectadas (ZNI). En Colombia existen regiones como Nariño y chocó con problemas energéticos, por varios motivos como las malas administraciones o el difícil acceso a estas zonas apartadas de las cabeceras municipales, Se tiene conocimiento de aproximadamente 1710 poblados en el territorio nacional no cuentan con un servicio eléctrico decente y la mayoría de la población dependen de velas y generadores eléctricos que funcionan gracias a los combustibles fósiles [4]. El motivo de este estudio radica en la preocupación general de la gente por el coste y el uso de la energía en la vida cotidiana. Se centra especialmente en la creciente necesidad de encontrar soluciones más sostenibles y viables. La energía solar es una alternativa

que permite independizarse del sistema eléctrico nacional, permitiendo a los individuos convertirse en proveedores y productores esenciales de su propia energía. Además, de implementar un sistema de monitorización que proporcione información precisa y real sobre el consumo de los electrodomésticos, aparte de ser de fácil acceso. Lo que contribuirá a un uso más eficiente de la energía por parte del usuario.

1.2 Justificación

El proyecto aporta significativamente tanto en investigación e implementación de tecnologías como en el desarrollo social. Desde la perspectiva de la investigación, este proyecto proporciona una base sólida que los estudiantes de la Universidad Santo Tomás pueden utilizar para llevar a cabo prácticas concretas relacionadas con instalaciones eléctricas y la implementación de sistemas domóticos.

En cuanto al impacto social, la implementación de proyectos como este contribuye a la reducción de la huella de carbono y mejora las condiciones de vida de las personas que residen en zonas no interconectadas a la red eléctrica convencional. Esto tiene un impacto positivo en la calidad de vida de estas comunidades.

Entre los resultados destacados, se encuentra un sistema de monitoreo que se ajusta perfectamente al proyecto implementado. Este sistema permite la monitorización de variables críticas en el ámbito energético, como la corriente, el factor de potencia, los voltajes, entre otros. Estos datos son fundamentales para que las personas que aplican este tipo de proyectos puedan conocer con precisión su generación y consumo de energía, lo que les permite tomar decisiones informadas y eficientes en el uso de la energía.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento técnico de una Microred Solar-baterías, en el laboratorio de Testeo del parque tecnológico de Guatiguará.

1.3.2 Objetivos específicos

Diseñar e Implementar una Microred de energía solar off-grid con baterías como fuente de respaldo en el laboratorio de Testeo del parque tecnológico de Guatiguará.

Diseñar e implementar un sistema IoT para la adquisición, procesamiento y visualización de datos en tiempo real de las variables eléctricas.

Validar el comportamiento técnico-ambiental del sistema teniendo en cuenta la potencia suministrada por cada uno de los elementos generadores del sistema y comparando el tiempo de suplencia energético suministrado.

1.4 Organización del documento

La estructura de este proyecto de grado se divide en seis incisos que abordan de manera integral nuestra investigación. El inciso 2 presenta los fundamentos del proyecto, incluyendo los marcos de referencia, el marco legal, el marco teórico y el estado del arte, brindando un contexto sólido para entender nuestro trabajo. El inciso 3 se centra en la metodología, donde detallamos como se desglosa el trabajo realizado y en que se centrara. En el inciso 4, exploramos el desarrollo de nuestro proyecto, en el inciso 5 se realiza la disucusion y el análisis en de los datos obtenidos, destacando los principales resultados y descubrimientos, finalmente en el inciso 6 concluimos esta

tesis presentando las conclusiones derivadas de nuestro estudio y colocando posibles direcciones futuras, destacando así la relevancia de nuestro trabajo en el contexto de futuras investigaciones en este campo.

2. Marco referencial

La energía renovable en especial la fotovoltaica ha generado un estallido tecnológico de gran magnitud, por lo cual se ha incursionado en proyectos tanto gubernamentales como de entes privados en los cuales se busca independizar diferentes sectores de la generación energética convencional (Energías fósiles) tanto de servicios industriales como hogareños. [5]

Un claro ejemplo de apuesta al cambio por parte gubernamental es la planta solar de Nazareth en la alta guajira, Colombia. En dicho proyecto gubernamental se tiene a disposición 1572 paneles Alcanzando una capacidad de 442,56 kilovatios pico que surten de energía aproximadamente a 1918 familias.[6]

Por otro lado, están los proyectos privados como el hacer sostenible una casa donde empresas como auto solar [7], brindan apoyo a privados en tanto la venta como el soporte de equipos, a su vez el monitoreo juega un papel importante y varias opciones saltan a la luz desde realizar un sistema de monitoreo local hasta un sistema en la nube.

Algunos fabricantes relacionados al ámbito de generación fotovoltaica manejan sistemas de monitorización propios como lo son Victron, Fronius, Growatt. Sin embargo, son proyectos cerrados y se centran en solo sus propios componentes para darles soporte a lo largo del tiempo. Es por esto por lo que se busca incursionar en sistemas de monitoreo abiertos a todo el mundo y que cualquier persona que posee una red solar en el hogar pueda utilizar sin costo alguno.

2.1 Marco teórico

Desde tiempos antiguos la civilización ha buscado el aprovechamiento de todos los recursos disponibles esto incluye recursos como los rayos del sol. Los romanos aprendieron a utilizar invernaderos con ventanas de cristal para hacer que los frutos crecieran en condiciones óptimas y con suficiente luz. Rápidamente entre el siglo XIX-XX, científicos como Fritts en 1883 materializaron el efecto fotovoltaico el cual desencadenó una opción que 70 años después tomaría tendencia (1953) cuando los laboratorios Bell consiguieron la celda fotovoltaica funcional y comercializable.[8]

De este modo se han buscado sistemas y formas de aprovechar la luz solar, es por esto por lo que en temas de generación energética fotovoltaica (FV), existen tres tipos de conexión que se pueden adecuar a diferentes necesidades y condiciones; tanto una conexión aislada, una conectada a la red o híbrida son válidas, sin embargo, las condiciones de donde se vaya a realizar la instalación influirán en el tipo de conexión a elegir.

Por ejemplo, la conexión aislada (off-grid) mayormente se utiliza para lugares donde no hay energía, es decir lugares retirados de los centros de distribución. Para este tipo de sistemas es necesario acumular energía en baterías y llegado el momento donde el sol baje o allá sol nulo, se pueda suplir con la energía almacenada a lo largo del día de recolección. Los off-grid se componen principalmente de paneles solares, controladores, inversores y baterías. La principal ventaja de la conexión aislada es que su uso se da en lugares que no pueden depender de redes eléctricas o que quieren ser independientes energéticamente. Su desventaja es el costo a comparación de una red on-grid.

En segundo lugar, se tiene la conexión on-grid, este tipo de sistema se utiliza cuando se dispone de red eléctrica convencional, no hay necesidad de usar baterías ya que se usa la red

convencional como banco energético. lo que la hace particular a este tipo de sistema es que pueden devolver el exceso de electricidad generado a la red cuando se produce demasiado, lo que le permite sumarlo a un uso futuro. Cabe resaltar que este sistema dejaría de funcionar si deja de haber red energética convencional (aporta energía de forma sincronizada con la red).

Finalmente, encontramos una conexión híbrida que se divide en dos categorías: el sistema híbrido de alimentación y el sistema híbrido de apoyo. Estas soluciones híbridas son especialmente diseñadas para ubicaciones con dificultades en la red eléctrica, falta de suministro eléctrico o cortes frecuentes en la misma. Estos sistemas son versátiles y pueden ser implementados en diversas situaciones, como infraestructuras de telecomunicaciones, aplicaciones ganaderas que requieren un alto consumo energético sostenido, así como en contextos industriales y residenciales [9]. Cada una de estas estructuras actuales para generar energía eléctrica debe ir acompañada de un componente crucial que se enfoque en mostrar de manera clara la producción y consumo de energía que caracteriza a un sistema convencional. Es aquí donde el Internet de las cosas (IoT) adquiere un papel fundamental. Ya que Existen cuatro componentes fundamentales en el Internet de las cosas (IoT): el hardware (que incluye sensores y dispositivos), la conectividad (como wifi, ethernet y la transmisión de datos hacia y desde la nube), el software (encargado de analizar la información recibida del hardware y tomar decisiones) y la interfaz de usuario (que determina cómo el sistema IoT interactúa con el usuario). Las plataformas IoT nos ofrecen el software con las capacidades necesarias para conectar estos cuatro elementos. [10]

2.2 Marco conceptual

Con la creciente aplicación de la energía fotovoltaica en entornos tanto domésticos como industriales, se ha visto influida por una terminología que a veces resulta ambigua. Uno de los

términos que puede dar lugar a confusiones es "eficiencia". En el contexto de una microrred solar, la eficiencia se define como la relación entre la cantidad de energía generada y la cantidad de energía consumida. Cuando se afirma que una microrred es eficiente, se está indicando que dicha red es capaz de generar la cantidad de energía necesaria para satisfacer la demanda energética de los dispositivos presentes en la vivienda modelo.

Cuando se hace referencia a la topología de red en este contexto, se enfoca en el aspecto específico de este proyecto, es decir, las topologías de red fotovoltaica. Estas hacen alusión a la disposición y conexión de los paneles fotovoltaicos, inversores y otros componentes en el sistema. Es importante destacar que la topología de una red fotovoltaica puede tener un impacto significativo en su rendimiento y eficiencia.

El propósito fundamental de este proyecto es proporcionar y monitorizar el suministro de energía en hogares o pequeñas industrias ubicadas en zonas no interconectadas. En muchas regiones de Colombia, existen comunidades y áreas remotas donde la distribución de energía a través de los canales convencionales resulta desafiante. Con este contexto en mente, se puede definir un sistema domótico con un enfoque en microrredes fotovoltaicas como un medio para recopilar datos sobre el desempeño actual de la red, incluyendo la producción y el consumo de energía, entre otros aspectos. Estos datos son valiosos para llevar a cabo un registro adecuado y permite a los usuarios conocer en qué áreas consumen más energía.

Una vez que se ha definido el concepto de sistema domótico o IoT, es fundamental abordar la noción de un sistema local. Un sistema local hace referencia a una solución que se aloja en un servidor de propiedad y se encuentra ubicada en la casa modelo del proyecto. Este servidor desempeña el papel de centro de almacenamiento y gestión de los datos recolectados de manera constante por los sensores. Una característica destacada de este sistema domótico es su capacidad

de acceso remoto. Esto implica que, incluso si el usuario no está conectado a la misma red local en la que se encuentra el servidor, aún podrá acceder a los datos. Este acceso remoto se logra exponiendo el sistema a través de Internet, asignándole un dominio específico. En este contexto, el dominio se convierte en una forma sencilla de acceder al sistema a través de la web, eliminando la necesidad de recordar una serie de números denominados direcciones IP, que apuntan al servidor.

2.3 Marco legal

El ministerio de minas y energía de Colombia, mediante la ley 1715 de 2014 – Art. 19 “Desarrollo de la energía solar” promueve el uso de fuentes de generación energéticas renovables, y junto a la ley 2099 de 2021 – Capítulo 2; Refuerza la ley 1715. Estas leyes buscan que la energía solar participe activamente en áreas no interconectadas, en la provisión de servicios públicos domiciliarios y alumbrado público, así como en otros usos energéticos que son fundamentales para lograr el desarrollo económico sostenible, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y garantizar un abastecimiento energético seguro. Asimismo, con estos mismos objetivos, se busca fomentar la gestión eficiente de la energía y la implementación de sistemas de medición inteligente, que incluyen tanto la eficiencia energética como la respuesta a la demanda. A sí mismo, en el proyecto se involucran normativas especiales como la NTC-2050 – Sección 690 la cual especifica todo lo relacionado con los sistemas solares fotovoltaicos de igual importancia se hace uso del artículo 690-42. Punto de conexión a puesta a tierra del sistema. Donde la conexión a puesta a tierra del circuito de c.c. se debe hacer en cualquier punto del circuito de salida fotovoltaico. Ubicando el punto de conexión a tierra lo más cerca posible de la fuente fotovoltaica,

el sistema quedará mejor protegido contra las posibles subidas de tensión producidas por los rayos. 690-43.

Por otro lado, se tiene en cuenta la Sección 20 del RETIE que establece los criterios para alambres y cables eléctricos utilizados en instalaciones eléctricas. Se categorizan según su aislamiento y protección mecánica, con requisitos específicos para su elección, instalación, capacidad de carga, identificación, almacenamiento y manejo. Estas regulaciones buscan asegurar la seguridad y resistencia de las instalaciones eléctricas, evitando riesgos derivados de un uso inadecuado de los conductores.

2.4 Marco tecnológico y científico

Las micro redes fotovoltaicas off-grid han emergido como una solución innovadora y sostenible para enfrentar los desafíos energéticos en áreas remotas y con acceso limitado a la red eléctrica centralizada. Este estado del arte presenta un análisis de los avances tecnológicos y las aplicaciones de estas micro redes, con el objetivo de comprender su evolución y potencial para proporcionar una fuente confiable y limpia de energía en diversos contextos. En el ámbito de la tecnología fotovoltaica, se ha presenciado un desarrollo significativo en la eficiencia y costo de los paneles solares. Los avances en materiales y procesos de fabricación han permitido que los paneles fotovoltaicos sean más asequibles y capaces de generar mayor cantidad de energía a partir de la radiación solar [11]. Estos avances han contribuido a aumentar la viabilidad económica de las micro redes fotovoltaicas off-grid y a expandir su aplicación en comunidades rurales, islas, áreas montañosas y otros lugares remotos. La tecnología de almacenamiento de energía ha sido un elemento clave para el éxito de estas micro redes independientes. El uso de baterías de iones de litio y otros sistemas avanzados de almacenamiento ha mejorado significativamente la capacidad

de almacenar la energía generada durante los períodos de máxima irradiación solar para su uso durante la noche o en momentos de baja generación [12]. Esto ha garantizado una gestión eficiente de la energía y una mayor confiabilidad del suministro eléctrico, reduciendo la dependencia de generadores diésel y combustibles fósiles. Los controladores de carga PWM han demostrado ser fundamentales en la operación segura y eficiente de las micro redes fotovoltaicas off-grid. Estos dispositivos regulan la carga y descarga de las baterías, protegiéndolas contra sobrecargas y descargas profundas que podrían afectar su vida útil [13]. Los avances en la tecnología de controladores de carga han permitido una mayor precisión en la gestión de la energía, optimizando el rendimiento del sistema y maximizando la vida útil de las baterías. La adopción de inversores de onda pura ha mejorado significativamente la calidad de la energía suministrada por las micro redes fotovoltaicas off-grid. Estos inversores convierten la corriente continua almacenada en las baterías en corriente alterna de alta calidad, proporcionando una fuente de energía estable y confiable para los dispositivos eléctricos estándar [14]. Esta mejora en la calidad de la energía ha facilitado la implementación de estos sistemas en aplicaciones comerciales e industriales, así como en proyectos de electrificación rural y servicios básicos en áreas apartadas.

En el ámbito de la gestión y monitoreo del sistema, las plataformas como Home Assistant y otras herramientas de software han demostrado ser eficaces para supervisar en tiempo real el rendimiento y estado de las micro redes. Estas interfaces intuitivas proporcionan datos y análisis relevantes, permitiendo a los usuarios tomar decisiones informadas sobre el uso eficiente de la energía y el mantenimiento del sistema. Además, facilitan la detección temprana de posibles fallas o problemas, lo que resulta en una mayor fiabilidad y disponibilidad del suministro eléctrico. [15]

En conclusión, se refleja un panorama prometedor y en constante evolución. Los avances tecnológicos en paneles solares, almacenamiento de energía, controladores de carga PWM,

inversores de onda pura y herramientas de monitoreo han impulsado el crecimiento y la adopción de estas soluciones en diferentes escenarios. Las micro redes fotovoltaicas off-grid se presentan como una alternativa viable y sostenible para mejorar el acceso a la electricidad en áreas alejadas de la red eléctrica centralizada, contribuyendo así a un futuro más limpio, descentralizado y energéticamente independiente

2.5 Condiciones iniciales del proyecto

El proyecto nace de un proyecto de Fodein con el título “Implementación y evaluación del comportamiento dinámico de una Microred de energías renovables en el campus Piedecuesta de la Universidad Santo Tomás”, pero no tiene un prototipo base o un trabajo previo sobre el cual fue diseñado.

3. Diseño metodológico

Este proyecto consiste en la implementación y evaluación de una Microred solar con baterías como fuente de energía de respaldo, en el laboratorio de testeo del parque tecnológico de Guatiguará.

La metodología parte de las siguientes condiciones iniciales:

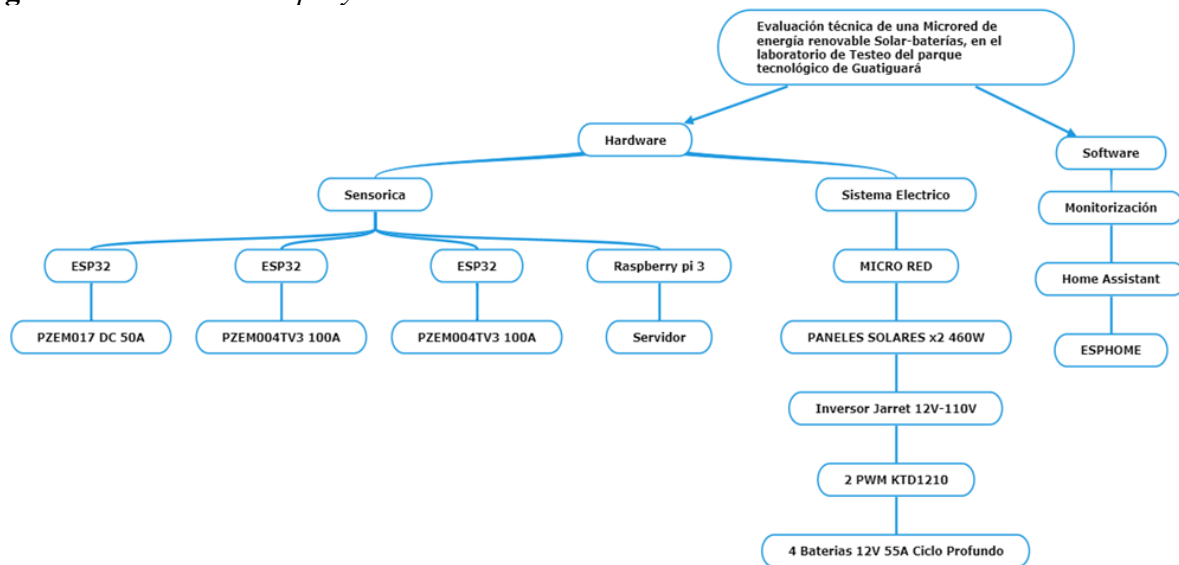
- La disponibilidad de generación de energía a partir de fuente solar es 1000W, a través de 2 paneles solares de 490W.
- Se cuentan con 4 baterías de ácido plomo de 55Ah 12V. No hay disponibilidad de utilizar baterías de otro tipo o más baterías.

Así mismo, la metodología utilizada para el cumplimiento de los objetivos sigue los siguientes pasos:

1. Dimensionamiento de la Microred
2. Diseño e implementación del circuito eléctrico de la Microred
3. Diseño e implementación de red de monitoreo
4. Implementación plataforma IoT
5. Evaluación del comportamiento

3.1 Diseño técnico general

Figura 1. Divisiones del proyecto



3.1.1 Dimensionamiento de la microred

Para el dimensionamiento de la Microred, normalmente se debe determinar la demanda energética de las cargas, la capacidad del almacenamiento de la energía y verificar la disponibilidad del recurso solar en la ubicación de la instalación. A partir de esto, se estima cuantos paneles solares y de que tipo son necesarios para la Microred. En resumen, primero se determina la carga y después se calcula que tamaño debe tener la red generadora. Sin embargo, debido a las

condiciones iniciales de este proyecto el dimensionamiento de la Microred se realizará de manera inversa. Primero se establece la capacidad de generación y después se determina que carga se puede alimentar.

3.1.2. Diseño e implementación del circuito eléctrico

A partir de los elementos con los que se debe implementar la microrred se establece el circuito eléctrico que puede variar teniendo en cuenta las diferentes topologías de conexión de los paneles solares con los controladores de carga y las baterías. Se busco la topología que más se adapta a las condiciones limitantes de equipos y espacio del proyecto.

3.1.3. Red de monitoreo

Para poder validar el comportamiento técnico y ambiental del sistema se debe poder medir la potencia que suministra la microrred a la carga, y la que es consumida por la misma; de esta manera se pueden determinar valores de eficiencia eléctrica. Teniendo en cuenta que la potencia en AC es un fasor se debe de poder determinar el factor de potencia, dejando así que para el sistema de monitoreo se deben medir las siguientes variables como mínimo:

- Potencia eléctrica en AC y DC.
- Corriente eléctrica en AC y DC.
- Voltaje en AC y DC.
- Factor de potencia.

3.1.4 Plataforma iot

La red de monitoreo está conectada a placas de adquisición de datos, estos deberán ser centralizados en un servidor local con conexión a internet de tal manera que los datos pueden ser visualizados de manera remota. Todo esto con el fin de ser nosotros mismos los dueños y poseedores de los datos recolectados.

3.1.5. Evaluación

Para la evaluación técnica del sistema se tomarán los datos dados por la red de monitoreo y se realizara un procesamiento para determinar valores de eficiencia, tiempo de suplencia eléctrica bajo algunas cargas.

Para la evaluación ambiental se calcula la energía promedio generada por la red y se calculara la cantidad de toneladas de CO₂ que se deja de emitir.

3.1.6. Productos esperados

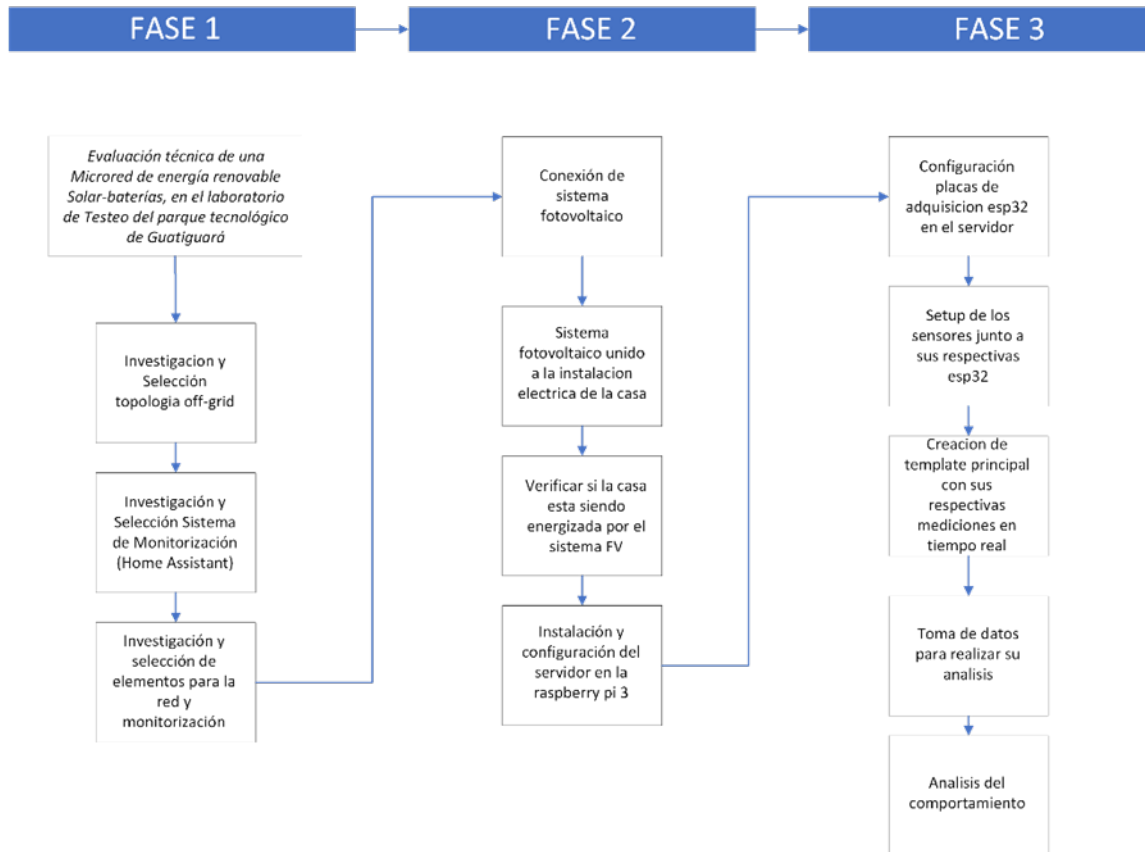
Los productos esperados son:

Prototipo: una microrred eléctrica que permita el estudio de comportamiento de diferentes cargas a través de un sistema de monitoreo, dicho monitoreo debe poderse hacer de manera remota.

Evaluación de la microrred: se realizará una evaluación técnica de la microrred donde se podrá evidenciar el comportamiento eléctrico, en términos de potencia generada, horas de suplencia, eficiencia de los dispositivos.

3.2 Descripción de etapas y su respectivo manejo

Figura 2. Descripción de las fases y manejo general



En la primera etapa, se realizaron investigaciones exhaustivas para seleccionar las conexiones apropiadas antes de instalar el sistema fotovoltaico. La elección de una conexión fuera de la red se basó en la falta de una red eléctrica convencional en el laboratorio de pruebas. Paralelamente, se exploraron sistemas de monitorización seguros y de código abierto. Home Assistant fue identificado como la opción más adecuada.

La segunda fase incluyó la instalación del sistema fotovoltaico y su integración con el sistema eléctrico de la casa modelo para garantizar un suministro constante de energía. Se verificó el sistema mediante pruebas de encendido y apagado de luminarias. Luego, se instaló el sistema

de monitorización en una Raspberry Pi 3 con el software Home Assistant, En la tercera fase, se configuraron las placas de desarrollo ESP32 para integrarse con el sistema de monitorización utilizando un complemento llamado "ESPHome". Se establecieron conexiones con sensores de energía, como PZEM004T V3 AC y el sensor DC PZEM017DC. Estos sensores se agregaron al panel principal de Home Assistant, y se creó una automatización para almacenar los datos de monitorización en un archivo CSV, que posteriormente fueron analizados.

3.3 Descripción de los productos finales

Se presenta una serie de elementos fundamentales en el campo de la ingeniería. En la primera fase, se destaca la importancia de investigar y seleccionar las topologías de conexión adecuadas para la instalación de un sistema fotovoltaico, lo que implica tomar decisiones críticas en ingeniería eléctrica. La elección de una conexión fuera de la red ("off-grid") se justifica por la falta de acceso a una red eléctrica convencional, lo que refleja la necesidad de diseñar la infraestructura eléctrica de manera precisa. Además, la investigación y selección de sistemas de monitorización subrayan la importancia de la ingeniería de control y automatización para supervisar eficazmente el sistema fotovoltaico. La instalación de paneles solares, controladores de carga, inversores y baterías en la segunda fase representa una tarea de ingeniería especializada en sistemas de energía solar, mientras que la integración del sistema fotovoltaico con la red eléctrica de la casa demuestra la relevancia de la ingeniería eléctrica. Finalmente, la configuración de dispositivos y software, la automatización de tareas y el análisis de datos son pilares de la ingeniería de sistemas y control, permitiendo un funcionamiento eficiente y la obtención de información valiosa. En resumen, el proyecto es multidisciplinario en ingeniería ya que abarca

desde la toma de decisiones iniciales hasta la implementación, monitorización y análisis de sistemas relacionados con la energía solar y la automatización.

4. Resultados y desarrollo

El desarrollo se llevó a cabo en la vivienda modelo del laboratorio de pruebas, situado en Guatiguará. A continuación, se muestra una imagen que representa la apariencia de la casa.

Figura 3. *Casa modelo del laboratorio testeo*



Figura 4. *Parte superior de la casa*



Como se puede apreciar en la figura 20, en la parte superior están los paneles solares con los cuales se realizó la implementación.

4.1. Diseño

En esta sección se muestra todo lo relacionado con el desarrollo tanto de la parte eléctrica, como la parte del sistema de monitorización IoT (Software).

4.1.1. Diseño eléctrico

Para el criterio de diseño eléctrico se tiene en cuenta el dimensionamiento de la red, es decir los elementos disponibles para la generación de energía, su transmisión y adecuación.

4.1.2. Estimación de la demanda energética

La estimación de la demanda energética se basa en la revisión de las especificaciones técnicas de los electrodomésticos en el laboratorio de pruebas, como se puede apreciar en la tabla 1. Es relevante mencionar que las luminarias presentes en el espacio son de tecnología LED y carecen de una marca específica, lo que dificulta la obtención precisa de datos sobre su consumo. Por lo tanto, el valor del consumo de estas luminarias se estima en función de la potencia indicada

Tabla 1. Establecimiento de la carga en términos de potencia

Aparato	Cantidad	Potencia promedio (W)	Potencia Total (W)	Horas de uso al día (h)	Consumo diario promedio (Wh/día)	Consumo mensual promedio (KWh/día)
Nevera	1	55,416667	55,41667	2 4	1330	39,9
Aire	1	1080	1080	4, 4	4752	142,56
Horno	1	769,23077	769,2308	0, 1 7	133,33	4
Lavadora	1	183,33	183,33	0, 4	73,33	2,2
Luminaria	6	25,00	150,00	4	600,00	18

Es por esto por lo que es necesario un análisis de las diferentes opciones de topologías que permitan integrar de mejor manera los elementos disponibles para realizar el prototipo.

4.1.3. Topologías de red

Para seleccionar una topología es necesario conocer los tipos de conexiones existentes, en sistemas de paneles solares son los siguientes:

Conexión off-grid: en un sistema de conexión off-grid, se opera independiente de la red eléctrica convencional, es decir, la energía producida por los paneles se consume y el excedente a

esta energía es almacenado en un banco de baterías, existen diferentes métodos de conexión tanto del banco de baterías, como de la conexión del controlador de carga. En el caso de las baterías se recomienda la conexión de las baterías en serie, ya que esto evita paso de corriente cuando el consumo es cero; más en las baterías en paralelo va a existir una circulación de corriente entre las baterías, lo que si existe una batería en mejor condición que la otra va a generar desgaste. El uso de conexión en paralelo solo se debe usar en casos que así lo exija el sistema y se recomienda que las baterías tengan un estado lo más similar posible. En el caso del controlador de carga, este tiene los bornes para los paneles solares, las baterías y la carga. El principal problema de conectar el inversor al bornera de la carga radica en la limitada corriente que puede circular por esta salida de carga; lo que limita en gran medida la potencia que se puede entregar en el sistema. La otra opción y la más usada, es dejar la carga vacía y conectar el inversor directamente a las baterías; esta opción permite que el sistema entregue una mayor cantidad de potencia, pero disminuye la vida útil de las baterías.

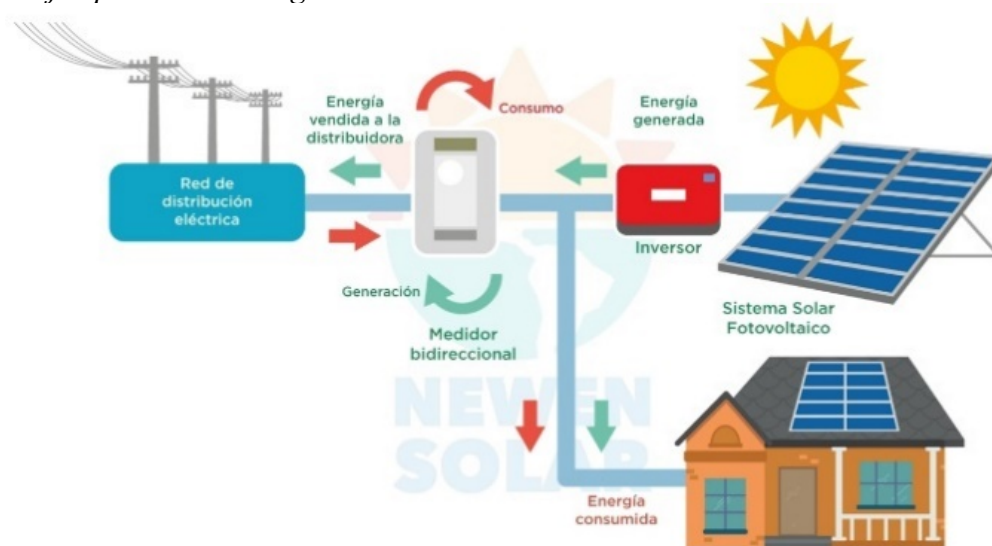
Figura 5. *Ejemplo sistema off-grid*



Tomado [16]

Conexión on-grid: el sistema fotovoltaico está conectado junto a la red eléctrica convencional donde la energía generada por los paneles se inyecta a la red. Este tipo de topología es la más usada en las ciudades ya que evita los elevados costos tanto de la adquisición como del mantenimiento de las baterías. Se dice que la red eléctrica funciona como batería, ya que, cuando la carga consume menos de lo generado el sistema entrega este adicional a la red eléctrica y cuando el sistema produce menos de lo consumido la red eléctrica convencional hace ese respaldo, cabe resaltar que esto con lleva a ciertos costos dependiendo del proveedor de energía. Para este tipo de topología se requiere ciertos permisos del proveedor de energía, así como un contador bidireccional que es el que mide la energía que se entregó y la que se consumió del sistema. Para realizar este tipo de topología también es muy necesario que el inversor cuente con sincronizador eléctrico, que sincroniza en ángulo y fase la microrred con la red eléctrica convencional.

Figura 6. Ejemplo sistema on-grid

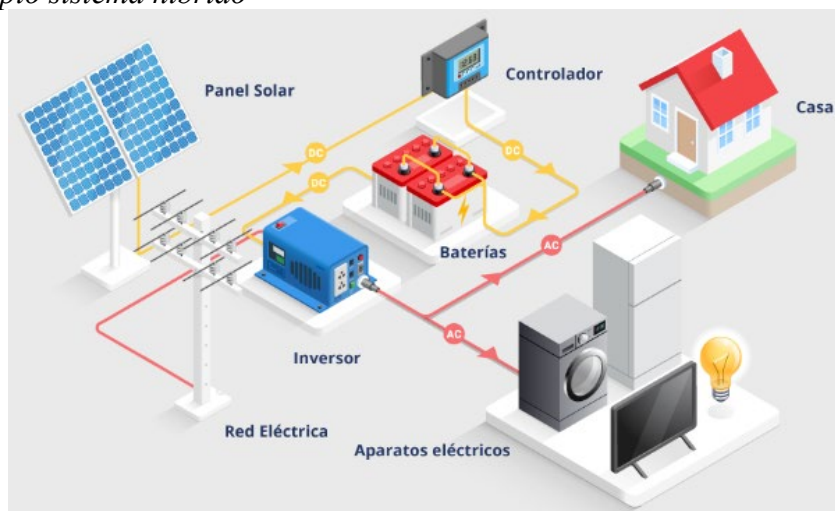


Tomado [17].

Conexión híbrida: hace referencia a un sistema que combina elementos de tanto la conexión off-grid como on-grid, esto con el fin de mitigar limitaciones. Ya que al combinar tanto

la generación solar con el almacenamiento y la capacidad de vender la energía a la red, este tipo de conexión proporciona mayores ventajas en lugares donde la energía eléctrica es muy costosa.

Figura 7. *Ejemplo sistema híbrido*



Tomado [18]

La elección de una topología en un sistema de energía fotovoltaica fue un paso determinante ya que nos permite conocer la forma de conexión y operación de los componentes de nuestro sistema, es por esto, que los objetivos, necesidades, ubicación geográfica y disponibilidad de red han influido en nuestra selección de topología.

Teniendo en cuenta factores del medio como la nula disponibilidad de la red eléctrica, el objetivo del proyecto y la ubicación de nuestra casa modelo. *Se opto por la topología de red off-grid* ya que las horas de sol y la radiación solar en Piedecuesta son adecuadas para realizar la carga de baterías y que estas suplan de energía en periodos nocturnos cuando el sol haya caído.

4.1.4. Paneles solares

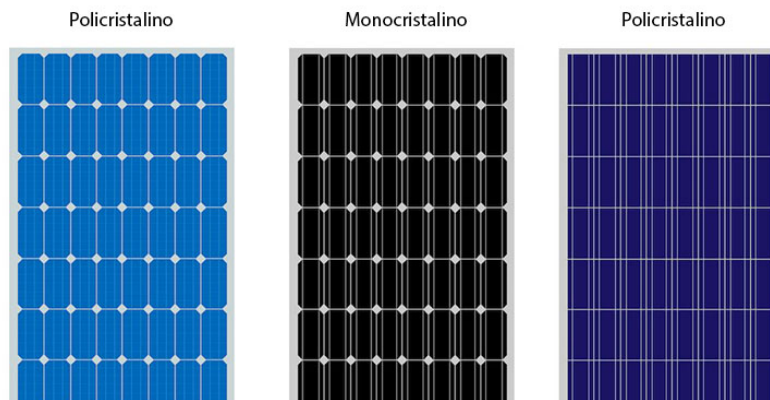
En los paneles solares también se encuentra una difícil elección ya que existen tanto paneles solares policristalinos como monocristalinos, estos dos son de los tipos más comunes y aunque los

dos tipos funcionan para convertir la luz solar en electricidad, estos presentan diferencias en términos eficiencia y costo.

Paneles monocristalinos: están hechos con silicio monocristalino, esto resulta en un material con forma uniforme, por lo que aumenta la eficiencia del panel.

Paneles policristalinos: están hechos con silicio policristalino que se forma al fundir y solidificar múltiples cristales. Son menos uniformes por lo que son menos eficientes. Sin embargo, su precio es más asequible.

Figura 8. *Paneles solares*



Tomado de [19].

Por el presupuesto que se tenía para el proyecto y los equipos con los cuales se contaba se usaron paneles de tipo policristalino ya que son más económicos y su eficiencia es apropiada para la aplicación de investigación.

4.1.5. Baterías

Los sistemas fotovoltaicos usan distintos tipos de baterías para almacenar la energía generada por los paneles solares. Los tipos de baterías más usadas son:

Batería de plomo-acido: son la tecnología más antigua y ampliamente usada. Existen las de electrolito líquido. Son confiables y económicas, pero tienen vida limitada y necesitan mantenimiento.

Figura 9. *Batería de plomo acido VR*



Tomado [20].

Baterías de gel: son baterías selladas de plomo-acido con electrolito gelificado en lugar de líquido. Son seguras, de bajo mantenimiento, pero más costosas que las baterías de plomo acido convencionales.

Figura 10. *Batería de gel*



Tomado [21].

Baterías de iones de litio: son populares por su alta eficiencia y buena vida útil, son más ligeras y compactas pero su precio es elevado.

Figura 11. *Batería de iones de litio*

Tomado [22].

Para los sistemas fotovoltaicos se suele recomendar las baterías de litio, pero estas presentan un costo bastante elevado. Por lo que para este prototipo se usan *baterías de plomo ácido de ciclo profundo*, estas baterías de plomo ácido de ciclo profundo soportan descargas de hasta el 80% con una vida útil de alrededor de 7 años.

Figura 12. *Batería Netion NPD12-55Ah 12V*

Tomado [23].

4.1.6. Inversores

En los sistemas fotovoltaicos los inversores son componentes clave ya que se utilizan para convertir la corriente continua generada por los paneles fotovoltaicos en corriente alterna utilizable en hogares y sistemas eléctricos convencionales. En el mercado se encuentran varios tipos de inversores para cada tipo de aplicación.

En este caso ya que anteriormente hemos realizado el dimensionamiento de la carga y se ha optado por una topología off-grid. Se selecciono un inversor de corriente 2000W 12V-110V en onda pura.

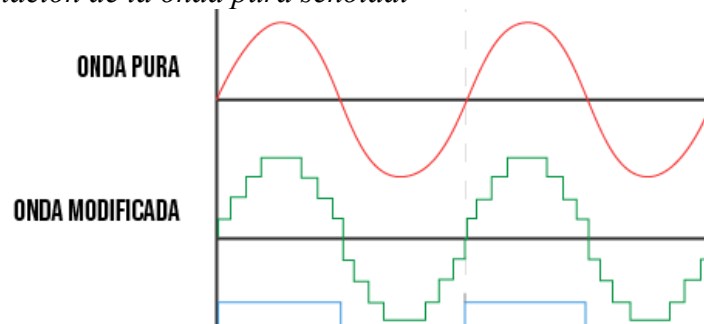
Cuando se habla de onda pura, se hace referencia a que genera una forma de onda de salida senoidal casi perfecta idéntica a una onda senoidal de la red eléctrica convencional y por tener una onda senoidal pura la calidad de la electricidad de salida es buena y con poco rizado o distorsión armónica. Aparte de evitar el zumbido o ruido en equipos proporcionando electricidad silenciosa.

Figura 13. *Inversor de onda pura*



Tomado [24]

Figura 14. *Representación de la onda pura senoidal*



4.1.7. Controladores de carga

Los controladores son parte fundamental de un sistema solar, pues su función principal es controlar la carga de las baterías, para que se carguen adecuadamente y evitar daños por descarga

fuerte o excesiva. Hay varios tipos de controladores disponibles y elegir el controlador adecuado depende de las necesidades, a continuación, los tipos de controlador más usados:

Controladores PWM (Modulación de ancho de pulso), son una opción económica para sistemas pequeños y medianos. Regulan la carga controlando la energía que entra a la batería, reduciendo gradualmente la corriente para no sobrecargarse. Sirve cuando la tensión del panel y la batería son similares.

Controlador MPPT (seguimiento del punto de máxima potencia) avanzado y eficiente. Tienen un algoritmo que rastrea la potencia máxima de los paneles, extrayendo la mayor cantidad de energía posible durante pequeños cambios. Ideal para sistemas grandes y con paneles de diferente voltaje.

Controlador de carga sencillo, muy básico, que sólo impide la sobrecarga de la batería, sin otras funciones.

Controladores duales o múltiples que permiten conectar múltiples paneles y baterías a un solo controlador. Útil en sistemas grandes que requieren control de carga para múltiples grupos de baterías.

Para la selección del controlador se tuvieron dos factores importantes en cuenta; el primero es el precio y el segundo es la confiabilidad del sistema en este tipo de aplicación; por consecuente se elige el controlador de carga PWM modelo *KTD1210* el cual es un controlador de buenas características que regula la carga que entra en las baterías.

Figura 15. *Controlador KTD1210*

Tomado de [25]

4.1.8. Elementos seleccionados y conexión eléctrica

Con la topología general escogida queda por decidir las conexiones entre paneles solares, controladores de carga PWM, baterías e inversor eléctrico. Para la selección de estas conexiones se validó los componentes con lo que el proyecto contaba, los cuales son:

- 2 paneles solares fotovoltaicos de 460 W c/u.
- 2 controladores de carga PWM con salida de carga de 20A.
- 4 baterías de plomo con tecnología de ciclo profundo - 12V y 55Ah como fuentes de respaldo.
- Un inversor eléctrico de onda pura con entrada de 12 V.

Realizando la validación de las topologías de conexión mencionadas en el capítulo anterior se toman las siguientes decisiones:

- Cada panel solar va a estar conectado a un controlado de carga PWM. Esto con el fin de no sobrecargar un solo controlador de carga y poder conectar un banco de baterías a cada panel solar.
- Se conectan 2 baterías a cada controlador de carga. Esto se realiza ya que, la salida de carga del controlador de carga es bastante limitada, por lo que es necesario conectar el inversor eléctrico directamente a las baterías; como el inversor eléctrico funciona con una entrada

única de 12 V obliga a la conexión en paralelo de las baterías y no en serie como es lo recomendado.

Con lo anterior, la conexión es la siguiente:

Figura 16. Diagrama conexiones generales

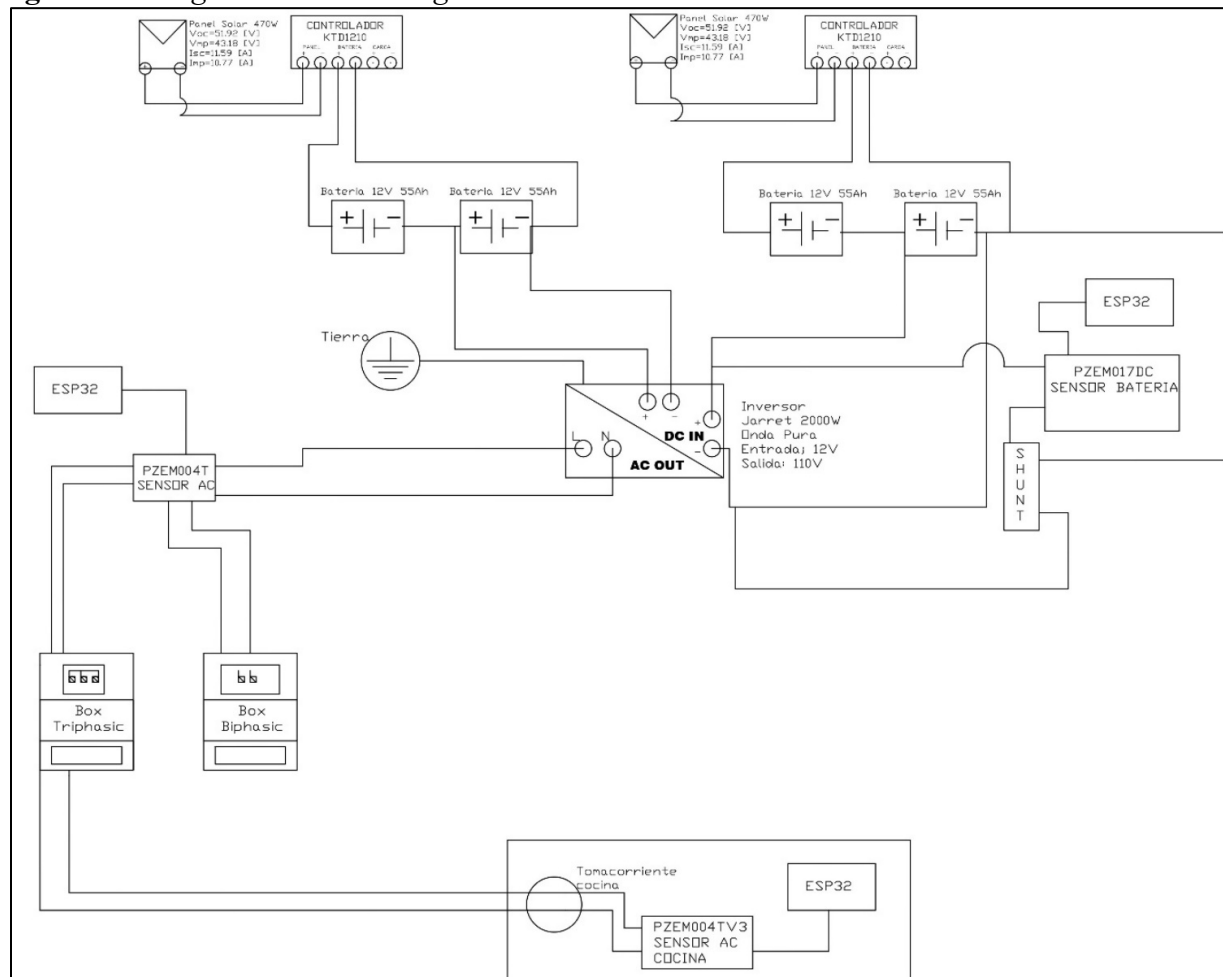
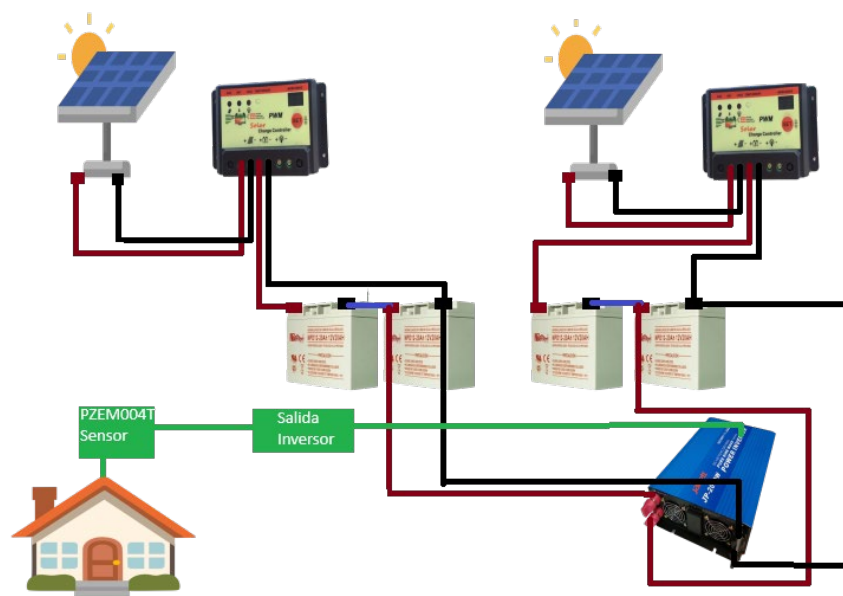


Figura 17. Diagrama de conexión paneles, controlador, baterías inversores

Para la conexión de los paneles solares al controlador de carga se usa un cable calibre 8, ya que por tabla este puede soportar hasta 50 A y según la hoja de datos del panel solar la corriente máxima es de 38 A. Para la conexión entre las baterías y el inversor eléctrico se usa un cable calibre 4 que viene con el inversor eléctrico. La salida del inversor es conectada a los barrajes de los dos tableros eléctricos que cuenta el laboratorio de Testeo, para ello se usan cables calibre 8 marcados en sus puntas con los colores negro y blanco que representan fase y neutro respectivamente. Este tipo de marcación es autorizado por el RETIE.

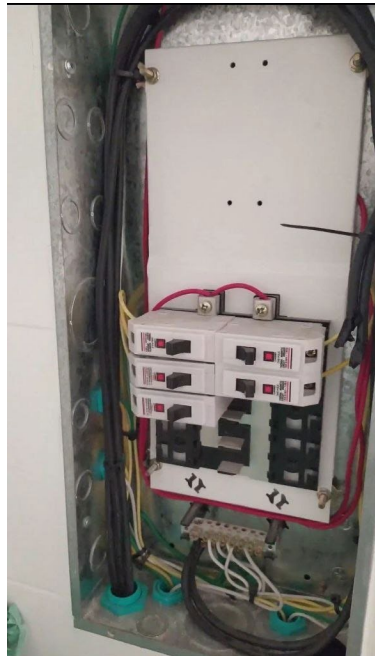
Por otro lado, se encuentran los tableros eléctricos de la casa modelo, los cuales se adaptan para pasar de un sistema trifásico y bifásico a un sistema monofásico, esto se hace ya que el laboratorio de testeo no permitió el cambio de los tableros y también debido a los altos costo que tienen; por ello, para este prototipo los barrajes principales de los tableros fueron puenteados entre sí para que todos quedaran a la misma fase y poder realizar las pruebas.

En la figura a continuación se encuentra el tablero trifásico, cabe recalcar que totalizador no está conduciendo y que las fases que llegan a este dependen de un tablero que se encuentra fuera de la casa y también están apagados. De igual forma como se ha comentado el laboratorio tenía un problema con la conexión a la red eléctrica convencional.

Figura 18. *Tablero trifásico*



En la figura a continuación, se muestra un tablero bifásico el cual tiene la conexión de una parte de la casa. De igual forma los barrajes de este tablero fueron puenteados y las cometidas que llegan desconectadas y aisladas.

Figura 19. *Tablero bifásico*

Una vez realizada la conexión se puede comprobar que la casa este energizada, para esto nos ayudamos de las luminarias como se puede ver [26]. Sabiendo que tenemos energía se procede a realizar la implementación del sistema de monitoreo e implementación de sensores energéticos.

4.1.9. Selección y puesta en marcha del sistema de monitorización

Criterios de software y elementos de medición

En la actualidad muchas plataformas privadas tienen el control de la domótica en general, algunas compañías se centran en poseer un software cerrado que acorta la posibilidad de conexión entre dispositivos, esto hace la tarea de domotizar y monitorizar variables más complejas, puesto que los dispositivos (sensórica) deben tener cierta compatibilidad con el producto que hemos adquirido. Casos específicos como Google Home y Apple HomeKit en los cuales muchos de los dispositivos no son compatibles entre ambos sistemas domóticos entorpece la libre selección de

hardware y nos obliga a buscar soluciones dentro de un sistema cerrado en temas de compatibilidad.

Es por esto por lo que para la selección de nuestro sistema se contemplaron las siguientes opciones:

OpenHAB es una plataforma de automatización de código abierto, flexible y configurable, su fuerte es tener un sistema local para no depender de ningún servicio cloud. sin embargo, la curva de aprendizaje de esta herramienta es más compleja.

Sistema propio: inicialmente se consideró la posibilidad de desarrollar un sistema personalizado utilizando una computadora personal como servidor. Este sistema habría involucrado la activación de servicios como Apache y SQL, además de la programación en Python para crear un servidor. Sin embargo, esta idea se descartó por diversas razones. En primer lugar, la creación de compatibilidad con cada uno de los sensores que se planeaban utilizar habría sido un proceso que requeriría mucho tiempo, ya que habría implicado empezar desde cero, tomando solo alguna forma de comunicación como punto de partida. En segundo lugar, se identificaron posibles problemas para mantener el software debido a la limitación de recursos humanos, ya que éramos un equipo reducido frente a la complejidad y funcionalidad requeridas. En tercer lugar, se necesitaba una solución de software que proporcionara seguridad y fuera fácil de aprender. Por otro lado, también se buscaba un sistema robusto en el cual los datos pudieran registrarse y presentarse en forma gráfica.

Domoticz: es de código abierto permite integrar una amplia variedad de dispositivos, a diferencia de otras opciones propietarias, domoticz puede instalarse en el hogar sin depender del cloud, permite realizar automatizaciones simples. Sus requerimientos de hardware son bajos, sus automatizaciones pueden ser de pago y carece de opciones avanzadas.

Home Assistant: representa una plataforma de software de código abierto destinada a la automatización del entorno doméstico y hasta industrial pequeño. Su principal capacidad reside en la capacidad de integrar y gestionar de forma centralizada una amplia gama de dispositivos inteligentes para el hogar. En contraste con otras alternativas de software propietario, Home Assistant se destaca por su capacidad de instalación local, evitando así la necesidad de depender de servicios en la nube. Acompañado de una interfaz de usuario altamente intuitiva y adaptable, esta plataforma se convierte en una herramienta efectiva para supervisar y controlar, en tiempo real, una diversidad de elementos, como luces, termostatos, cerraduras, cámaras, sensores y más. Uno de sus atributos más notables es la facilidad con la que se pueden configurar automatizaciones y secuencias de tareas poderosas, sin requerir habilidades de programación, gracias a su interfaz visual de arrastrar y soltar. Además, destaca por su integración nativa con más de 1500 dispositivos y plataformas, una característica que se amplía aún más gracias a su comunidad activa. Home Assistant brinda la posibilidad de diseñar tableros personalizados para visualizar y supervisar lo que acontece en el entorno doméstico. Además, es compatible con asistentes de voz como Google Assistant, Amazon Alexa y Siri, permitiendo el control mediante comandos de voz. Con su enfoque centrado en la privacidad, funcionalidad y facilidad de uso, Home Assistant se establece como una solución completa y versátil para la creación de un hogar conectado.

Figura 20. Logo Home Assistant



Tomado [27]

Es por esto por lo que *home assistant* fue seleccionado para implementarlo en el proyecto, su capacidad de ser compatible, su alta personalización haciendo uso de módulos o plugins, y su fácil curva de aprendizaje, aparte de su gran seguridad y estar respaldado por toda la comunidad de domótica.

4.1.10 Servidor

Se han considerado diversas alternativas para albergar el sistema Home Assistant. Este sistema es versátil en cuanto a sus requisitos de hardware, ya que se puede implementar en una computadora personal en desuso, dado que los requisitos son relativamente modestos. Un simple ordenador con 2 GB de RAM y un procesador de 64 bits es suficiente. Sin embargo, la opción más recomendable es emplear un mini PC debido a su eficiencia energética y su reducido espacio. En este caso, se pueden destacar algunas opciones de Raspberry Pi, como la versión 3B+ o la Raspberry Pi 4, como soluciones idóneas debido a su bajo consumo energético y su tamaño compacto.

En este proyecto, se optó por utilizar la *Raspberry Pi 3B+* debido a su atractivo precio y su rendimiento adecuado. Sin embargo, es crucial destacar que, si se dispone de un presupuesto más holgado, se recomienda encarecidamente considerar la Raspberry Pi 4. Esta última presenta ventajas notables, como puertos USB de mayor velocidad, un procesador con overclocking para un mejor rendimiento y una mayor capacidad de memoria RAM. Esto resulta en una experiencia más fluida y eficiente en el funcionamiento general del sistema Home Assistant.

En la siguiente figura se puede apreciar las diferencias en características de hardware entre las dos versiones de raspberry pi nombradas:

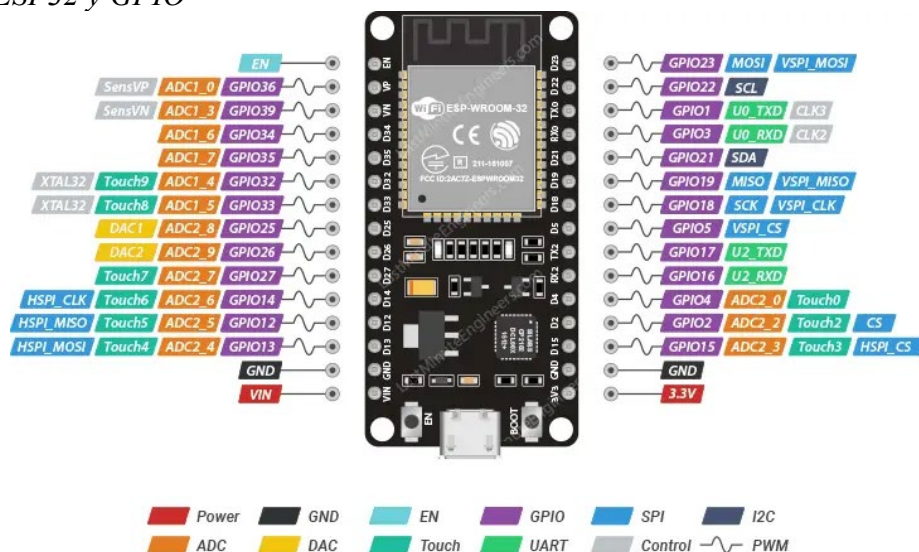
Figura 21. *Comparativa entre Raspberry Pi 3 y Raspberry Pi 4*

	Raspberry Pi 4	Raspberry Pi 3 Model B+
Price	\$55 (4GB model)	\$35
Processor	1.5GHz Broadcom BCM2711 (quad-core Cortex-A72) SoC	1.4GHz Broadcom BCM2837B0 (quad-core Cortex-A53) SoC
Memory	4GB LPDDR4 (1GB and 2GB versions also available)	1GB LPDDR2
Graphics	ARM VideoCore VI (500MHz)	ARM VideoCore IV (400MHz)
Supported Codecs	OpenGL ES 3.0 graphics. H.265 (4kp60 decode); H.264 (1080p60 decode, 1080p30 encode)	OpenGL ES 2.0 graphics. H.264, MPEG-4 decode (1080p30); H.264 encode (1080p30)
Video Output(s)	Two micro HDMI	Full-size HDMI
General Purpose Input/Output (GPIO)	40-pin header	40-pin header
USB Ports	Two USB 3.0 ports; two USB 2.0 ports	Four USB 2.0 ports
Wired Networking	Gigabit Ethernet	Ethernet (maximum throughput 300Mbps)
Wireless Networking	802.11ac Wi-Fi; Bluetooth 5.0	802.11ac Wi-Fi; Bluetooth 4.2

Tomado [28].

4.1.11 Placa de adquisición de datos

En cuanto a la adquisición de datos, se consideraron tres opciones viables. La primera de ellas fue la ESP32, que destaca por su versatilidad y accesibilidad económica. La segunda opción planteada fue el Arduino, aunque es importante mencionar que, por defecto, Arduino no incluye conectividad WiFi, por lo que sería necesario añadir un módulo adicional. Además, su capacidad de procesamiento es inferior a la de la ESP32, lo que puede resultar en problemas de rendimiento antes de llegar al límite. Como tercera alternativa, se tenía el Wemos D1 Mini, basado en el ESP8266. Es una placa compacta y económica. Sin embargo, debido a la familiaridad previa con la ESP32 y el conocimiento de su funcionamiento y capacidades, se optó por seleccionar la *ESP32*. Además, su conexión WiFi es estable y rara vez presenta desconexiones, lo que la hace una elección confiable.

Figura 22. ESP32 y GPIO

ESP32 Dev. Board Pinout

Last Minute
ENGINEERS.com

Tomado [29].

4.1.12. Sensores para medición

Para el tema de sensorica, que permitirá recoger mediciones eléctricas, se evaluaron diversos tipos de sensores. Sin embargo, dado que esta es una aplicación de pequeña y mediana escala, se optó por modelos específicos de la marca Peacefair para maximizar la precisión con un presupuesto razonable. Peacefair ha ganado una excelente reputación por sus sensores PZEM para monitoreo energético, los cuales destacan por su precisión y relación costo-beneficio. Para las mediciones en corriente alterna (AC), se seleccionaron sus sensores PZEM-004T V3, los cuales pueden medir hasta 100A de corriente. Por otro lado, para corriente continua (DC) se utilizaron los PZEM-017 de 50A de Peacefair. Estos sensores de medición energética ofrecen una precisión muy aceptable en los diferentes parámetros eléctricos que monitorizan como se puede evidenciar en la hoja de datos del sensor [30], [31], incluyendo corriente, voltaje, factor de potencia, energía y potencia activas. La elección de estos modelos de Peacefair permite obtener datos confiables de

consumo eléctrico en AC y DC, cubriendo las necesidades de monitoreo para nuestra aplicación de escala mediana-pequeña.

Figura 23. *Sensor PZEM-004T V3 - 100A (AC)*



Tomado [32]

Figura 24. *Sensor PZEM-017 50A (DC)*



Tomado [33]

4.1.13. Conexión sistema IoT

El sistema de monitorización empleado es Home Assistant, un sistema operativo integral que utiliza un kernel basado en Linux. Este sistema operativo es adecuado para abordar todas las facetas de la domótica, ofreciendo una amplia gama de posibilidades y compatibilidad al conectar y visualizar diversos sensores.

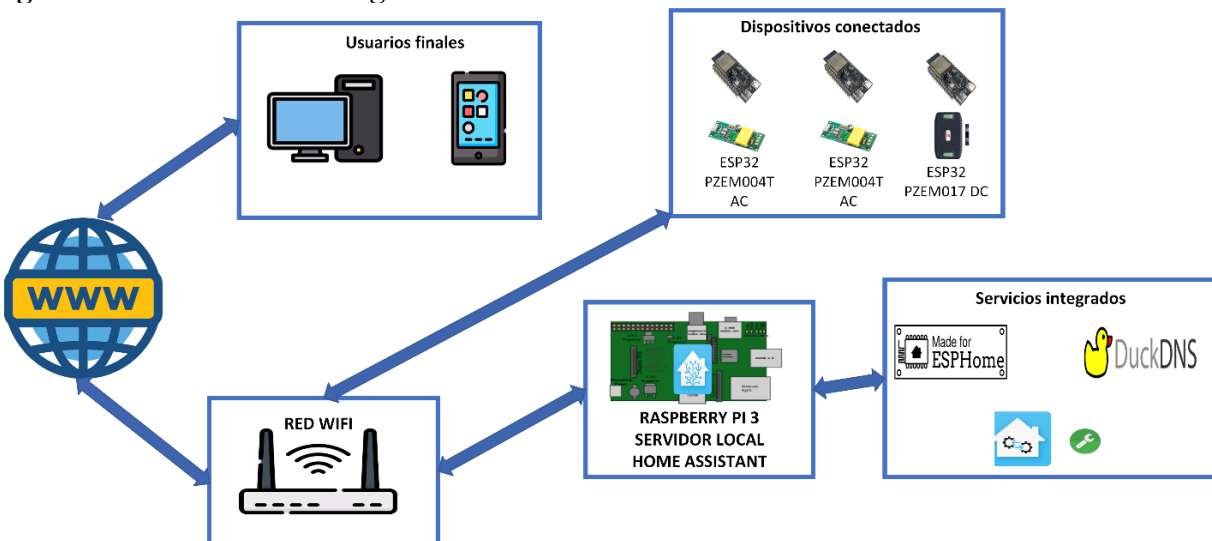
La versatilidad del sistema domótico radica en su capacidad para integrar múltiples complementos, consolidándolo como una solución robusta con numerosas opciones. Además, facilita la incorporación de diversos protocolos, tales como TCP, MQTT, Zigbee, entre otros. Se

llevaron a cabo pruebas tanto en un servidor de VirtualBox con recursos asignados, como en un entorno real donde se implementó el sistema operativo Home Assistant en una Raspberry Pi 3 modelo B, que actuó como el entorno principal.

Cabe destacar que el sistema implementado en la Raspberry Pi 3 opera de manera local y presenta la capacidad de acceder a Internet mediante el dominio integrado a través de DuckDNS. Esta funcionalidad permite una conexión remota y un control conveniente desde cualquier ubicación, ampliando así la accesibilidad y versatilidad del sistema domótico para todo tipo de usuario final, por otro lado, Todos los elementos como dispositivos de adquisición, sensorica y servidor central requieren estar conectados a una misma red wifi en banda 2.4 Ghz. Esto ya que la raspberry pi que actúa como servidor solo posee esta banda wifi.

A continuación, se muestra la figura donde se pueden apreciar los elementos y servicios usados:

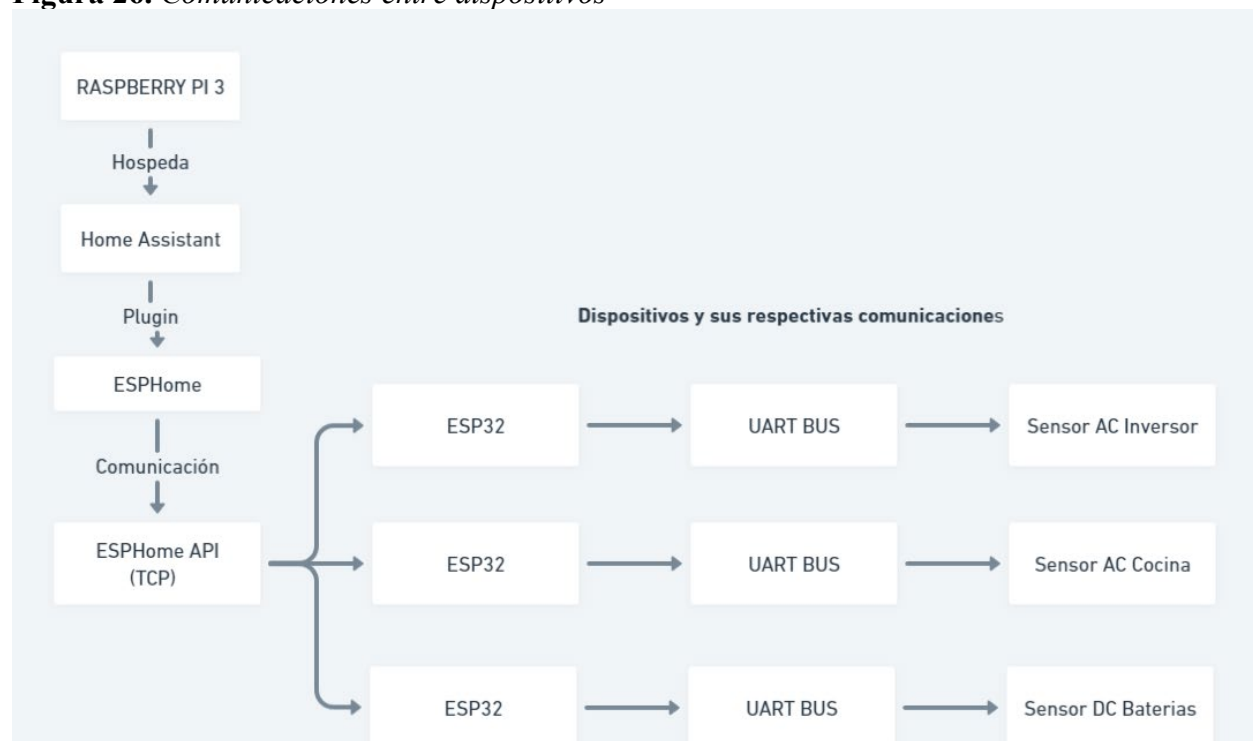
Figura 25. *Sistema domótico general*



Habiendo identificado los dispositivos disponibles, como se muestra en la figura anterior, resulta crucial abordar la comunicación entre ellos. En primer lugar, todos los elementos están interconectados en la misma red. Home Assistant actúa como el servidor central, albergando nuestro complemento principal denominado "ESPHome". Este último presenta características distintivas, como la utilización de TCP para establecer una conexión entre el dispositivo ESPHome y el cliente.

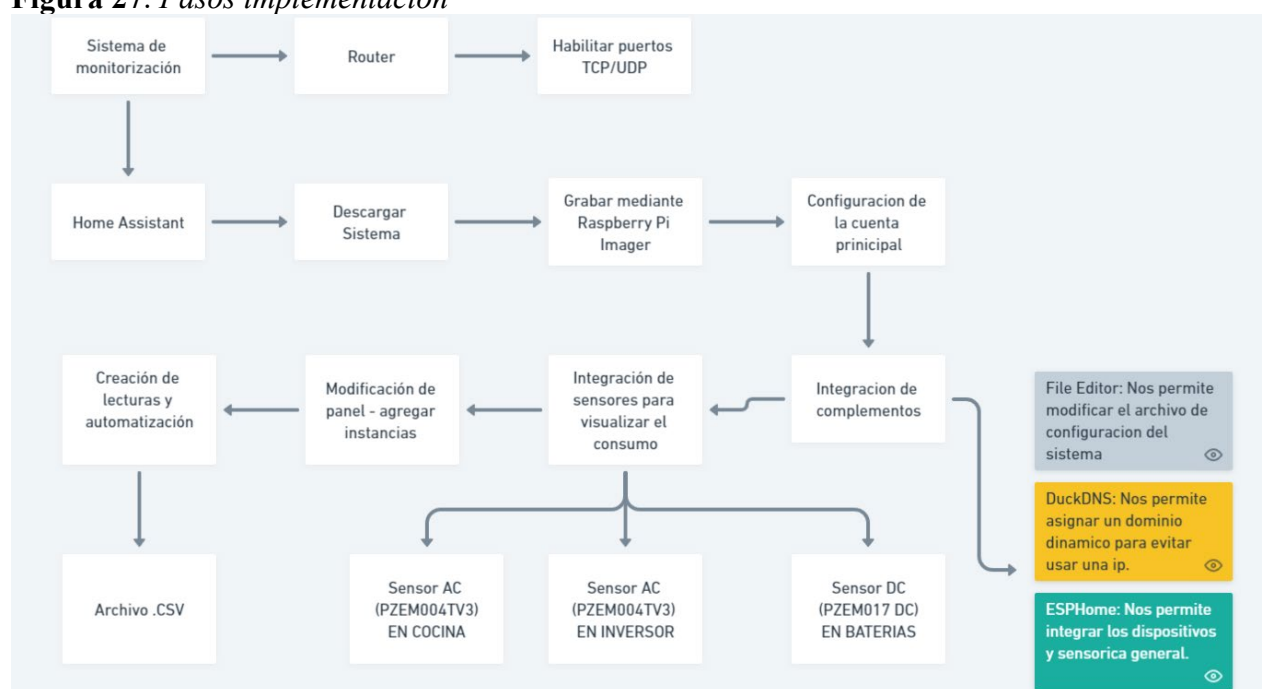
Por otro lado, la conexión entre las placas de adquisición ESP32 y los sensores de medición energética tanto AC como DC funcionan bajo la comunicación UART. Esta comunicación utiliza solamente dos cables los cuales son TX y RX. Cabe resaltar que esta comunicación se usa 9600 baudios.

Figura 26. Comunicaciones entre dispositivos



La implementación de este sistema se inicia mediante la descarga de la imagen ISO del instalador de Home Assistant. Esta imagen ISO se adquiere a través del software suministrado por Raspberry (Raspberry Pi Imager). Una vez que el software ha sido instalado en la tarjeta microSD, se deben seguir una serie de pasos, los cuales están detallados en la imagen que se presenta a continuación:

Figura 27. *Pasos implementación*



Es importante destacar que se requiere habilitar el servicio WiFi en la Raspberry Pi, ya que por defecto se encuentra desactivado. El código necesario para llevar a cabo esta habilitación y la ruta necesaria está en el documento anexo “Guía paso a paso del software iot”.

Home Assistant usa YAML para manejar la sensorica, ya que es un formato de serialización de datos que se destaca por su legibilidad para los usuarios. La adopción de YAML

posibilita una representación nítida y organizada de la configuración, simplificando la tarea de comprender y modificar la misma.

4.1.14 Integración y código de sensores

Estando listos para cargar el código que permitirá la obtención de lecturas mediante el sensor AC PZEM004T V3. En este espacio, se procederá a insertar el código requerido. Es importante señalar que en el código se asignaron los puertos GPIO 3 y 1 tanto para rx como para tx.

Figura 28. Código yaml para sensor ac inversor pzem004t v3

```
#configuration entry
uart:
  rx_pin: GPIO3
  tx_pin: GPIO1
  baud_rate: 9600

modbus:

sensor:
  - platform: pzemac
    current:
      name: "PZEM-004T V3 Current"
    voltage:
      name: "PZEM-004T V3 Voltage"
    energy:
      name: "PZEM-004T V3 Energy"
    power:
      name: "PZEM-004T V3 Power"
    frequency:
      name: "PZEM-004T V3 Frequency"
    power_factor:
      name: "PZEM-004T V3 Power Factor"
    update_interval: 1s
```

Adaptado [34].

Figura 29. Código yaml para sensor AC cocina PZEM004T V3

```
#configuration entry
uart:
  rx_pin: GPIO3
  tx_pin: GPIO1
  baud_rate: 9600

modbus:

sensor:
  - platform: pzemac
    current:
      name: "PZEM-004T V3 Current"
    voltage:
      name: "PZEM-004T V3 Voltage"
    energy:
      name: "PZEM-004T V3 Energy"
    power:
      name: "PZEM-004T V3 Power"
    frequency:
      name: "PZEM-004T V3 Frequency"
    power_factor:
      name: "PZEM-004T V3 Power Factor"
    update_interval: 1s
```

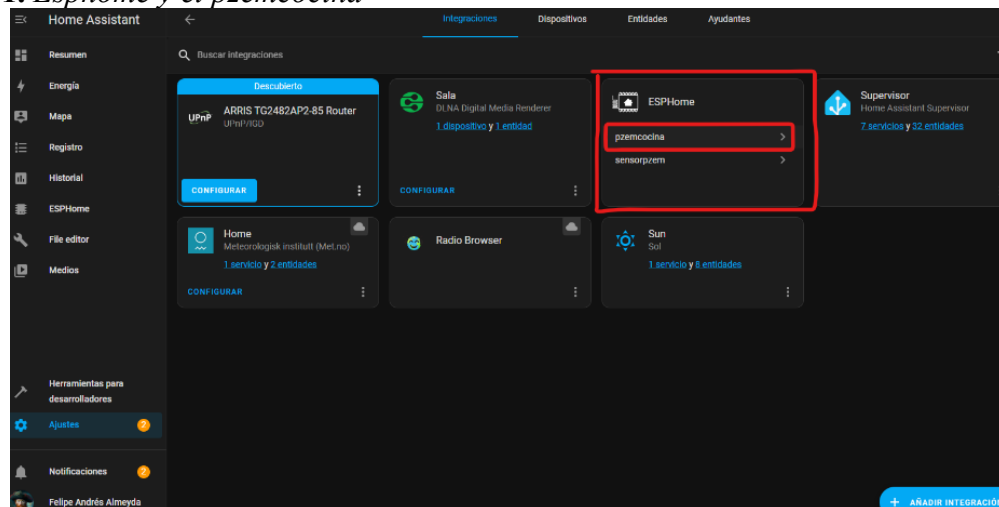
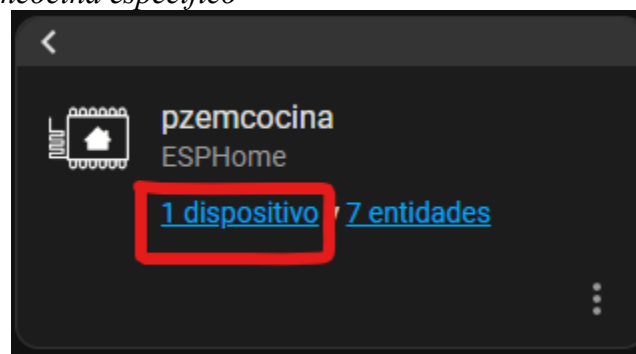
Adaptado [35].

En relación con el código destinado a ser cargado en esta tercera ESP32, se necesitan realizar ciertos ajustes específicos para que la placa pueda gestionar y recolectar datos del sensor DC de manera apropiada. Estos ajustes pueden incluir la configuración de pines de entrada y salida, la definición de protocolos de comunicación específicos, y otros parámetros relacionados con el propio sensor. A continuación, se presentará una figura que contiene el código [36] esencial para permitir que la ESP32 capture y transmita eficientemente los datos del sensor DC.

Figura 30. Código yaml para sensor DC de batería

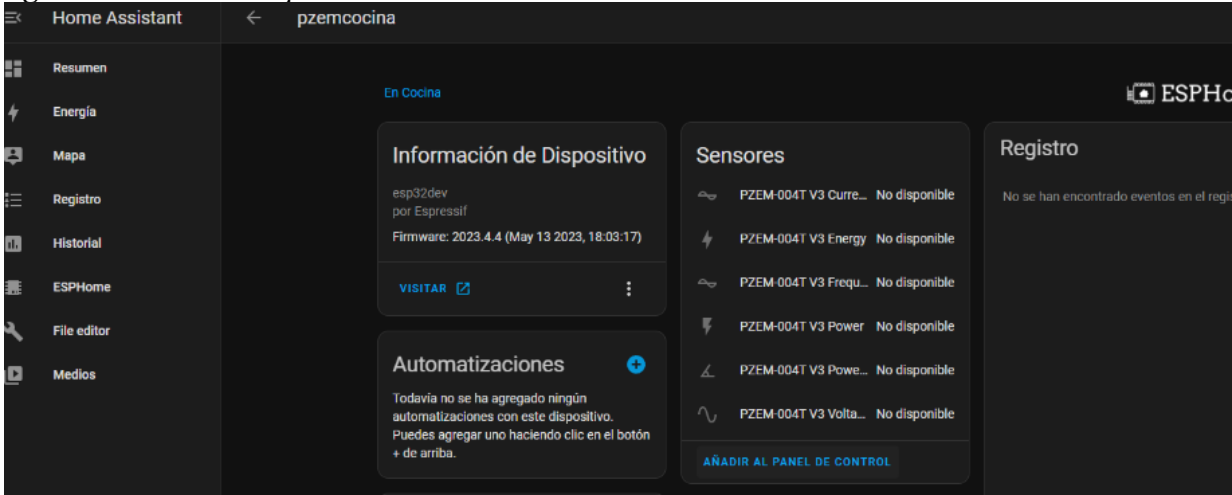
```
uart:
  tx_pin: GPIO3
  rx_pin: GPIO1
  baud_rate: 9600
  stop_bits: 2

sensor:
  - platform: pzemdc
    current:
      name: "PZEM-003 Current"
    voltage:
      name: "PZEM-003 Voltage"
    power:
      name: "PZEM-003 Power"
    energy:
      name: "PZEM-003 Energy"
    update_interval: 5s
```

Figura 31. Esphome y el pzemcocina**Figura 32.** Sensor pzemcocina específico

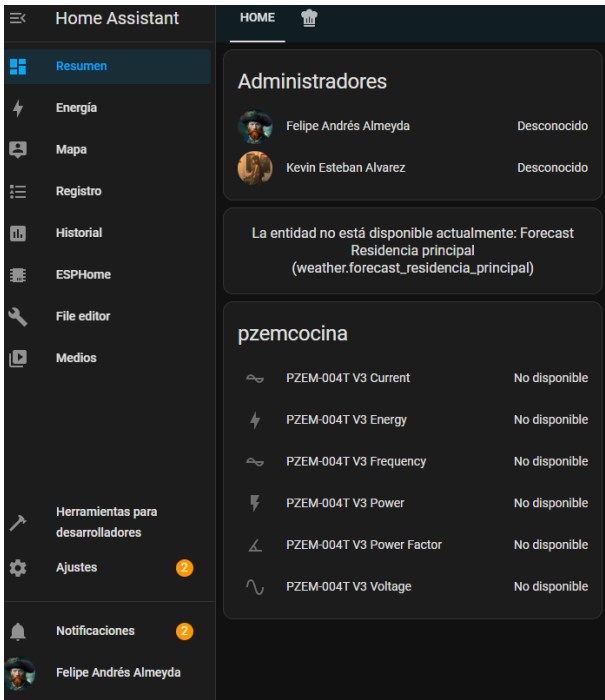
Como se muestra en la figura anterior, para insertar el módulo en el dashboard principal y luego clic en el botón de añadir al panel de control.

Figura 33. Añadir bloque de sensor



Una vez añadido el bloque del sensor, ya se podrá visualizar.

Figura 34. Sensor puesto en dashboard

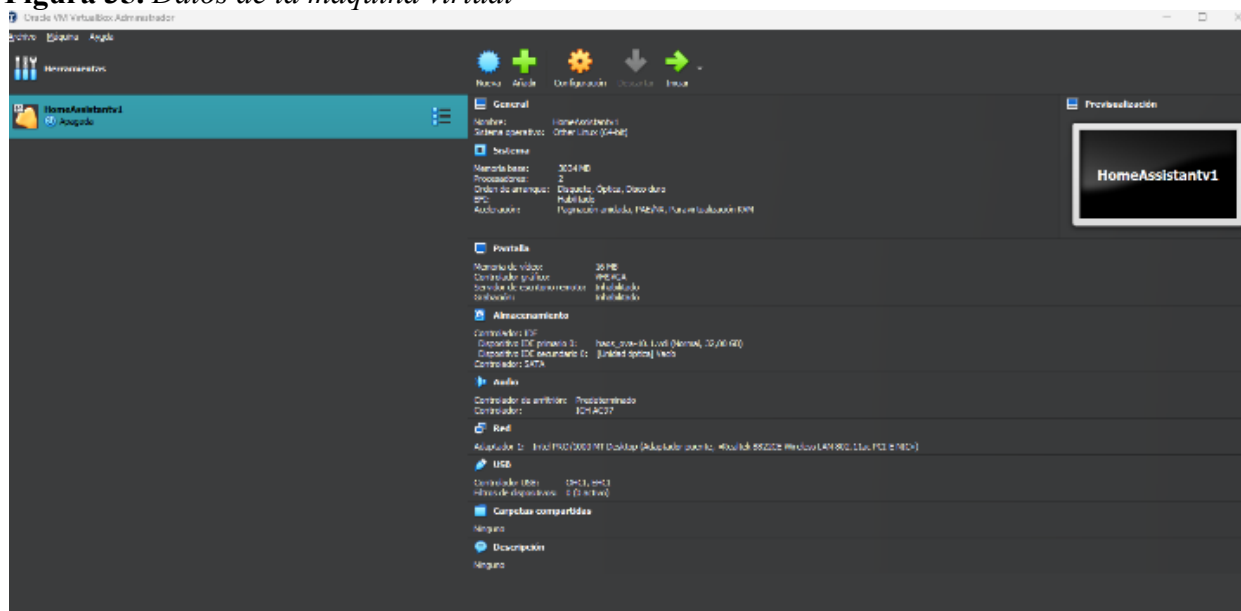


4.2. Simulaciones-pruebas- caracterización

4.2.1. Pruebas de software antes de conexión

En el marco de la simulación, se llevaron a cabo pruebas piloto utilizando VirtualBox, una aplicación que posibilita la creación de máquinas virtuales con características personalizadas. Para estas pruebas iniciales, se configuró una máquina virtual con 3034 MB de memoria RAM, 2 núcleos de procesamiento y un disco virtual de 32GB destinado a alojar el sistema de monitorización Home Assistant. La virtualización se estableció inicialmente con el propósito de adquirir familiaridad con el sistema y llevar a cabo pruebas de conexión de dispositivos, incluyendo las placas de adquisición ESP32 y sensores utilizados para la medición de energía, como el PZEM004T v3 y el PZEM017DC.

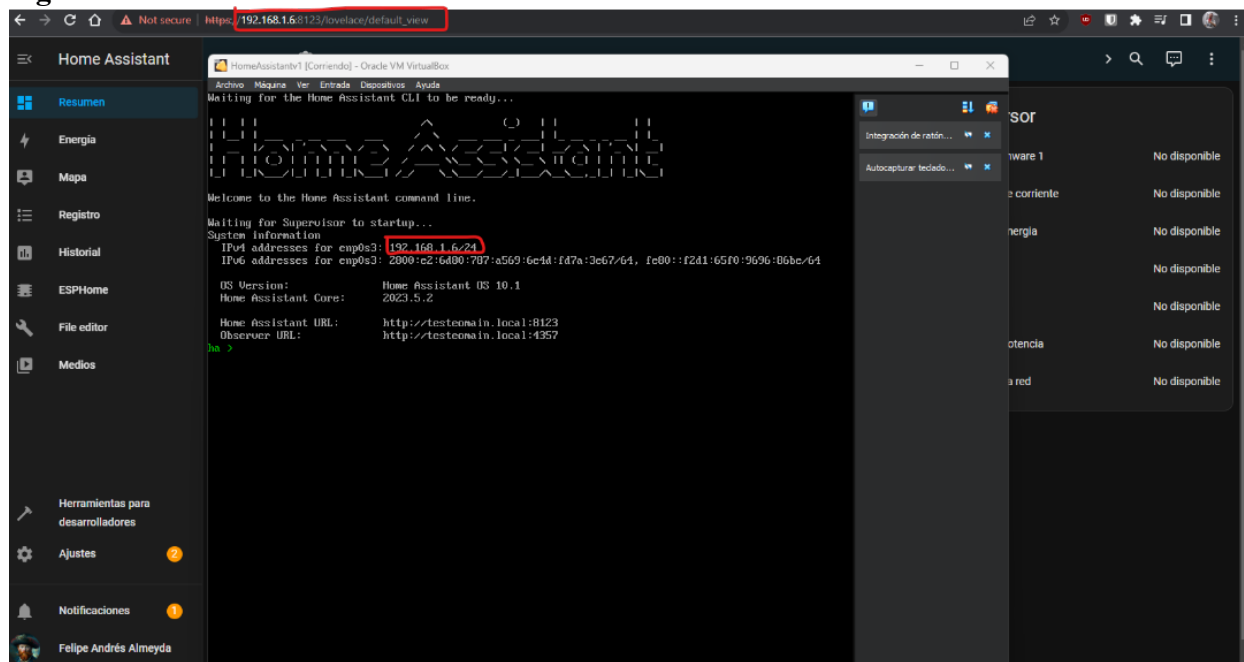
Figura 35. *Datos de la máquina virtual*



La imagen .iso que se montó en la máquina virtual previamente mencionada se descargó desde el sitio oficial de Home Assistant y se configuró siguiendo el mismo proceso detallado.

Para demostrar que el servidor de pruebas virtualizado funcionó correctamente, se adjunta la siguiente figura:

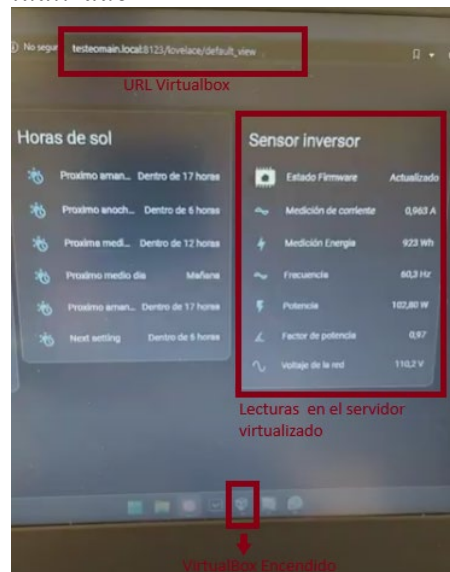
Figura 36. *Demostración servidor virtualbox*



Como se observa en la figura, tanto las direcciones IP del servidor VirtualBox como la que aparece en la barra de navegación coinciden, lo que indica que el servidor se encuentra en funcionamiento. En la práctica, se pueden apreciar notables diferencias, como una mayor velocidad de ejecución en comparación con el servidor utilizado en la Raspberry Pi. No obstante, es fundamental considerar que el rendimiento de este servidor virtualizado puede variar, ya que está directamente vinculado al hardware de la computadora anfitriona y a los recursos asignados. En este caso, se experimenta un aumento en la velocidad tanto en el procesamiento como en la lectura y escritura de datos en el servidor virtual.

Además, se empleó este servidor virtualizado como un entorno de pruebas y se llevaron a cabo las conexiones de sensores, en particular para la medición de energía. Como evidencia en la figura siguiente que ilustra el servidor virtualizado en funcionamiento con algunas lecturas

Figura 37. *Prueba servidor virtualizado*



4.2.2. Pruebas parte eléctrica antes de conexión a carga

Con relación a simulaciones y pruebas realizadas antes de la conexión, se puede decir que se realizaron las pruebas de carga como se aprecia en la siguiente figura:

Figura 38. *Prueba de controlador de carga y baterías*



Con esta prueba se comprueba el correcto funcionamiento del controlador de carga, se realiza cambio de conexión con baterías para verificar que cambie a los dos posibles voltajes que tiene, 12V y 24V.

Figura 39. *Verificación de corriente entregada por el panel*



4.2.3 Pruebas de conexión a la infraestructura eléctrica del laboratorio

Para realizar la conexión del inversor eléctrico a los paneles solares se reutiliza infraestructura que había instalada en el laboratorio (cable encauchetado 5x10); por lo que se conectan los paneles y bajan por medio de tubería a la cocina del laboratorio que es donde se va a realizar la instalación. Se transmite en DC por alrededor de 5 metros, por lo que las pérdidas son mínimas además que se pueden asumir teniendo en cuenta que el panel entrega alrededor de 35V dependiendo de la radiación y el controlador de carga va a disminuir este a 12 V. Esta conexión puede ser observada en el video disponible en [37].

Este cable encauchetado llega a una caja de inspección de techo donde es empalmado, para continuar a la conexión de los controladores de carga, esta conexión puede ser observada en el video disponible en [38].

Luego se realiza la conexión a los controladores de carga, las baterías y el inversor eléctrico, esta conexión se puede evidenciar en el video disponible en [39]. La salida del inversor llega a los barrajes de las cajas eléctricas como se puede evidenciar en los videos disponibles en [40] y [41].

Figura 40. *Conexión de prueba a infraestructura del laboratorio*



Con el propósito de hacer pruebas de funcionamiento, se enciende el breaker de las luminarias del laboratorio y se comprueba el correcto funcionamiento, como se puede observar en el video disponible en [42].

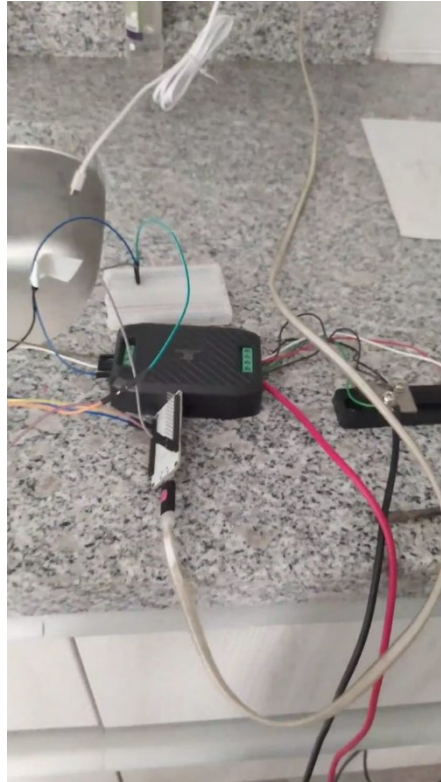
Para realizar pruebas de conexión con el sensor y validar las mediciones que esta entrega por medio del sistema de monitorización se realizan algunas pruebas con mediciones con otros instrumentos (pinza amperimétrica y multímetro). Esta prueba puede ser evidenciada en [43].

Se realizan pruebas de conexión remota para la visualización de datos, estas pruebas se toman fuera del laboratorio, pero dentro del parque tecnológico, como se puede ver en [44].

Luego se realiza la conexión otro sensor PZEM-004T para realizar mediciones de una carga puntual, estas mediciones se realizaron en primer momento a una nevera y luego a una pantalla. Esta conexión se puede observar en el video disponible en [45].

Para finalizar se realiza una conexión de un sensor PZEM-017 en la salida de las baterías, con este sensor se realizan pruebas de eficiencia en el inversor.

Figura 41. *Prueba de conexión sensor PZEM-017*



4.3. Resultados

Como comprobación de todas las simulaciones y pruebas realizadas en el sistema real montado en la Raspberry Pi, se ponen a disposición una serie de videos que muestran a diversas personas accediendo al sistema IoT alojado en Guatiguará. Es importante destacar que estas personas están accediendo desde ubicaciones remotas a través de Internet. Ver [46].

A continuación, se listan los sensores y variables monitorizadas:

2 sensores AC (uno a la salida del inversor y otro en la cocina.), los cuales proporcionan lecturas de:

- medición de corriente (A),
- medición de energía (Wh),
- medición de frecuencia (Hz),

- medición de potencia (W),
- factor de potencia, voltaje (V).

El sensor *DC* que está conectado en las baterías se tienen las siguientes variables; Corriente (A), Voltaje (V), Energía (Wh).

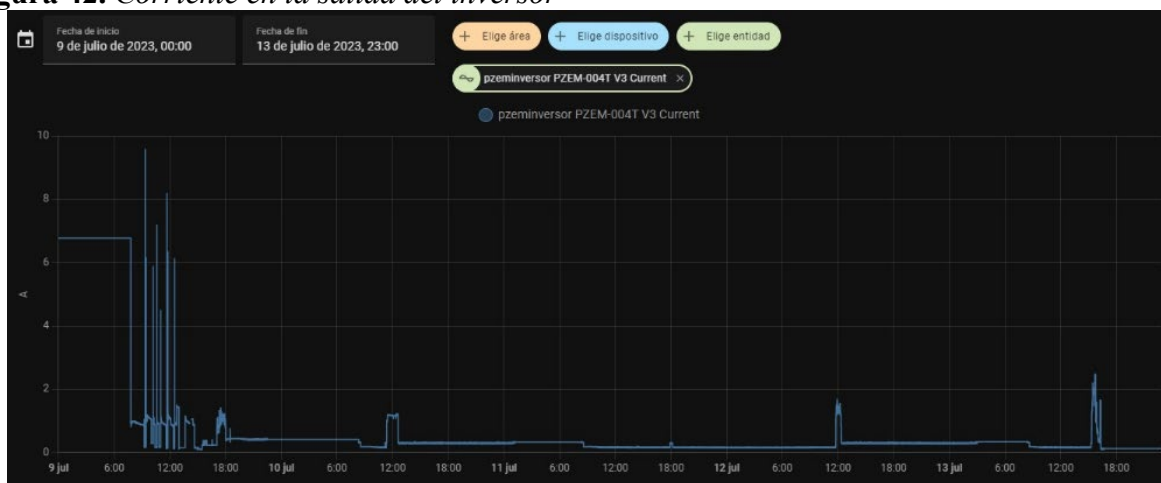
Las variables medidas se muestran de forma gráfica.

4.3.1. Resultados gráficos de variables en el sensor *AC inversor*

Antes de presentar los resultados gráficos con relación a las variables mencionadas previamente, es importante destacar que se ha seleccionado un intervalo de tiempo que abarca desde el 9 de julio a las 00:00 hasta el 13 de julio a las 23:00 horas. Esta elección se ha realizado con el propósito de facilitar la visualización de los gráficos en un intervalo de tiempo adecuado. Asimismo, es necesario aclarar que el sensor de energía está conectado en la salida del inversor, lo que implica que se encuentra en el punto de entrada de la instalación eléctrica de la vivienda.

- Medición de corriente (A):

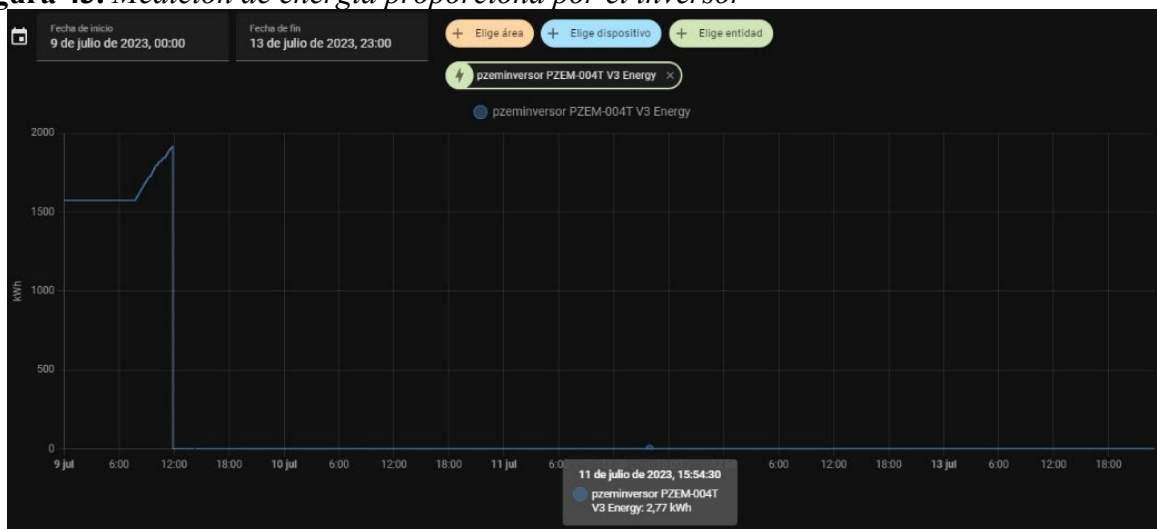
Figura 42. Corriente en la salida del inversor



En lo que respecta a la corriente, se observan notables picos que se aproximaron a los 9.6 Amperios. Estos eventos tuvieron lugar el día 9 de julio, alrededor de las 9:30 a. m. Dichos incrementos en la corriente se debieron a la conexión simultánea de la nevera, una televisión de 20 pulgadas, las luminarias de la vivienda, así como el funcionamiento del servidor Raspberry Pi y los dispositivos de medición. A lo largo del período analizado, la lectura de corriente se mantuvo en un rango que osciló entre 0.3 Amperios y 2.5 Amperios. Este valor de corriente corresponde a la suministrada por el inversor y a su inyección en la red eléctrica de la residencia.

- Medición de energía (kWh):

Figura 43. *Medición de energía proporcionada por el inversor*



Como se puede ver en la figura anterior, la energía generada por el inversor fue bastante alta oscilando entre 1600KWh y 1900Kwh, sin embargo, después de realizar la desconexión de la nevera, la energía disminuyó notablemente oscilando entre 2.1 kWh y 3.35 kWh.

- Medición Factor de potencia:

Figura 44. *Factor de potencia por el inversor*

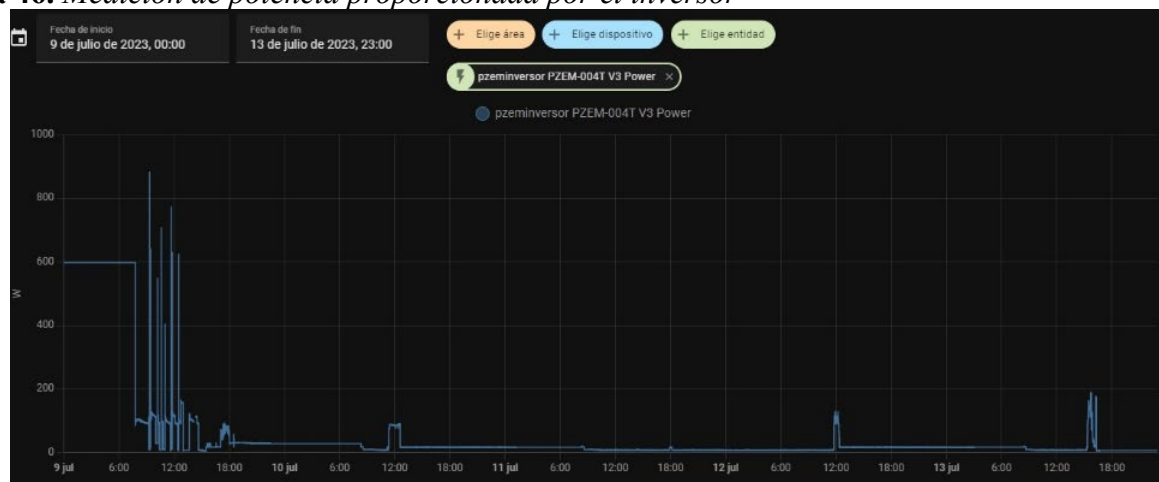
En caso del factor de potencia a la salida del inversor, como se puede evidenciar en la figura anterior la lectura más alta fue de 1 esto significa que toda la energía eléctrica que se suministra a la carga se utiliza para trabajo real, por lo que no hay perdidas de energía. Sin embargo, no siempre se mantuvo este valor, ya que el valor más frecuente estuvo alrededor de 0.4 y 0.5, este valor indica que la carga necesita un valor alto de potencia reactiva. que en términos prácticos no se transforma en energía aprovechada, si no es usada en generación de campos eléctricos para cargas inductivas o capacitivas.

- Medición de frecuencia en el inversor:

Figura 45. *Frecuencia proporcionada por el inversor*

Como podemos observar la frecuencia registrada a lo largo de la medición es bastante buena está dentro de los rangos de 60.2 Hz y 60.5 Hz esto significa que la frecuencia es lo suficientemente estable para alimentar la mayoría de los equipos eléctricos. Esta dentro del rango de tolerancia ± 0.3 Hz.

- Medición de Potencia en el Inversor:

Figura 46. *Medición de potencia proporcionada por el inversor*

En el caso de la potencia proporcionada las mediciones muestran un pico de 882.2 W esto casi rondando la capacidad de los paneles por lo que el sistema estaría cercano al límite. El valor de potencia más frecuente es de alrededor de 30 W, esto porque se había dejado una pantalla pequeña encendida. Sin embargo, en el día 13 de julio, último día de medición se evidencian picos de alrededor de 190W – 200W. Estos cambios se deben a presencia del personal del proyecto en laboratorio con la intención de generar estos cambios para el estudio.

- Medición de voltaje en el inversor:

Figura 47. *Voltaje a la salida del inversor*



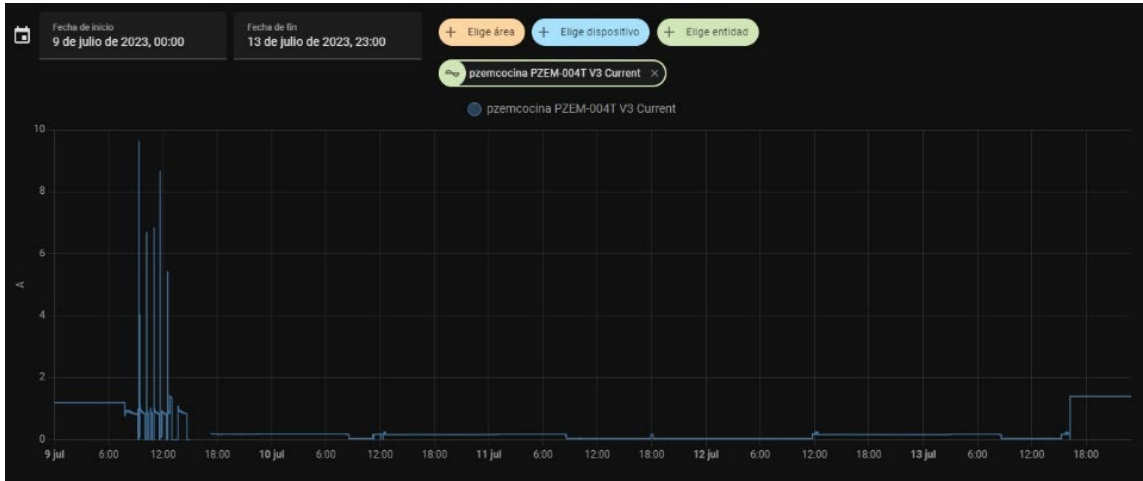
En temas de voltaje, se muestra una oscilación normalizada entre 110.1V y 111V por lo que es un valor adecuado.

4.3.2. Resultados gráficos de variables en el sensor ac cocina

Para el sensor PZEM004T V3 ubicado en la cocina se tienen las mismas variables eléctricas en consideración también se manejan los mismos rangos de tiempo del 9 de julio al 13 de julio.

- Medición de corriente:

Figura 48. Medición de corriente ubicado en la cocina



Como se puede apreciar los picos de corriente en la medición del sensor ubicado en la cocina fueron casi similares a los picos de corriente en el sensor ubicado en el inversor, esto porque fue el punto en donde estaban los grandes equipos que consumían la mayor parte de corriente.

- Medición de energía sensor cocina:

Figura 49. Medición de energía sensor ubicado en la cocina



En la gráfica de energía se puede evidenciar que hubo una desconexión de un lapso sin embargo un tiempo después la medición fue retomada la gráfica en general desde el día 9 de julio proporciona un valor de 600 Wh hasta un valor de 1412 Wh a fecha del 13 de julio. Es decir, un valor energético de 812Wh en ese rango de días.

- Medición del factor de potencia sensor cocina:

Figura 50. *Factor de potencia en la cocina*



Como se muestra en la figura anterior, podemos deducir que el factor de potencia promedio es cercano a 0.5 sin embargo, se presentan lecturas de hasta 1 donde la energía se puede decir que está siendo consumida en su totalidad y no hay pérdidas energéticas, pero por otro lado también podemos apreciar factores de potencia en 0.

- Medición de frecuencia:

Figura 51. *Medición de frecuencia ubicado en la cocina*

Como en el gráfico de frecuencia del inversor, podemos apreciar valores de frecuencia idénticos y que están dentro del rango adecuado, para que los equipos eléctricos funcionen con normalidad.

- Medición de potencia sensor cocina:

Figura 52. *Potencia activa en el sensor de cocina AC*

La potencia suministrada a los equipos como nevera, mini televisor y placa de adquisición es mostrada en la figura anterior como se puede apreciar, los picos de potencia son similares tanto en el sensor de cocina como en el inversor cerca de 880W, sin embargo, la medición más frecuente está en el rango de 10W a 30W, esto por la pantalla y la placa de adquisición que se tenían conectados.

- Medición de voltaje:

Figura 53. *Medición de voltaje con el sensor de cocina*



Como en el caso del voltaje del inversor los valores del voltaje en la cocina fueron adecuados y muy cercanos a 111V. un voltaje aceptable para los equipos electrónicos.

4.3.3. Resultados gráficos de variables en el sensor DC baterías

Con respecto al sensor de las baterías, los gráficos obtenidos fueron cuatro, todos los gráficos también manejan el mismo rango de tiempo del 9 de julio al 13 de julio.

- Medición de corriente en las baterías:

Figura 54. *Comportamiento de la corriente en las baterías*

En las baterías la corriente fue muy cambiante, el comportamiento que podemos evidenciar son los altos picos al medio día en promedio 14 amperios y como máximo 24 amperios, esto se debe ya que es en el momento en el que la radiación solar es más intensa, caso contrario en las noches donde la corriente decae a valores de 1 Amperio o hasta 0.

- Medición de energía en las baterías:

Figura 55. *Energía en las baterías mediante sensor DC*

La energía registrada en las baterías es creciente a lo largo del tiempo y es medida en kWh, empezando en 0.3kWh y teniendo un valor casi constante de 2.48 kWh.

- Medición de potencia en las baterías:

Figura 56. *Medición de potencia en las baterías sensor DC*



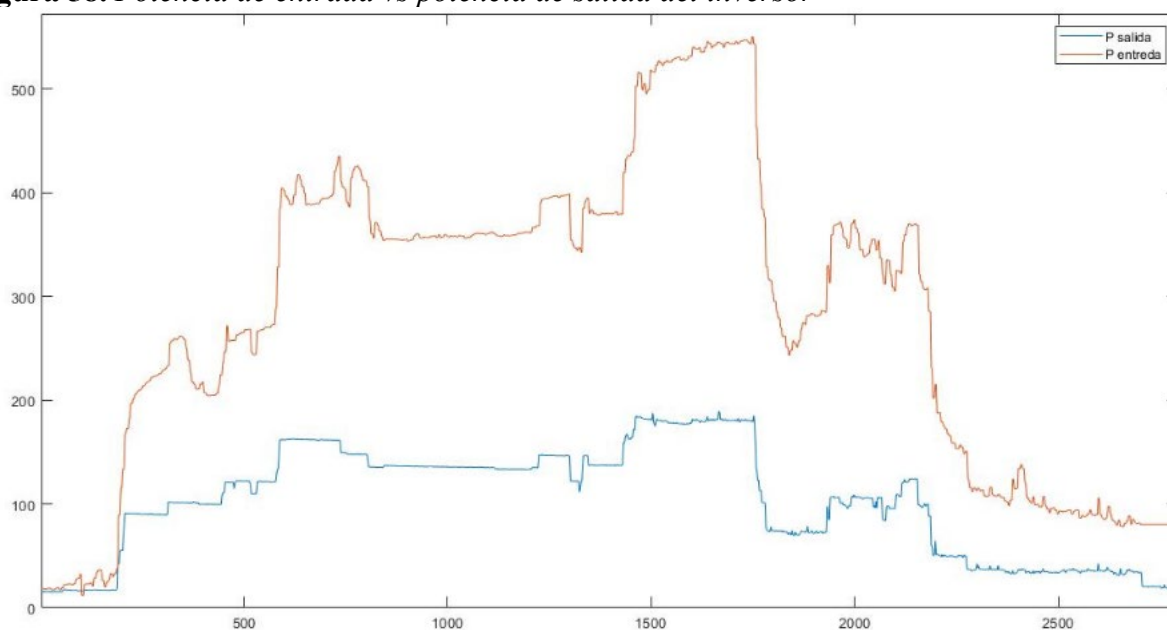
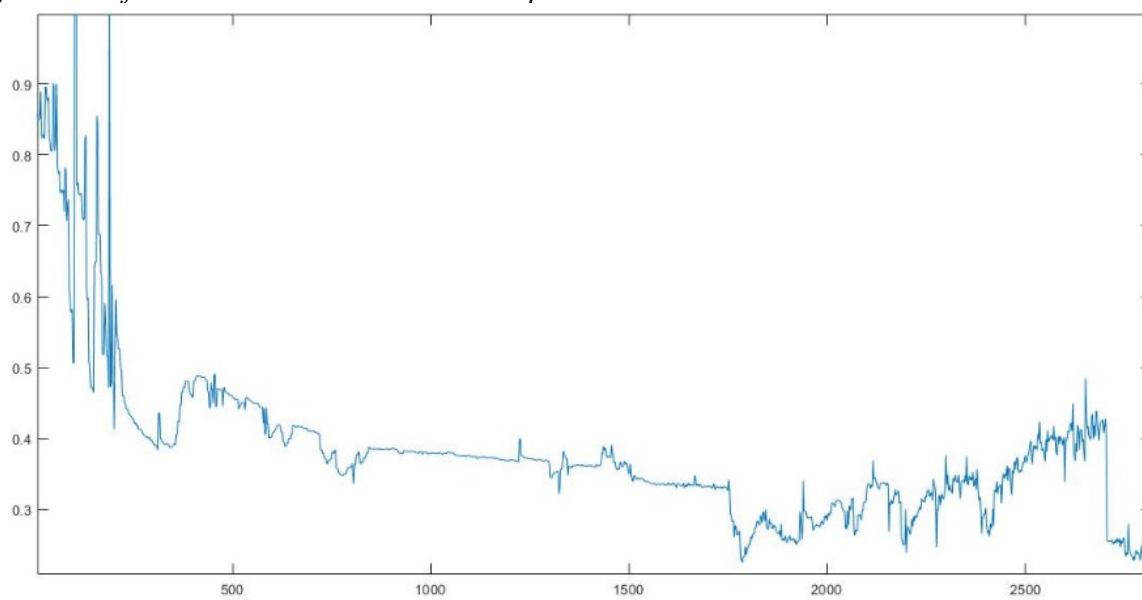
La potencia en las baterías exhibe un aumento durante el mediodía debido a razones similares a las que provocan un incremento en la corriente en ese momento: la radiación solar alcanza su máxima intensidad a esa hora del día. en el contexto de un sistema solar, representa la cantidad de energía almacenada en las baterías en un intervalo de tiempo determinado.

- Medición de voltaje en las baterías:

Figura 57. *Voltaje en las baterías usando el sensor DC*

El sensor dc nos permite conocer el voltaje en las baterías a lo largo del día, con el grafico anterior podemos evidenciar el comportamiento de carga durante el día, donde el voltaje incrementa hasta 12.7V y por las noches se descarga hasta valores de 10,3V. Cabe resaltar que las baterías son de ciclo profundo por lo que están diseñadas para cargarse y descargarse repetitivamente. Esta caída de voltaje está dentro del rango de uso del inversor ya que este funciona a 12 V +/- 2V.

Con los datos de potencia tomados por este sensor, se puede contrastar con los datos de potencia eléctrica tomados de la salida del inversor y generar un gráfico con la eficiencia del inversor en el tiempo.

Figura 58. *Potencia de entrada vs potencia de salida del inversor***Figura 59.** *Eficiencia del inversor en el tiempo*

5. Discusión de resultados

5.1 Validación técnica

Como se puede evidenciar, los resultados eléctricos fueron aceptables. Se logró alimentar en su totalidad la casa modelo con el prototipo, pero se tiene una baja eficiencia en el inversor eléctrico. Esto se debe a varias razones. Entre ellas, que por las cargas concebidas en el laboratorio de testeo del Parque Tecnológico de Guatiguará, el factor de potencia casi siempre era inferior a 0.6. Esto se debe a la presencia de switch inductivos, luminarias LED y tomacorrientes con salida USB de 5V que requieren campos eléctricos y derivan en el uso de potencia reactiva. Debido a esta potencia reactiva presente, la eficiencia del inversor disminuye en gran medida. Por esto, en algunas ocasiones las baterías no son capaces de mantenerse activas durante toda la noche. También hay que tener en cuenta que el fabricante del inversor no proporcionó en su hoja de datos una curva de eficiencia. [47]

Por otro lado, el sistema de monitorización funcionó correctamente durante todas las pruebas realizadas. Como se evidenció en los videos adjuntos anteriormente, se logró conseguir monitorizaciones tanto dentro del Parque Tecnológico como fuera de él, inclusive en otros departamentos del país. Se considera que el tiempo de sincronización fue una decisión adecuada, teniendo en cuenta que la variación de diferentes variables eléctricas no tiene un cambio significativo en periodos menores de un segundo en el caso de energía alterna y de 5 segundos en corriente directa. Se comprobó que se pueden realizar diferentes mediciones en una misma microrred y que estos sensores funcionan efectivamente para detectar fugas de corriente que pueden determinar fallas en electrodomésticos, para el caso de redes domiciliarias que fue donde se desarrolló el proyecto.

Desde un punto de vista técnico, el prototipo funciona correctamente y permite hacer las pruebas necesarias para generar una microrred más robusta y de mayor tamaño. También abre las puertas para nuevos proyectos como corrección del factor de potencia para mejorar la eficiencia de los inversores, diseño de control jerárquico de energías y monitorización del consumo eléctrico de electrodomésticos para la detección de fallas.

5.2 Validación ambiental

Desde un punto de vista ambiental, primero se deben calcular kWh al año que genera la microrred

$$kwh = \frac{5[horas\ pico] \cdot 470\ w}{1000} = 2.350 \frac{kwh}{dia}$$

Para este cálculo se toman 5 horas pico de sol día en Piedecuesta, que son la mitad de las horas sol promedio en Piedecuesta.

$$\frac{kWh}{año} = 2 \cdot 2.35 \left[\frac{kWh}{dia} \right] \cdot 365 [dias] = 1715500 \frac{kWh}{año}$$

Por lo tanto, para un año se tienen 1715.5 kWh o 1.716 MWh en ambos paneles.

$$TonCO_2 = 1.716 [MWh] \cdot 0.16438 \left[\frac{TonCO_2}{MWh} \right] = 0.2882 TonCO_2$$

Teniendo en cuenta que en Colombia se producen 0.16438 TonCO₂ por cada MWh, el prototipo está ahorrando 0.2882 toneladas de CO₂ en un año [48].

5.3 Validación económica

Económicamente, con el prototipo se realiza un ahorro de 51092 pesos mensuales. Para estos cálculos se usó el costo de ESSA del kWh en estrato 3 [49].

$$valor = 2 * 2.35 \left[\frac{kWh}{dia} \right] \cdot 30 [dias] \cdot 724.72 \left[\frac{cop}{kWh} \right] = \$102184$$

Tener en cuenta que se usó un valor bastante conservador de horas sol pico en Piedecuesta.

Con los costos en equipos dados por la siguiente tabla:

Tabla 2. *Costo de equipos instalados*

Costo de equipos instalados			
Cantidad	Dispositivo	Valor unitario	Valor total
2	Paneles solares	\$ 575.757	\$ 1.151.515
2	Controladores de carga PWM	\$ 63.000	\$ 126.000
4	Baterías de plomo - acido	\$ 529.453	\$ 2.117.813
1	Inversor eléctrico	\$ 1.349.900	\$ 1.349.900
2	Sensores Pzem 004t V3 SAC 100 A	\$ 89.900	\$ 179.800
1	Sensores Pzem017dc	\$ 106.800	\$ 106.800
3	ESP-32	\$ 37.900	\$ 113.700
1	Raspberry PI3	\$ 320.000	\$ 320.000
1	Accesorios (cable, conectores...)	\$ 200.000	\$ 200.000
Total			\$ 5.665.527

$$tiempo\ recuperacion\ de\ inversion = \frac{5665527}{102184} = 56[meses]$$

Solo teniendo en cuenta costos de materiales la recuperación de la inversión se lograría en alrededor de 56 meses, que es 16 meses antes de tener que cambiar las baterías. Se desprecian costos de ingeniería, administración, instalación, liquidez entre otros; teniendo en cuenta, que es un prototipo de carácter académico, para una instalación de carácter comercial se deberían tener encuentra estos rubros. También se desprecian costos de mantenimiento preventivo ya que el diseño del laboratorio presenta un fácil acceso a los paneles por lo que no se requieren materiales especiales para la limpieza de los mismos.

Otro resultado no tan tangible dentro de la tesis es el desarrollo de un proyecto de ingeniería que tuvo condiciones reales de la industria actual, como la integración de diferentes tecnologías,

la reutilización de infraestructura en el laboratorio, limitantes de presupuesto y modificaciones en la instalación

6. Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones

Desde un punto de vista técnico se logra el objetivo de generar un prototipo de microrred de energía fotovoltaica con baterías como sistema de respaldo, con un sistema de monitoreo que permite de manera remota supervisar las variables eléctricas de la microrred, se validó el comportamiento de todo el sistema. Se realiza un cálculo de la cantidad de CO₂ que se deja de emitir con el prototipo.

Desde un punto de vista de proyecto, se realizó integración de diferentes tecnologías donde se aprovechó de la mejor manera la infraestructura disponible. Logrando entregar un proyecto que genera las bases para llevar a cabo proyectos con alcances más extensos.

Así mismo, el proyecto sirve de soporte al proyecto de investigación de fodein nombrado en las condiciones iniciales, ya que el proyecto de fodein se basa en realizar las evaluaciones del comportamiento ambiental.

6.2 Trabajos futuros

Teniendo en cuenta que el laboratorio de testeo a la fecha ya arreglo sus condiciones de red eléctrica, se puede realizar diferentes topologías de conexión, aumentando la cantidad de equipos para poder hacer diferentes estudios de medición. De igual forma el proyecto permite dejar las bases para realizar control jerárquico de energía, paralelización de equipos eléctricos para

detección de fallas. Con ayuda del sistema de monitoreo se dejan las bases para un proyecto de domótica, ya que home assistant permite la vinculación de diferentes dispositivos como cámaras, televisores entre otros.

Referencias

- [1] J. J. Eras, «A look to the Electricity Generation from Non-Conventional Renewable Energy Sources in Colombia», *International Journal of Energy Economics and Policy*, ene. 2019, doi: 10.32479/ijeep.7108.
- [2] C. Hb, «Analysis of impact of dams on the environment», *Social Science Research Network*, ene. 2022, doi: 10.2139/ssrn.4137886.
- [3] Adelaida Torres, «Hidroeléctricas y desarrollo local ¿mito o realidad? caso de estudio: Hidroituango», *Energetica magazine*, ene. 2014, [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1470/147040027008.pdf>
- [4] «Caracterizacion ZNI», Ministerio de minas y energia colombiano.
<https://ipse.gov.co/cnm/caracterizacion-de-las-zni/> (accedido 6 de septiembre de 2023)
(accedido 6 de septiembre de 2023).
- [5] J. V. Arenales, «Ya hay 38 proyectos de energía solar en funcionamiento en el territorio nacional», *Diario La República*, 7 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/economia/ya-hay-38-proyectos-de-energia-solar-en-funcionamiento-en-todo-el-territorio-nacional-3560668>
- [6] «La energía del sol ilumina cerca de 400 hogares de La Alta Guajira», *ipsegov.co*.
<https://ipse.gov.co/blog/2021/06/26/la-energia-del-sol-ilumina-cerca-de-400-hogares-de-la-alta-guajira/>
- [7] A. O. M. Maka y J. Alabid, «Solar energy technology and its roles in sustainable development», *Clean energy*, vol. 6, n.o 3, pp. 476-483, jun. 2022, doi: 10.1093/ce/zkac023.

- [8] L. Szabó, «The history of using solar energy», International Conference on Modern Power Systems (MPS), jun. 2017, doi: 10.1109/mps.2017.7974451.
- [9] F. De La Cruz Cabrales Avila y R. A. M. Otero, «Sistemas fotovoltaicos: solución energética en las comunidades aisladas», Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research), dic. 2022, doi: 10.5281/zenodo.7461726.
- [10] S. Kumar, P. Tiwari, y M. Zymbler, «Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review», Journal of Big Data, vol. 6, n.o 1, dic. 2019, doi: 10.1186/s40537-019-0268-2.
- [11] G. Kavlak, J. McNerney, y J. E. Trancik, «Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules», Energy Policy, vol. 123, pp. 700-710, dic. 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2018.08.015.
- [12] I. González, «Premio Nobel de Química 2019: Baterías Ion-Li», Educación Química, feb. 2020, doi: 10.22201/fq.18708404e.2020.1.72730.
- [13] I. Solares, «Regulador de carga, elemento indispensable en los paneles solares», Rayssa, 24 de agosto de 2021. <https://www.rayssa.cl/regulador-de-carga-elemento-indispensable-en-los-paneles-solares/>
- [14] M. Sanz, «Diferencias entre inversores de onda pura y de onda modificada», NextCity Labs, 19 de julio de 2021. <https://nextcitylabs.com/global/en/diferencias-entre-inversores-de-onda-pura-y-de-onda-modificada/>
- [15] «El impacto del Internet de todas las cosas (IoT) en la vida cotidiana», Ciencia latina, vol. 6, n.o 2, pp. 1369-1378, abr. 2022, doi: 10.37811/cl_rcm.v6i2.1959.

- [16] Ecogreensolar, «SISTEMAS OFF-GRID(AUTÓNOMOS) | Eco Green Solar», Eco Green Solar, 23 de septiembre de 2021. <https://www.ecogreensolar.co/sistemas-off-gridautonomos/>
- [17] NewenSolar, «Proyectos solares fotovoltaicos conectados a la red (On grid) - Newen Solar», Newen Solar, 24 de septiembre de 2018. <https://newensolar.cl/proyectos-solares-fotovoltaicos-conectados-a-la-red/>
- [18] HiPower, «Qué es y cómo funciona un sistema híbrido de energía solar», Hipower, 22 de junio de 2022. <https://blog.hipowercr.com/que-es-y-como-funciona-un-sistema-hibrido-de-energia-solar>
- [19] P. Solar, «¿Cuál elegir? Paneles solares monocristalinos vs. policristalinos: ventajas y desventajas», PlataformaSolar, 19 de septiembre de 2021. <https://blog.plataformasolar.cl/cual-elegir-paneles-solares-monocristalinos-vs-policristalinos-ventajas-y-desventajas/>
- [20] Ecogreensolar, «Batería ciclo profundo 150A 12V Netion | Eco Green Solar», Eco Green Solar, 16 de diciembre de 2022. <https://www.ecogreensolar.co/producto/bateria-ciclo-profundo-150a-12v-netion-2/>
- [21] «Batería GEL 6V 600Ah Tensite | Al mejor precio Colombia». <https://autosolar.co/baterias-gel-6v/bateria-gel-6v-600ah-tensite>
- [22] «Baterías de litio para paneles solares | Batería de litio». <https://autosolar.co/baterias-de-litio>
- [23] «Batería ciclo profundo 12V 55Ah Netion - Solartex Colombia», Solartex Colombia, 23 de julio de 2022. <https://www.solartex.co/tienda/producto/bateria-ciclo-profundo-12v-55ah-netion/>

- [24] Panel Solar Chile, «INVERSOR 2000W ONDA PURA JARRETT 12V » Panel Solar Chile», Panel Solar Chile, 15 de marzo de 2022. <https://panelsolarchile.cl/producto/inversor-2000w-onda-pura-jarrett-12v/>
- [25] «Controlador de carga solar pwm», Made-in-China.com. https://es.made-in-china.com/co_jyinschina/product_12V-24V-5A-10A-15A-20A-Automatic-Manual-PWM-Solar-Charge-Controller_ehgniohhg.html
- [26] Almeyda, «Comprobacion de luminarias», YouTube. 27 de octubre de 2023. Accedido: 27 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/shorts/96dHz1YaC94>
- [27] P. Schoutsen, «New logo for Home Assistant», Home Assistant, 8 de marzo de 2015. <https://www.home-assistant.io/blog/2015/03/08/new-logo/>
- [28] PCMag, «Raspberry Pi 4 vs Pi 3», PCMAG, 7 de agosto de 2019. <https://www.pcmag.com/reviews/raspberry-pi-4>
- [29] LME Editorial Staff, «Getting started with ESP32», Last Minute Engineers, 30 de noviembre de 2023. <https://lastminuteengineers.com/getting-started-with-esp32/>
- [30] Peacefair [Peacefair], «Datasheet PZEM004TV3», Innovatorsguru. <https://innovatorsguru.com/wp-content/uploads/2019/06/PZEM-004T-V3.0-Datasheet-User-Manual.pdf>
- [31] Peacefair, «PZEM017DC datasheet». [https://thesunpays.com/downloads/files/Battery%20SOC%20meters/PZEM-003%20017User%20Manual\(MEDC300V\).pdf](https://thesunpays.com/downloads/files/Battery%20SOC%20meters/PZEM-003%20017User%20Manual(MEDC300V).pdf)
- [32] «Medidor de energía Potencia Voltaje corriente PZEM-004T V3.0 CT 100A - Electronilab», Electronilab, 7 de diciembre de 2023.

- <https://electronilab.co/tienda/medidor-de-energia-potencia-voltaje-corriente-pzem-004t-uart/>
- [33] Solarduino, «PZEM-017 DC Energy Meter», A blog about DIY solar and arduino projects, 6 de febrero de 2020. <https://solarduino.com/pzem-017-dc-energy-meter-with-arduino>
- [34] Felipeh, «Homeassistant/inversor.yaml at main · felipeh00/homeassistant», GitHub. <https://github.com/felipeh00/homeassistant/blob/main/inversor.yaml>
- [35] Felipeh, «Homeassistant/pzemcocina.yaml at main · felipeh00/homeassistant», GitHub. <https://github.com/felipeh00/homeassistant/blob/main/pzemcocina.yaml>
- [36] Felipeh, «Homeassistant/bateria.yaml at main · felipeh00/homeassistant», GitHub. <https://github.com/felipeh00/homeassistant/blob/main/bateria.yaml>
- [37] Kevin Esteban Alvarez Londoño, «Conexion paneles solares con infraestructura existente del laboratorio de testeo», YouTube. 29 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=4MhIjquezEo>
- [38] K. E. Alvarez Londoño, «Empalme para conexión con controlador de carga». <https://youtube.com/shorts/9tvx0ib7RiQ>
- [39] Kevin Esteban Alvarez Londoño, «Conexión controlador de carga, baterías, inversor y sensor», YouTube. 29 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=vAS5JhQFIIM>
- [40] Kevin Esteban Alvarez Londoño, «Conexión inversor con caja trifásica», YouTube. 29 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=W2YdUSn6J-E>

- [41] K. E. Alvarez Londoño, «Conexión inversor con caja bifásica». https://youtube.com/shorts/wW3wGhe_0iI?feature=share
- [42] Kevin Esteban Alvarez Londoño, «Prueba de alimentación con luminarias», YouTube. 29 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=DpbKfU7ZDNM>
- [43] Kevin Esteban Alvarez Londoño, «Validación de mediciones del sensor PZEM», YouTube. 29 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=8zpWA7-dME4>
- [44] Kevin Esteban Alvarez Londoño, «Prueba de monitoreo dentro del parque», YouTube. 29 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=0uHzmBU0NrQ>
- [45] Kevin Esteban Alvarez Londoño, «Conexión sensor PZEM a carga puntual», YouTube. 29 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=8AmvZd9YiLI>
- [46] Felipe Andrés Almeyda, «Pruebas de acceso remoto sistema IOT», YouTube. 27 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=hECBlchu2ws>
- [47] «Estudio de los efectos en el factor de potencia y en el contenido armónico producido por el montaje de un generador fotovoltaico en una instalación eléctrica - Repositorio Institucional de la Universidad de El Salvador». <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/15006/>
- [48] «En Colombia factor de emisión de CO₂ por generación eléctrica del sistema interconectado: 164.38 gramos de CO₂ por kilovatio hora», Portal XM.

<https://www.xm.com.co/noticias/en-colombia-factor-de-emision-de-co2-por-generacion-electrica-del-sistema-interconectado>

[49] «Tarifario ESSA», Electrificadora de santander, 15 de octubre de 2023.

https://www.essa.com.co/site/Portals/0/documentos/mi-factura/tarifas/2023/Tarifa_ESSA_202310.pdf