



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL**

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Tema:

**SISTEMA INALÁMBRICO DE ENERGÍA POR FOTOSÍNTESIS CON
TECNOLOGÍA IOT, PARA EL MONITOREO DE INVERNADEROS**

Trabajo de titulación modalidad Proyecto de Investigación, presentado previo a la
obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

ÁREA: Comunicaciones

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Tecnología de la información y Sistemas de
control

AUTOR: Diego Alexander Quiroga Condo

TUTOR: Ing. Juan Pablo Pallo Noroña, Mg.

Ambato - Ecuador

febrero – 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del trabajo de titulación con el tema: SISTEMA INALÁMBRICO DE ENERGÍA POR FOTOSÍNTESIS CON TECNOLOGÍA IOT, PARA EL MONITOREO DE INVERNADEROS, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por el señor Diego Alexander Quiroga Condo, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que el estudiante ha sido tutorado durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 17 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.3 del instructivo del reglamento referido.

Ambato, febrero 2025.



Ing. Juan Pablo Pallo Noroña, Mg.

TUTOR

AUTORÍA

El presente trabajo de titulación con el tema: SISTEMA INALÁMBRICO DE ENERGÍA POR FOTOSÍNTESIS CON TECNOLOGÍA IOT, PARA EL MONITOREO DE INVERNADEROS es absolutamente original, auténtico y personal y ha observado los preceptos establecidos en la Disposición General Quinta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, febrero 2025.



Diego Alexander Quiroga Condo

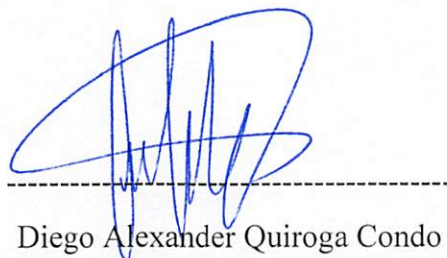
C.C. 1804402772

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato para que reproduzca total o parcialmente este trabajo de titulación dentro de las regulaciones legales e institucionales correspondientes. Además, cedo todos mis derechos de autor a favor de la institución con el propósito de su difusión pública, por lo tanto, autorizo su publicación en el repositorio virtual institucional como un documento disponible para la lectura y uso con fines académicos e investigativos de acuerdo con la Disposición General Cuarta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, febrero 2025.



Diego Alexander Quiroga Condo

C.C. 1804402772

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del informe final del trabajo de titulación presentado por el señor Diego Alexander Quiroga Condo, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado SISTEMA INALÁMBRICO DE ENERGÍA POR FOTOSÍNTESIS CON TECNOLOGÍA IOT, PARA EL MONITOREO DE INVERNADEROS, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 19 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.4 del instructivo del reglamento referido. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con el señor Presidente del Tribunal.

Ambato, febrero 2025.



Firmado electrónicamente por:
FRANKLIN OSWALDO
MAYORGA MAYORGA

Ing. Franklin Oswaldo Mayorga Mayorga, Mg.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Firmado electrónicamente por:
SANTIAGO MAURICIO
ALTAMIRANO MELENDEZ

Ing. Santiago Altamirano Meléndez, Mg.

PROFESOR CALIFICADOR



Firmado electrónicamente por:
MARTHA ESPERANZA
SEVILLA ABARCA

Ing. Martha Sevilla Abarca, PHD.

PROFESOR CALIFICADOR

DEDICATORIA

A mi madre, por su apoyo incondicional en toda mi etapa de formación académica, además de ser mi mayor inspiración para seguir adelante y por nunca haber perdido la confianza en mí.

A mi Hija Aylin por ser la razón para no rendirme y seguir adelante para poder darle una buena vida en un futuro.

A mi esposa María Fernanda, quien ha sido mi compañera en los buenos y malos momentos, a pesar de eso ha estado a mi lado apoyándome incondicionalmente en cada logro de mi vida.

A mis hermanos, Kevin, Leonardo y Patricia quienes siempre han estado pendientes de mí en todo momento, ya sea en mis logros o en mis errores.

Y por último a mi Padrastro Vicente, que a pesar de todo ha sido una buena influencia para mi vida personal y académica.

Diego

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme la salud y cuidarme siempre, también por brindarme la paciencia, fortaleza y dedicación para lograr mis metas.

A mi familia por su amor, apoyo y comprensión en toda mi etapa de estudio, y por ser las personas que me guiaron para seguir este camino y no dejarlo a medias.

A mi Tutor Ing. Juan Pablo Pallo, por guiarme en el camino correcto, aconsejarme sobre cómo mejorar cada día y en su tutoría en la elaboración de este trabajo.

A mis amigos Jorge y Karo, con quienes hemos seguido adelante en este proceso de formación desde los inicios hasta el final, gracias por su apoyo.

A Juan, Santiago, Alex y Jhon, por estar siempre en mis buenos y malos momentos, gracias por su amistad incondicional y sus consejos, los llevaré siempre presentes en mi vida.

¡Gracias por confiar en mí, los sueños al final se hacen realidad!

Diego

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA.....	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS	xvi
RESUMEN EJECUTIVO	xvii
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Tema de investigación.....	1
1.1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Antecedentes investigativos	2
1.3 Fundamentación teórica	5

1.3.1 Energías Renovables	5
1.3.2 Proceso de Fotosíntesis y su relación con la generación de energía	9
1.3.3 Plantas y Organismos para la Generación de Energía Biofotovoltaica.....	12
1.3.4 Eficiencia de la Generación de Energía en Sistemas Biofotovoltaicos	17
1.3.5 Datos estimados para el almacenamiento de energía.....	18
1.3.6 Comunicación inalámbrica.....	20
1.4 Objetivos	27
1.4.1 Objetivo general	27
1.4.2 Objetivos específicos	27
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	28
2.1 Materiales.....	28
2.2 Métodos.....	31
2.2.1 Modalidad de la investigación	31
2.2.2 Recolección de información.....	31
2.2.3 Procesamiento y análisis de datos	32
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
3.1 Desarrollo de la propuesta.....	33

3.1.1 Descripción del invernadero	33
3.1.2 Distribución del sistema IOT	34
3.1.3 Sistema de carga mediante energía biofotovoltaica	35
3.1.4 Problemas identificados con el sistema de carga tradicional	36
3.1.5 Esquema general del sistema	37
3.2 Etapa 1: Obtención de energía y carga inalámbrica	40
3.2.1 Selección de tecnologías del sistema	41
3.3 Etapa 2: Sensorización y comunicación	43
3.4 Etapa 3: Almacenamiento y visualización de datos	47
3.4.1 Definición de la Base de Datos	47
3.4.2 Propósito de la Base de Datos	48
3.4.3 Estructura de la Base de Datos	49
3.4.4 Procesamiento y análisis de los Datos	52
3.5 Diagrama Electrónico.....	56
3.5.1 Diseño del módulo de almacenamiento de energía de la planta – Etapa 1.	58
3.5.2 Diseño del módulo de sensorización y comunicación – Etapa 2.	66
3.5.3 Diagrama de flujo del sistema inalámbrico con IoT.	70
3.5.4 Diseño de módulo de carga energética inalámbrica.....	72
3.6 Cálculo de Obtención de Energía por Planta	77
3.7 Transferencia De Energía Inalámbrica.....	79
3.8 Análisis de Fiabilidad del Dispositivo.	81

3.9 Análisis estadístico de Temperatura, Humedad y Voltajes.....	83
3.10 Presupuesto	94
3.11 Discusión.....	95
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
4.1 Conclusiones	96
4.2 Recomendaciones.....	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
ANEXOS	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla comparativa de las energías renovables	9
Tabla 2. Clasificación de la fotosíntesis en la energía biofotovoltaica	12
Tabla 3. Comparación de Tipos de Plantas para la Generación de Energía Solar	16
Tabla 4. Tabla de Voltajes Estimados para Plantas en Sistemas Biofotovoltaicos...	18
Tabla 5. Ventajas y Desventajas del WPT	22
Tabla 6. Tabla comparativa de los métodos de campo lejano y cercano.	25
Tabla 7. Materiales para la generación de energía inalámbrica.	28
Tabla 8. Materiales para la obtención de energía.....	29
Tabla 9. Materiales para la comunicación.....	29
Tabla 10. Softwares empleados.....	30
Tabla 11. Recolección de Información.	32
Tabla 12. Comparación de Sistemas de Carga.....	36
Tabla 13. Módulos de transmisión y recepción inalámbrica.....	42
Tabla 14. Balanceador de carga en la batería Tattu 600 mA	42
Tabla 15. Comparación entre módulos de comunicación.	44
Tabla 16. Microcomputadora Raspberry Pi 4	45
Tabla 17. Tabla de los módulos de telemetría.....	46
Tabla 18. Variables para la base de datos.	51
Tabla 19. Datos sensados del 23 al 24 de diciembre 2024.....	62
Tabla 20. Datos sensados del 25 al 26 de diciembre 2024.....	63

Tabla 21. Datos sensados del 26 al 27 de diciembre 2024	64
Tabla 22. Datos sensados del 28 al 30 de diciembre 2024.....	65
Tabla 23. Comparación de los materiales para la construcción de la estación	73
Tabla 24. Matriz de Correlación.	83
Tabla 25. Análisis de Varianza de la Temperatura.	87
Tabla 26. Resumen del modelo.....	87
Tabla 27. Coeficientes.....	87
Tabla 28. Análisis de Varianza de la Humedad.	88
Tabla 29. Resumen del modelo	89
Tabla 30. Coeficientes.....	89
Tabla 31. Análisis de Varianza del Voltaje Obtenido.....	90
Tabla 32. Resumen del modelo	90
Tabla 33. Coeficientes.....	90
Tabla 34. Análisis de Varianza del Voltaje Enviado	92
Tabla 35. Resumen del modelo	92
Tabla 36. Coeficientes.....	92
Tabla 37. Presupuesto	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Energía Eólica.	6
Figura 2. Energía Hidroeléctrica.	7
Figura 3. Energía Fotovoltaica.	7
Figura 4. Energía Fotovoltaica.	8
Figura 5. Proceso de Fotosíntesis.....	10
Figura 6. Descripción general de la fotosíntesis.	11
Figura 7. Energía Biofotovoltaica.	16
Figura 8. Transmisión inalámbrica de energía.	20
Figura 9. Diseño de la transferencia de energía inalámbrica WPT.....	21
Figura 10. Modelo del Invernadero.....	34
Figura 11. Distribución de las estaciones de medición en el invernadero.	34
Figura 12. Esquema general del sistema.....	38
Figura 13. Diagrama de Obtención de Energía - Etapa 1	41
Figura 14. Diagrama de Sensorización y Comunicación - Etapa 2.....	43
Figura 15. Diagrama de Almacenamiento y visualización de datos - Etapa 3.....	47
Figura 16. Configuración de MySQL en Grafana.....	54
Figura 17. Configuración del protocolo MQTT en Grafana	54
Figura 18. Configuración para la presentación de datos en el dashboard.....	55
Figura 19. Interfaz de visualización final.....	55
Figura 20. Diagrama electrónico del procesamiento de energía de la planta.....	56

Figura 21. Esquemas de conexión del circuito.....	57
Figura 22. Diseño del módulo de almacenamiento de energía – Etapa 1	58
Figura 23. Diseño del módulo de sensorización y comunicación – Etapa 2.....	66
Figura 24. Boceto de la estructura para la carga inalámbrica.	72
Figura 25. Diseño del Case en 3D.....	72
Figura 26. Diseño de una Rectenna.....	74
Figura 27. Análisis estadístico de los datos a sensar.....	86
Figura 28. Probabilidad de la Temperatura.....	88
Figura 29. Probabilidad de la Humedad.....	89
Figura 30. Gráfica de Voltaje Obtenido.....	91
Figura 31. Gráfica de Voltaje Enviado.	93
Figura 32. Histograma del Voltaje Obtenido y el Voltaje Enviado	93

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Case del módulo de almacenamiento de energía.....	104
Anexo B. Case del módulo de sensorización y comunicación	104
Anexo C. Código utilizado para la obtención de datos en la SPE32	105
Anexo D. Diagramas de plataformas de desarrollo embebido.....	108
Anexo E. Lugar de la implementación del prototipo	109
Anexo F. Evidencias de la instalación de equipos	110

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto tiene como objetivo implementar un sistema inalámbrico de energía por fotosíntesis con tecnología IoT, enfocado en el monitoreo eficiente de invernaderos. El sistema integra energía renovable y transmisión inalámbrica mediante una rectenna, eliminando la dependencia de fuentes no renovables.

El sistema biofotovoltaico utiliza plantas como el helecho *Nephrolepis exaltata*, generando energía a partir de la fotosíntesis. Con un área foliar efectiva de 0.5 m², las plantas producen aproximadamente 1.161 W por día, suficiente para alimentar sensores IoT. La energía generada se transfiere de forma inalámbrica con una eficiencia del 85%, alcanzando un voltaje de 7.99 V en el receptor.

El sistema IoT incluye sensores de temperatura y humedad, distribuidos estratégicamente para recopilar datos en tiempo real y optimizar las condiciones del invernadero. Los datos se almacenan en una base de datos en la nube, accesible mediante una interfaz web interactiva.

Con una fiabilidad del 89%, el sistema garantiza un monitoreo continuo y sostenible, reduciendo costos operativos y contribuyendo al manejo ambiental eficiente. Los resultados demuestran que la tecnología es viable para aplicaciones agrícolas de bajo consumo energético, ofreciendo un modelo escalable y adaptable a diferentes entornos.

Palabras clave: Internet de las cosas, energía biofotovoltaica, invernaderos, sensores IoT, rectenna.

ABSTRACT

The present project proposes to implement a wireless photosynthesis energy system with IoT technology, focused on the efficient monitoring of greenhouses. The system integrates renewable energy and wireless transmission through a rectenna, eliminating dependence on non-renewable sources.

The biophotovoltaic system uses plants such as the *Nephrolepis exaltata* fern, generating energy from photosynthesis. With an effective leaf area of 0.5 m², the plants produce approximately 1,161 W per day, enough to power IoT sensors. The generated energy is transferred wirelessly with an efficiency of 85%, reaching a voltage of 7.99 V at the receiver.

The IoT system includes temperature and humidity sensors, strategically distributed to collect real-time data and optimize greenhouse conditions. The data is stored in a cloud database, accessible through an interactive web interface.

With 89% reliability, the system ensures continuous and sustainable monitoring, reducing operating costs and contributing to efficient environmental management. The results demonstrate that the technology is viable for low-energy agricultural applications, offering a scalable and adaptable model for different environments.

Keywords: Internet of things, biophotovoltaic energy, greenhouses, IoT sensors, rectenna.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Tema de investigación

SISTEMA INALÁMBRICO DE ENERGÍA POR FOTOSÍNTESIS CON TECNOLOGÍA IOT, PARA EL MONITOREO DE INVERNADEROS.

1.1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad, la energía no renovable ha sido la principal fuente del país, el cual está causando daños a nivel ambiental, El Plan Nacional para la Diversificación Energética, elaborado por el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, establece una estrategia integral para reducir la dependencia de energías no renovables y fortalecer la resiliencia del país ante cortes eléctricos. Según estadísticas recientes, hasta el 70% de la matriz energética ecuatoriana depende de fuentes no renovables, lo que expone al país a vulnerabilidades significativas en términos de seguridad energética. [1]

El Estudio de Impacto de Cortes de Energía en Sectores Productivos, realizado por la Cámara de Comercio de Quito, revela que los cortes eléctricos representan pérdidas económicas significativas para los sectores productivos de la región. Según el informe, se estima que hasta el 15% del PIB regional se ve afectado por interrupciones en el suministro eléctrico, lo que equivale a aproximadamente \$500 millones de dólares al año en pérdidas directas. Además, se identifica que ciertos sectores, como la industria manufacturera y el comercio, son particularmente vulnerables, sufriendo pérdidas de hasta el 25% en su producción y ventas durante los períodos de cortes eléctricos prolongados. [2]

Un estudio reciente de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE ha puesto de manifiesto el enorme potencial de los paneles solares orgánicos para transformar los invernaderos de Pichincha. Estos innovadores paneles, integrados en la estructura del invernadero, permiten que los cultivos crezcan con la energía del sol, reduciendo la dependencia de la red eléctrica y las emisiones contaminantes. De hecho, en un estudio piloto con cultivos de tomate, se ha observado una disminución del 30% en el consumo de energía proveniente de fuentes no

renovables durante un ciclo de producción de 6 meses, junto con un aumento del 15% en la productividad. [3]

Sin embargo, la integración de energías renovables en invernaderos presenta desafíos únicos. No se trata simplemente de instalar paneles solares convencionales. Es necesario considerar el espacio limitado, la necesidad de que los paneles permitan el paso de la luz adecuada para la fotosíntesis de las plantas, y la importancia de contar con sistemas de almacenamiento de energía compactos y eficientes. Además, muchos invernaderos se encuentran en zonas rurales con acceso limitado a la red eléctrica, lo que incrementa los costos de instalación y mantenimiento. [3]

Los cortes de luz son un problema grave para los agricultores, ya que pueden dañar equipos sensibles como sistemas de riego y control climático, y provocar pérdidas significativas en las cosechas. Un sistema de almacenamiento de energía, como baterías de ion-litio de última generación, es fundamental para garantizar un suministro eléctrico continuo y proteger la inversión de los agricultores.

Pero la energía no lo es todo. La precisión en el control de las condiciones ambientales dentro del invernadero es crucial para obtener cultivos sanos y productivos. Los cables eléctricos pueden interferir con los sensores que miden la temperatura, la humedad y otros parámetros, y si estos cables están dañados o mal aislados, las lecturas pueden ser erróneas. Esto puede llevar a decisiones equivocadas en el manejo del invernadero, como un riego inadecuado o una ventilación deficiente, que afectan el crecimiento de las plantas y la calidad de la producción. [4]

1.2 Antecedentes investigativos

Según Prithvi Krishna Chittoor, Bharatiraja Chokkalingam y Lucian Mihet-Popa en Agosto de 2021 con su publicación “Evaluation of photoanode materials used in biophotovoltaic systems for renewable energy generation”, El estudio evalúa materiales de fotoánodos en sistemas biovoltaicos (BPV) que combinan tecnologías biológicas y fotovoltaicas para la generación de energía renovable, utilizando microorganismos fotosintéticos como algas y cianobacterias. Se enfocó en el análisis de óxidos metálicos como TiO_2 y ZnO , con el objetivo de mejorar la eficiencia de conversión de energía mediante la transferencia de electrones desde los

organismos hacia un electrodo. La metodología incluyó caracterización electroquímica, microscopía electrónica y pruebas de rendimiento de los fotoánodos en condiciones de laboratorio, conectándolos a sistemas biológicos. Los resultados mostraron que la rugosidad superficial y la transparencia óptica de los materiales influyen positivamente en la eficiencia de transferencia de electrones, y los tratamientos superficiales específicos mejoraron la estabilidad operativa, lo que permite una producción de energía constante en el tiempo. [5]

Kevin Steve Velasco Baque en el año 2020, con la investigación realizada en Ecuador titulada “Diseño e implementación de un prototipo didáctico de transmisión de energía inalámbrica de hasta 20w” se enfoca en el análisis, estudio, diseño y construcción de un sistema de transmisión y recepción inalámbrica, específicamente centrado en la potencia de transmisión y recepción. La tecnología utilizada se basa en topologías de resonancia en altas frecuencias, evaluadas mediante pruebas de eficiencia para determinar su viabilidad y rendimiento. Los datos obtenidos de estas pruebas son fundamentales para cumplir el objetivo principal del proyecto, que es desarrollar un prototipo didáctico destinado a iniciar estudios avanzados en tecnología de resonancia y electrónica de potencia. Las técnicas de diseño se seleccionaron tras un exhaustivo estudio del principio de funcionamiento de la transmisión eléctrica por acoplamientos inductivos, buscando optimizar el método para lograr una alta eficiencia cuantificable. Los resultados preliminares indican mejoras significativas en la eficiencia de transmisión y recepción, con incrementos de hasta un 30% en la transferencia de energía comparado con métodos convencionales, proporcionando una base robusta para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el campo de la electrónica de potencia y sistemas inalámbricos. [6]

En el artículo "Effectiveness of biophotovoltaics system modified with fuller-clay composite separators for chromium removal" por Gunaseelan, K and Jadhav, Dipak A and Pant, Deepak and Gajalakshmi en el 2022, investiga el uso de sistemas biophotovoltaicos (BPV) modificados con separadores compuestos de fullereno y arcilla para la remoción de cromo de aguas contaminadas, al tiempo que generan energía. La tecnología combina microorganismos fotosintéticos con electrodos y separadores avanzados que mejoran la eficiencia del sistema tanto en la producción de electricidad como en la eliminación de metales pesados. La metodología incluyó la construcción de un BPV modificado con estos separadores, seguido de pruebas de laboratorio para medir la eficiencia en la generación de corriente y la capacidad de

remover cromo. Se evaluaron parámetros como la densidad de corriente, la concentración de cromo eliminada y la estabilidad del sistema a lo largo del tiempo. Los resultados mostraron que la incorporación del separador de fullereno y arcilla incrementó la eficiencia de remoción de cromo en un 65%, al tiempo que mejoró la producción eléctrica en comparación con sistemas BPV convencionales, destacando su potencial para aplicaciones ambientales y energéticas. [7]

Por otra parte, Qi, Xiang and Liu, Xinning and Gu, Yuyi and Liang, Peng en 2024 con su artículo "Whole-cell biophotovoltaic systems for renewable energy generation: A systematic analysis of existing knowledge, revisa los avances en los sistemas biophotovoltaicos (BPV) de célula completa, los cuales emplean microorganismos fotosintéticos como algas y cianobacterias para convertir luz solar en electricidad mediante la transferencia de electrones hacia un electrodo. La tecnología se basa en el uso de electrodos conductores hechos de materiales avanzados, como nanotubos de carbono y óxidos metálicos, que facilitan la captura de electrones. La metodología de revisión sistemática compara diversos estudios experimentales, analizando la eficiencia de conversión energética y la estabilidad operativa de los sistemas BPV. Los resultados destacan que la morfología de los electrodos, como la porosidad y rugosidad, es clave para mejorar la transferencia de electrones. Aunque se observan mejoras en la densidad de corriente, hasta 1.5 mA/m², la estabilidad a largo plazo sigue siendo un desafío debido a la degradación de los microorganismos. El artículo concluye que optimizar los materiales de los electrodos y la interacción con los microorganismos es esencial para aumentar la eficiencia y viabilidad de estos sistemas. [8]

En el artículo realizado por Edison Andrés Zapata Ochoa en el año 2023, en Colombia titulado "Transferencia de energía inalámbrica a través de acoplamiento mutuo usando antenas monopolo" El antecedente investigativo que condujo al artículo, fue el continuo interés en desarrollar tecnologías de carga inalámbrica más eficientes y versátiles. La carga inalámbrica se ha convertido en un área de investigación en rápido crecimiento, impulsada por la proliferación de dispositivos electrónicos portátiles y la necesidad de soluciones de carga más convenientes y flexibles. Las tecnologías convencionales de carga inalámbrica, como la inducción electromagnética, tienen limitaciones en términos de eficiencia y distancia de transferencia de energía. El uso de acoplamiento mutuo entre antenas monopolo en la transferencia de energía inalámbrica representa un enfoque innovador para superar algunas de estas limitaciones. El acoplamiento mutuo permite que las antenas transmitan energía de

manera más eficiente al estar acopladas entre sí, lo que puede aumentar la eficiencia de la transferencia de energía y ampliar la distancia sobre la cual puede ocurrir la carga inalámbrica. Los resultados de esta investigación incluyeron la mejora de la eficiencia de carga y la evaluación de cómo el uso de acoplamiento mutuo entre antenas monopolo puede mejorar la eficiencia de la transferencia de energía en comparación con otros métodos de carga inalámbrica. A su vez se exploró, posibles aplicaciones prácticas de esta tecnología en diferentes campos, como la carga de dispositivos electrónicos portátiles, la alimentación de sensores remotos o la carga de vehículos eléctricos. [9]

1.3 Fundamentación teórica

1.3.1 Energías Renovables

Es aquella que puede suplir a las energías o fuentes energéticas fósiles actuales, ya sea por su menor efecto contaminante, o fundamentalmente por su posibilidad de renovación. Las fuentes de energía renovables provienen de fuentes inagotables, principalmente el Sol y la Tierra y su disponibilidad no disminuye con el tiempo. El Sol y la Tierra seguirán proveyendonos de energía durante algunos millones de años más, y con él los vientos, la fotosíntesis de las plantas, el ciclo de agua, las fuerzas del mar y el calor al interior de la Tierra. [10]

A partir del siglo XIX su uso ha ido incrementándose sobre todo en los países que tienen una mayor población y de mayor desarrollo por lo que en el año 2003 el consumo de energías renovables significó un 6% del consumo a nivel mundial, con el uso de energías renovables como el viento (energía eólica), los ríos y corrientes de agua dulce (energía hidráulica), los mares y océanos (energía mareomotriz y undimotriz), materias orgánicas (biomasa) y el calor de la tierra (energía geotérmica). [10]

a. Energía Eólica

Como se observa en la Figura 1, la energía eólica es una variedad dentro de la energía, pues se deriva del calentamiento diferencial de la atmósfera y de las irregularidades de relieve de la superficie terrestre. Sólo una pequeña fracción de la energía solar recibida por la Tierra se convierte en energía cinética del viento y sin embargo ésta alcanza cifras enormes, superiores

en varias veces a todas las necesidades actuales de electricidad sin afectar a las zonas con mayor valor ambiental. [10]

La potencia que se puede obtener con un generador eólico es proporcional al cubo de la velocidad del viento; al duplicarse la velocidad del viento la potencia se multiplica por ocho, y de ahí que la velocidad media del viento sea un factor determinante a la hora de analizar la posible viabilidad de un sistema eólico.

La energía eólica es un recurso muy variable, tanto en el tiempo como en el lugar, pudiendo cambiar mucho en distancias muy reducidas. [10]



Figura 1. Energía Eólica. [11]

b. Energía Hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica es generada cuando la fuerza del agua pasa a través de una turbina la misma que transforma en la energía eléctrica dependiendo de la velocidad y la cantidad de agua que pasa por la turbina, cuya eficiencia puede llegar al 90%. En la mayoría de los casos es la forma más barata de producir electricidad, aunque los costes ambientales no han sido seriamente considerados, su construcción afecta directamente al medio ambiente produciendo cambios importantes en las zonas que se aprovechan los caudales de los ríos cambiando no solo su geografía si no también su flora y fauna existentes. [12]

En la Figura 2, se puede observar el diseño de una represa para el uso de la energía hidráulica. [12]



Figura 2. Energía Hidroeléctrica. [13]

c. Energía Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es la electricidad generada por la conversión de la luz solar en energía eléctrica renovable mediante materiales semiconductores que presentan el efecto fotoeléctrico. Si unimos muchas células, tenemos un panel solar o fotovoltaico. [14]

- **La energía solar se obtiene por medio de paneles y espejos**

Células solares fotovoltaicas: convierten la luz solar directamente en electricidad por el llamado efecto fotoeléctrico, por el cual determinados materiales son capaces de absorber fotones y liberar electrones, generando una corriente eléctrica.

Esa energía también se puede aprovechar de forma pasiva con técnicas de arquitectura bioclimática como se observa en la Figura 3. [15]



Figura 3. Energía Fotovoltaica. [16]

d. Energía Bio-Fotovoltaica

Las tecnologías de energía renovable son competitivas en costos, como fuentes de energía convencionales; en aplicaciones tales como calentamiento de agua, electrificación sin conexión a la red con energía solar fotovoltaica, generación de energía de biomasa a pequeña escala, biocombustibles, conexión a la red y fuera de la red con una pequeña hidroeléctrica y utilización de metano de residuos urbanos e industriales. [17]

En cada nación se necesita de una cantidad adecuada de electricidad para su crecimiento eficiente. Por esta razón se ha generado fuentes de energía renovables, eficientes y sostenibles para proteger el bienestar de las generaciones futuras. En los países bajos, Planta-e ha desarrollado un sistema innovador para generar electricidad de una forma más ecológica. Se basa en plantas vivas en celdas de combustible vegetal microbianas (P-MFC por sus siglas en inglés) que en conjunto con bacterias puede convertir la energía solar en electricidad in situ. [17]

Las plantas utilizan el dióxido de carbono y el agua en el proceso de fotosíntesis para crecer, transformando la luz solar en energía química que almacenan en forma de materia orgánica. En la Figura 4, se observa Una parte significativa de la materia orgánica generada por las plantas es liberada en el suelo a través de las raíces como un subproducto. En el suelo, bacterias electroquímicamente activas descomponen esta materia, generando electrones que la planta aprovecha para producir electricidad. La principal ventaja del sistema son las plantas vivas, a diferencia de los paneles solares tradicionales, pueden capturar energía solar de manera continua y generar electricidad durante las 24 horas del día. La principal ventaja de Plant Power es que las plantas vivas pueden capturar energía solar de forma natural y generar electricidad las 24 horas del día, a diferencia de los paneles solares artificiales. [17]

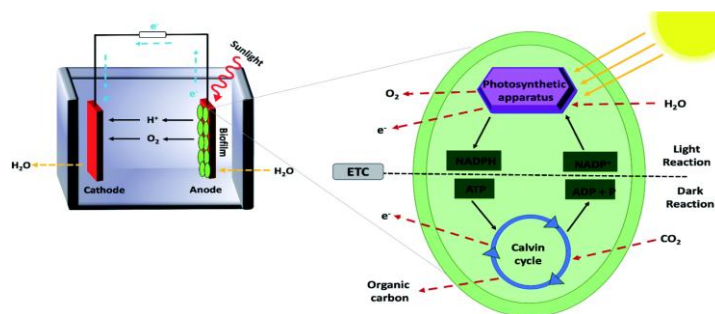


Figura 4. Energía Fotovoltaica. [18]

La Tabla 1, define la comparación de los distintos tipos de energías renovables, estableciendo los criterios adecuados para cada caso, y verificando cual es el más efectivo.

Tabla 1. Tabla comparativa de las energías renovables

Criterios	Eólica	Hidroeléctrica	Fotovoltaica	Biofotovoltaica
Fuente de Energía	Viento	Caídas de agua	Radiación solar	Plantas + Radiación solar
Impacto Ambiental	Moderado (ruido, impacto visual)	Alto (alteración de ecosistemas)	Bajo (dependiente de la fabricación)	Muy Bajo (se integra con ecosistemas naturales)
Eficiencia Energética	Alta en zonas ventosas	Alta en áreas con abundante agua	Media, depende de la radiación solar	Media (aún en desarrollo, pero con gran potencial)
Dependencia Climática	Alta (necesita viento constante)	Alta (requiere flujo constante de agua)	Alta (depende de la cantidad de sol)	Baja (puede aprovechar la fotosíntesis de plantas)
Costo de Instalación	Alto	Muy Alto (infraestructura)	Alto	Bajo (puede ser integrado a sistemas agrícolas)
Mantenimiento	Moderado	Alto (mantenimiento de presas)	Bajo	Muy Bajo (fácil integración con tecnologías IoT)
Sostenibilidad a Largo Plazo	Moderada	Baja (impacto en ecosistemas acuáticos)	Alta	Muy Alta (autosuficiente a nivel agrícola y energético)
Tecnología IoT	Moderada	Limitada	Alta	Alta (monitoreo y control avanzado en invernaderos)
Emisiones de CO₂	Cero durante generación	Cero durante generación	Cero durante generación	Cero durante generación

1.3.2 Proceso de Fotosíntesis y su relación con la generación de energía

El proceso de fotosíntesis consta de dos fases principales:

Fase Luminosa: Durante esta etapa, la energía solar es absorbida por los pigmentos de las plantas (principalmente la clorofila), lo que genera una serie de reacciones redox que culminan en la producción de ATP y NADPH. En esta fase, se produce la liberación de electrones, que pueden ser capturados por electrodos para la generación de energía eléctrica. [19]

Fase Oscura (Ciclo de Calvin): La energía almacenada en las moléculas de ATP y NADPH se utiliza para fijar el dióxido de carbono en moléculas de glucosa, que luego serán utilizadas por la planta para su crecimiento y desarrollo. [19]

La Figura 5, muestra el contexto de la biofotovoltaica, la captura de los electrones liberados durante la fase luminosa es fundamental para convertir el proceso fotosintético en una fuente de energía eléctrica. [19]

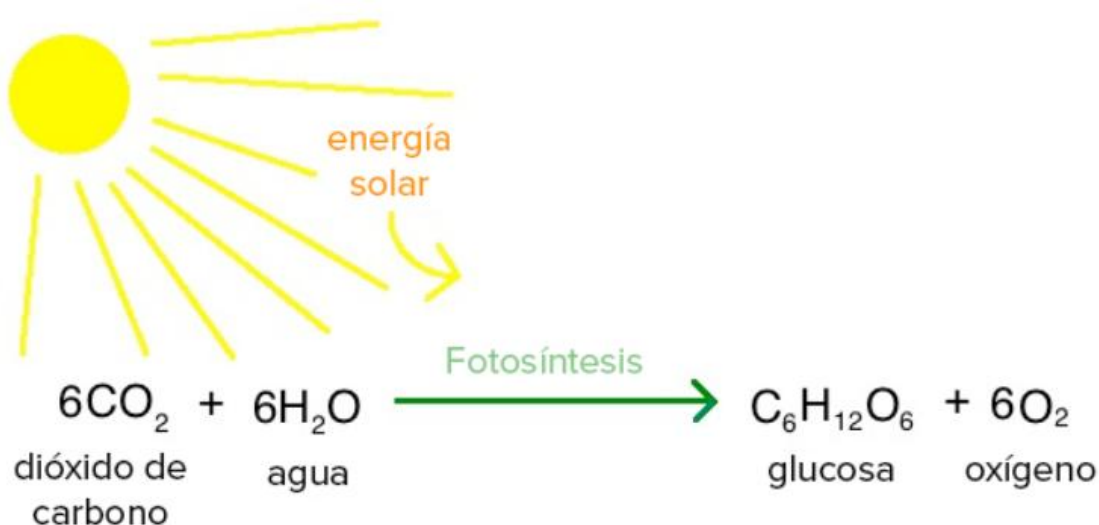


Figura 5. Proceso de Fotosíntesis.[20]

a. Importancia ecológica de la fotosíntesis

Los organismos fotosintéticos, como las plantas, algas y ciertas bacterias, desempeñan un papel ecológico esencial al introducir energía química y carbono fijado en los ecosistemas, utilizando la luz para sintetizar azúcares. Al producir su propio alimento mediante la fijación de carbono gracias a la energía luminosa, se les denomina fotoautótrofos, es decir, "organismos que se alimentan a sí mismos utilizando la luz". En contraste, los seres humanos y otros organismos que no pueden transformar dióxido de carbono en compuestos orgánicos se conocen como heterótrofos, ya que dependen de consumir otros organismos o sus productos para obtener carbono fijado. Los animales, hongos y muchos procariontes y protistas son heterótrofos. [21]

b. Proceso de fotosíntesis

Las plantas son los autótrofos más comunes en los ecosistemas terrestres. Aunque todos los tejidos verdes de las plantas pueden realizar la fotosíntesis, la mayor parte de este proceso se lleva a cabo en las hojas. Como se muestra en la Figura 6 las células del mesófilo, una capa intermedia del tejido foliar, son el principal sitio donde ocurre la fotosíntesis. En casi todas las plantas hay unos pequeños poros llamados estomas en la superficie de las hojas, los cuales permiten que el dióxido de carbono se difunda hacia el mesófilo y el oxígeno hacia el exterior. [22]

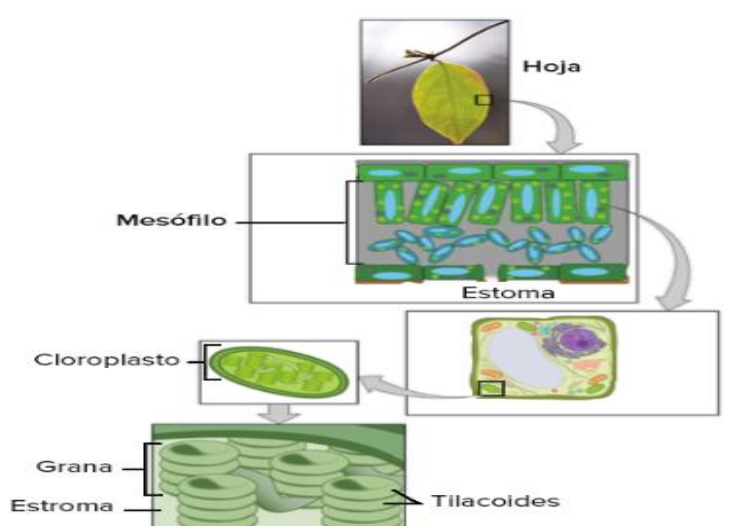


Figura 6. Descripción general de la fotosíntesis. [23]

En la Tabla 2. Se observa la clasificación de los tipos de fotosíntesis para la generación de energía biofotovoltaica, la cual ayudara a el entendimiento del método más usado y aplicado, por su alta confiabilidad energética.

Tabla 2. Clasificación de la fotosíntesis en la energía biofotovoltaica

Clasificación de la Fotosíntesis	Aplicación en Biofotovoltaica
Fotosíntesis Oxigénica	Utilizada en plantas, algas y cianobacterias. Produce oxígeno y electrones durante la fase luminosa, que pueden ser capturados por electrodos para generar energía. Es la más estudiada en sistemas biofotovoltaicos.
Fotosíntesis Anoxigénica	Ocurre en bacterias como las púrpuras y verdes. No produce oxígeno. Aunque genera menos electrones que la fotosíntesis oxigénica, tiene aplicaciones potenciales en entornos extremos.
Fotosíntesis de C3	Este tipo de fotosíntesis se encuentra en la mayoría de las plantas. Es más eficiente en condiciones de baja luz, lo que la hace adecuada para sistemas biofotovoltaicos en interiores.
Fotosíntesis de C4	Ocurre en plantas de climas cálidos como el maíz. Es más eficiente en condiciones de alta luz y temperaturas. Tiene gran potencial para generar más electrones en sistemas biofotovoltaicos.
Fotosíntesis CAM	Típica de plantas como los cactus. Estas plantas realizan la fotosíntesis en la noche y almacenan CO ₂ . Aunque su tasa fotosintética es más baja, podría aprovecharse en sistemas biofotovoltaicos adaptados a climas áridos.

1.3.3 Plantas y Organismos para la Generación de Energía Biofotovoltaica

a. Tipos de Plantas Biofotovoltaicas

- **Algas Verdes (*Chlamydomonas reinhardtii*)**

Las algas verdes como *Chlamydomonas reinhardtii* son microorganismos unicelulares fotosintéticos que destacan por su capacidad para generar electrones durante la fotosíntesis, lo que las hace muy adecuadas para su uso en sistemas biofotovoltaicos. Su pequeño tamaño permite cultivarlas en grandes cantidades en biorreactores, aprovechando su rápido ciclo de vida y su habilidad para absorber luz en un espectro amplio. Aunque la electricidad generada por cada célula individual es limitada, su rápido crecimiento y alta densidad celular en medios acuáticos las convierte en una fuente de energía escalable. Además, su estructura simple permite manipular fácilmente sus condiciones de cultivo, maximizando la eficiencia del proceso fotosintético y la generación de electrones para alimentar sistemas biofotovoltaicos. [24]

- ***Cianobacterias (Synechocystis sp.)***

Las cianobacterias son organismos fotosintéticos que, al realizar fotosíntesis, liberan electrones que pueden ser aprovechados en sistemas biofotovoltaicos. Su capacidad para llevar a cabo fotosíntesis anoxigénica (sin oxígeno) les permite operar en entornos extremos, lo que las convierte en organismos versátiles para generar energía en condiciones donde otras especies no sobrevivirían. Además, su cultivo es sencillo, ya que requieren medios básicos y mínimos insumos, lo que favorece su implementación en biorreactores a gran escala. La eficiencia en la conversión de luz solar de las cianobacterias ha sido probada en estudios experimentales, donde se ha logrado generar electricidad de manera directa desde el proceso fotosintético, abriendo nuevas posibilidades para su uso en la producción de energía sostenible. [24]

- ***Plantas C3 (Arabidopsis thaliana)***

Arabidopsis thaliana es una planta modelo de pequeño tamaño y rápido crecimiento que se ha convertido en una herramienta fundamental en la investigación científica, especialmente en estudios de fotosíntesis y biofotovoltaica. Su principal ventaja radica en su fácil manejo genético y en su genoma completamente secuenciado, lo que facilita la manipulación experimental y el estudio de las rutas fotosintéticas en condiciones controladas. Aunque su tasa de fotosíntesis no es tan elevada como en otras especies, su uso es ideal para experimentos que buscan optimizar o comprender los principios básicos de la generación de energía biofotovoltaica. *Arabidopsis* se utiliza más en investigaciones experimentales para estudiar la eficiencia fotosintética que en la producción energética a gran escala, dado su tamaño y rendimiento limitado. [25]

- ***Plantas C4 (Zea mays - Maíz)***

Las plantas C4, como el maíz (*Zea mays*), presentan un mecanismo fotosintético altamente eficiente en climas cálidos y con intensa irradiación solar. Este tipo de fotosíntesis permite una mayor fijación de carbono y un uso más eficiente del agua, lo que les otorga una ventaja significativa en ambientes de alta luminosidad y temperaturas elevadas, características que favorecen la generación de electrones durante la fotosíntesis. Bajo estas condiciones, las plantas C4 superan en rendimiento a las plantas C3 en cuanto a eficiencia fotosintética. [25]

En sistemas biofotovoltaicos de gran escala, la capacidad del maíz para maximizar la conversión de luz solar en energía lo convierte en un candidato ideal para su implementación en regiones cálidas o tropicales. Su alta eficiencia fotosintética puede ser aprovechada en estos entornos para optimizar la producción de energía, contribuyendo a una mayor generación eléctrica en proyectos biofotovoltaicos orientados hacia la sostenibilidad. [25]

- ***Helecho Crespo (Nephrolepis exaltata)***

El helecho crespo (*Nephrolepis exaltata*) es una planta ornamental caracterizada por su estructura foliar densa, que le permite absorber grandes cantidades de luz solar, lo que la hace ideal para su uso en sistemas biofotovoltaicos. Su capacidad de adaptarse tanto a ambientes húmedos como a entornos controlados, como invernaderos facilita su integración en estos sistemas, donde puede optimizarse la generación de energía mediante la regulación de factores como la luz y la humedad. [26]

Con una alta tasa de fotosíntesis, particularmente eficiente en condiciones de luz moderada a alta, el helecho cresto es capaz de liberar una mayor cantidad de electrones durante la fotosíntesis, lo que potencia su rendimiento energético. Su **extensa** superficie foliar maximiza la captura de luz, contribuyendo a una mayor eficiencia en la generación de energía. Además, presenta la ventaja de requerir **bajo mantenimiento** en comparación con otras plantas, lo que lo hace ideal para sistemas experimentales y proyectos biofotovoltaicos de pequeña escala. [26]

En sistemas biofotovoltaicos terrestres, el helecho cresto es particularmente prometedor debido a su versatilidad y capacidad para crecer en espacios reducidos. Su potencial se maximiza cuando se emplea en instalaciones con paneles de captación de electrones integrados, lo que lo posiciona como una de las plantas más eficientes y viables para esta tecnología emergente. [26]

- ***Cactus (Opuntia ficus-indica) - Plantas CAM***

Los cactus, como *Opuntia ficus-indica*, destacan por su mecanismo de fotosíntesis CAM (Metabolismo Ácido de las Crasuláceas), que les permite realizar fotosíntesis nocturna almacenando CO₂ durante la noche, lo cual es altamente eficiente en climas áridos. Aunque su tasa fotosintética es baja en comparación con otros tipos de plantas, su adaptabilidad a condiciones extremas de sequía y alta resistencia a climas cálidos los convierte en candidatos viables para su uso en sistemas biofotovoltaicos en regiones desérticas. [27]

Estos cactus requieren muy poca agua y son ideales para sistemas que necesitan bajo mantenimiento, lo que los posiciona como una opción prometedora en regiones secas donde los recursos hídricos son limitados. En este contexto, los sistemas biofotovoltaicos que utilicen *Opuntia ficus-indica* podrían aprovechar su resiliencia climática para la generación de energía sostenible en entornos inhóspitos. [27]

b. Generación de Energía Biofotovoltaica

La biofotovoltaica es una tecnología que utiliza organismos fotosintéticos para generar electricidad aprovechando los electrones liberados durante el proceso de fotosíntesis. El mecanismo básico de la fotosíntesis involucra la absorción de luz solar por pigmentos fotosintéticos como la clorofila, lo que excita electrones en las moléculas de agua y genera una corriente de electrones dentro de la célula. En los sistemas biofotovoltaicos, estos electrones son capturados por un electrodo externo conectado a un circuito eléctrico, permitiendo su uso como corriente eléctrica. [28]

Desde una perspectiva técnica, los sistemas biofotovoltaicos emplean biocátodos (estructuras de captación) donde se inmovilizan las células fotosintéticas, como **algas verdes** o **cianobacterias**, en una matriz conductora o sobre un electrodo. En plantas terrestres como el **helecho crespo (*Nephrolepis exaltata*)**, los electrodos se integran cerca de las raíces o en contacto con las hojas, optimizando la captación de electrones liberados durante el ciclo fotosintético. En el diseño del sistema, se optimiza la resistencia interna y la capacidad de captación de electrones mediante el ajuste de variables como la luz, humedad, y la densidad de organismos fotosintéticos. [28]

Este proceso se puede realizar en entornos controlados como biorreactores o invernaderos, donde las condiciones de luz y temperatura son cuidadosamente monitoreadas para maximizar la eficiencia fotosintética. En la Figura 7. Se puede observar corriente generada por este sistema es de bajo voltaje, por lo que se requiere una integración de múltiples células biofotovoltaicas en serie o paralelo para obtener niveles de energía utilizables en aplicaciones prácticas. [28]



Figura 7. Energía Biofotovoltaica. [29]

En la Tabla 3, se relaciona los tipos de plantas que proporcionan energía biofotovoltaica, se han clasificado en su eficiencia energética, el coste de implementación, su facilidad de mantenimiento, aplicabilidad.

Tabla 3. Comparación de Tipos de Plantas para la Generación de Energía Solar

Tipo de Planta	Eficiencia Energética	Coste de Implementación	Facilidad de Mantenimiento	Aplicabilidad en Invernaderos	Observaciones
Algas (microalgas)	Alta	Medio-Alto	Medio	Sí	Alta eficiencia en la conversión de luz solar a energía química.
Musgo	Baja-Media	Bajo	Bajo	Sí	Puede crecer en condiciones adversas, pero con menor eficiencia.
Helecho Crespo	Alta	Medio	Medio	Sí	Pueden ser modificadas genéticamente.
Plantas Fotovoltaicas	Muy Alta	Alto	Medio	No (Directamente)	No son plantas biológicas, pero los sistemas integrados (PV) son eficientes.
Cactus, Suculentas y Espinacas.	Baja-Media	Bajo	Bajo	Sí	Pueden sobrevivir con poca agua.

1.3.4 Eficiencia de la Generación de Energía en Sistemas Biofotovoltaicos

La eficiencia de los sistemas biofotovoltaicos depende en gran medida de varios factores clave, comenzando por la tasa fotosintética de las plantas u organismos fotosintéticos empleados. Esta tasa se refiere a la velocidad a la que las plantas convierten la energía solar en compuestos químicos y liberan electrones durante el proceso de fotosíntesis. Cuanto mayor es la tasa fotosintética, mayor es la cantidad de electrones generados, lo que aumenta el potencial de generación eléctrica en los sistemas biofotovoltaicos. Plantas como el helecho cesposo (*Nephrolepis exaltata*) y algas verdes como *Chlamydomonas reinhardtii* tienen tasas fotosintéticas significativas que las hacen ideales para estos sistemas. [30]

Las condiciones ambientales juegan un papel fundamental en la eficiencia de estos sistemas. Factores como la temperatura, la intensidad de la luz y la concentración de CO₂ en el entorno son determinantes para la eficiencia de la fotosíntesis y, por ende, de la producción de energía. Por ejemplo, plantas como el maíz (*Zea mays*), que poseen el mecanismo fotosintético C₄, son altamente eficientes bajo condiciones de luz intensa y temperaturas elevadas, lo que las hace ideales para regiones cálidas o tropicales. La tecnología de biofotovoltaica busca optimizar estas variables en entornos controlados como invernaderos, mejorando la capacidad de las plantas para generar energía de manera constante. [30]

La tecnología de captura de electrones es otro componente crucial en la eficiencia de los sistemas biofotovoltaicos. Los electrodos utilizados en estos sistemas deben ser capaces de captar y transferir los electrones liberados durante la fotosíntesis de manera eficiente. El desarrollo de electrodos con una mayor capacidad de captación, junto con técnicas avanzadas de biocompatibilidad con organismos fotosintéticos, puede aumentar significativamente la cantidad de electricidad producida. A medida que esta tecnología evoluciona, se espera que la interfaz bio-electrónica entre los organismos fotosintéticos y los sistemas de recolección de electrones se optimice, mejorando el rendimiento general. [30]

Actualmente, los sistemas biofotovoltaicos están en fase de investigación, pero han demostrado un gran potencial. En estudios experimentales, plantas como cianobacterias y algas han generado pequeñas cantidades de electricidad de manera efectiva. En la Tabla 4, se observa el voltaje generado por cada planta, Si se continúa avanzando en la tecnología de captura y en el

manejo de las variables ambientales en entornos controlados, como los invernaderos, esta tecnología tiene el potencial de convertirse en una fuente sostenible y escalable de energía renovable en el futuro. [30]

Tabla 4. Tabla de Voltajes Estimados para Plantas en Sistemas Biofotovoltaicos

Planta/Organismo	Voltaje Generado (mV)
Chlamydomonas reinhardtii (Alga Verde)	150 - 250 mV
Synechocystis sp. (Cianobacteria)	200 - 300 mV
Arabidopsis thaliana (Planta C3)	100 - 180 mV
Zea mays (Maíz, Planta C4)	250 - 350 mV
Nephrolepis exaltata (Helecho Crespo)	300 - 400 mV
Opuntia ficus-indica (Cactus CAM)	80 - 120 mV

1.3.5 Datos estimados para el almacenamiento de energía

Se utiliza el **helecho crespo (Nephrolepis exaltata)** en un sistema biofotovoltaica: [31]

Área foliar efectiva (A): 0.5 m² (para una planta de tamaño promedio).

Tasa de fotosíntesis (P): 15 μmol e⁻ m⁻² s⁻¹ (valores típicos para plantas en condiciones de luz óptima).

Eficiencia de captura de electrones (E): 0.1 (suposición de que el 10% de los electrones generados son capturados).

Horas de luz por día (H): 10 horas (en un entorno controlado, como un invernadero con iluminación artificial).

Conversión de energía a electricidad (C): 0.000043 W por μmol e⁻.

a. Cálculo de la energía generada por día

Fórmula para calcular la energía generada en vatios(W) para una planta en un día: [32].

$$\text{Energía (W)} = 0.5\text{m}^2 \times 15\mu\text{mol e}^-/\text{m}^2/\text{s} \times 0.1 \times 10\text{h}/\text{día} \times 3600\text{s}/\text{h} \times 0.000043/\mu\text{mol e}^- \quad (1)$$

En la Ecuación 1, se reemplaza los valores obtenidos para realizar el cálculo correspondiente:

$$\text{Energía (W)} = 0.5 \times 15 \times 0.1 \times 10 \times 3600 \times 0.000043 \quad (2)$$

Se Resuelve la Ecuación 2 y obtenemos el valor de energía por día: [33]

$$\text{Energía (W)} = 1.161\text{W/día}$$

b. Interpretación de Resultados

Para una planta de helecho crespo con un área foliar de 0.5 m², se puede generar aproximadamente **1.16 vatios de energía eléctrica por día** en condiciones controladas y óptimas de luz [34].

- **Energía mensual:** Si consideramos 30 días de funcionamiento continuo, la planta generaría:

$$\text{Energía mensual (W)} = 1.161 \frac{\text{W}}{\text{día}} \times 30 \text{ días} = 34.83 \text{ W/mes}$$

- **Energía anual:** A lo largo de un año, una planta en un entorno controlado generaría aproximadamente:

$$\text{Energía anual (W)} = 1.161\text{W/día} \times 365\text{días} = 423.77\text{W/año}$$

Esto equivale a **0.423 kWh por año**.

e. Consideraciones y Posibles Mejoras

- **Aumento del área foliar:** Cultivar más plantas o utilizar especies con mayor superficie foliar aumentaría la generación de energía [35].
- **Aumento de la eficiencia de captura (E):** Mejorar los sistemas de captura de electrones (electrodos más eficientes) podría incrementar significativamente la energía generada. [35]
- **Optimización de las condiciones de luz (H):** Aumentar las horas de luz disponibles mediante iluminación artificial o mejorar la exposición a la luz solar natural incrementaría el rendimiento del sistema. [35]

En sistemas más avanzados con mayor eficiencia de captura de electrones (E) y condiciones óptimas de iluminación, la energía generada podría incrementarse notablemente, haciéndolos más competitivos en términos de producción energética. [35]

1.3.6 Comunicación inalámbrica

En la Figura 8, se observa la transmisión de información entre un emisor y receptor sin necesidad de cable, es decir utiliza las ondas electromagnéticas para la transmisión a distancia mediante dos elementos que conforman la comunicación inalámbrica. [36]

- **Transmisor o estación transmisora:**

Es el conjunto de elementos que tratan la señal de información y la adaptan para ser transmitida por el espacio mediante una antena. [36]

- **Receptor o estación receptora:**

Es el conjunto de elementos que recogen la señal de información y la adaptan para ser entendida. [36]

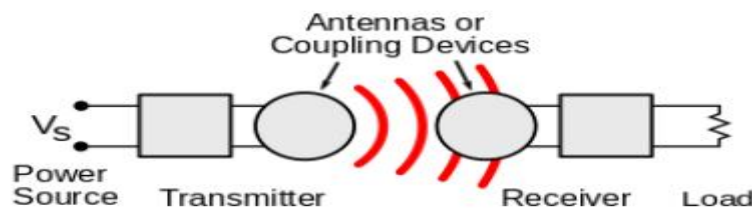


Figura 8. Transmisión inalámbrica de energía. [37]

En los últimos años, una de las tecnologías más innovadoras y debatidas ha sido la comunicación entre computadoras utilizando sistemas inalámbricos. El uso de ondas de radio o luz infrarroja para conectar dispositivos está siendo objeto de investigaciones intensivas. Dependiendo del diseño y las necesidades, se pueden emplear dos enfoques tecnológicos distintos.

- **Redes Inalámbricas**

Las redes inalámbricas son sin duda las redes de mayor crecimiento a nivel mundial por brindar movilidad a quipos e incrementar las distancias entre ellos, esto hace que el usuario pueda recibir o transmitir de lugares lejanos, estas redes sin embargo no son las más ideales, por lo que se necesita tener una red cableada conjuntamente con la inalámbrica es decir una red híbrida para mejorar su desempeño. [38]

Las redes inalámbricas se dividen en dos grupos como son:

a. De Larga Distancia.

Estas tecnologías se emplean para transmitir datos en áreas que pueden abarcar desde una sola ciudad hasta regiones vecinas, lo que se conoce como Redes de Área Metropolitana (MAN). Sin embargo, sus velocidades de transmisión suelen ser modestas, oscilando entre 4.8 y 19.2 Kbps.

b. De Corta Distancia.

Estas tecnologías se usan principalmente en redes corporativas cuyas oficinas están ubicadas en uno o varios edificios cercanos, con velocidades que van desde los 280 Kbps hasta los 2 Mbps.

Transferencia de energía inalámbrica

La transferencia de energía inalámbrica ha avanzado significativamente desde sus etapas iniciales, emergiendo como una solución viable para proporcionar energía y recargar dispositivos sin depender de conexiones físicas directas. Esta tecnología utiliza campos electromagnéticos para realizar la transmisión de energía desde una fuente hacia un receptor, empleando el aire como medio de transferencia, lo que elimina la necesidad de conectores y cables. En la Figura 9 se muestra una clasificación general de la transferencia de energía inalámbrica (WPT) según su método de transmisión. [39]

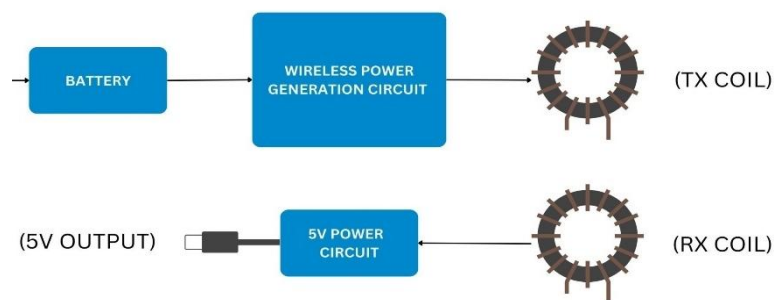


Figura 9. Diseño de la transferencia de energía inalámbrica WPT

c. Ventajas y desventajas de los sistemas inalámbricos de transferencia de energía

Los sistemas de transferencia de energía inalámbrica (WPT) presentan una variedad de ventajas y desventajas que deben ser evaluadas para su implementación. A continuación, se presenta un resumen de estas consideraciones en la Tabla 5.

Tabla 5. Ventajas y Desventajas del WPT

Ventajas	Desventajas
Comodidad: Elimina la necesidad de conexiones físicas.	Costo: Los sistemas de carga inalámbrica presentan costos iniciales más altos en comparación con cargadores por cable tradicionales.
Eficiencia económica: Disminuye la dependencia de componentes físicos y costos de mantenimiento.	Posicionamiento preciso: Requiere una colocación exacta del dispositivo sobre el cargador para una adecuada transferencia de energía.
Capacidad multi-dispositivos: Permite la carga simultánea de varios dispositivos.	Interferencias: Posibles interferencias con otros sistemas de comunicación debido al uso del espectro electromagnético.
Resistencia a entornos adversos: Garantiza robustez en condiciones extremas (humedad, suciedad, movimiento).	Sensibilidad al clima: La niebla y la lluvia pueden afectar las aplicaciones de WPT basadas en microondas y láser.
Diseño simplificado: Facilita el desarrollo de dispositivos herméticamente sellados.	Rango limitado: Técnicas como WPT capacitiva tienen un alcance restringido que afecta su viabilidad.
Alta eficiencia a corta distancia: En configuraciones óptimas, la eficiencia puede ser positiva.alta	Pérdida de eficiencia con la distancia: La eficiencia disminuye a medida que aumenta la distancia entre los dispositivos.

d. Transferencia de energía en campo lejano

La transferencia de energía inalámbrica en campo lejano utiliza ondas electromagnéticas en forma de señales de radiofrecuencia para permitir la transferencia de energía. Generalmente, esto se realiza a través de microondas (MPT) y láser (LPT). [40]

Transmisión de potencia por microondas (TPM)

Esta técnica se basa en un mecanismo de transferencia de energía inalámbrica mediante radiación electromagnética en el espectro de microondas. Tiene aplicaciones significativas en el sector aeronáutico, en particular para el suministro energético a UAV. Las ondas de radio son emitidas por antenas especializadas conectadas a dispositivos de microondas, desde un

transmisor hasta un receptor, donde la energía del campo eléctrico de la onda se convierte en energía utilizable para la carga. [41]

La TPM ofrece una alta capacidad de potencia transmitida y versatilidad en la transmisión y recepción de señales. Sin embargo, su eficacia de transmisión es limitada, no superando el 10%, y requiere transmisores de gran tamaño, lo que incrementa los costos asociados.

Transferencia de energía láser

La transmisión de energía mediante haces láser está ganando popularidad respecto a los métodos tradicionales que emplean antenas de gran tamaño, debido a su capacidad para transferir energía de manera eficiente a largas distancias. Esta técnica convierte energía eléctrica en luz láser concentrada, que se direcciona hacia un receptor, normalmente compuesto por paneles fotovoltaicos en satélites. La energía láser se transforma nuevamente en electricidad en el receptor para cargar baterías o alimentar motores, utilizando módulos rectificadores de alta eficiencia para minimizar las pérdidas de energía; sin embargo, esta técnica enfrenta la dificultad de requerir sistemas complejos de seguimiento debido al potencial riesgo de la radiación láser para seres vivos y el medio ambiente. [41]

e. Transferencia de energía en campo cercano

Un modelo convencional de transmisión de energía inalámbrica se compone de un transmisor y un receptor, donde la energía puede ser transferida a través de campos magnéticos o eléctricos. Dependiendo del caso, se emplean dos estrategias para la transferencia eléctrica: inducción (IPT) o capacitancia (CPT).

Transferencia de potencia inductiva (IPT)

La tecnología de transferencia de potencia inductiva (IPT) implica que, en el transmisor, un rectificador convierte el voltaje de AC a DC y un inversor lo regresa a AC. Esto es transmitido mediante un campo magnético generado por una bobina. En el receptor, la energía capturada por la bobina receptora se rectifica a corriente continua y se regula para su conexión a carga. La eficiencia disminuye con el aumento de la distancia entre el transmisor y el receptor debido al acoplamiento inductivo o magnético. [41]

Transferencia de potencia capacitiva

Esta técnica se basa en el acoplamiento capacitivo entre transmisor y receptor, actuando como electrodos de un condensador en forma de cubiertas metálicas. Aunque la tecnología CPT es más económica que la IPT, su principal desventaja es la necesidad de mantener una distancia muy corta entre el transmisor y el receptor. [41]

f. Ventajas y desventajas de los métodos de campo lejano y cercano

La tecnología de transferencia de energía inalámbrica (WPT) ha evolucionado considerablemente para ofrecer soluciones que abarcan desde la carga de dispositivos electrónicos hasta aplicaciones industriales y vehículos eléctricos. La Tabla 6 se presenta una comparación detallada entre los tipos de tecnologías WPT clasificadas en campo cercano y campo lejano. [42]

Cada tecnología presenta ventajas y desventajas específicas, abarcando desde la eficiencia en distancias cortas hasta la capacidad de transferir energía a largas distancias, junto con diversos niveles de complejidad y requisitos de implementación. Este análisis es esencial para determinar cuál tecnología es más adecuada para aplicaciones específicas, subrayando la importancia de factores como la eficiencia, la seguridad y la compatibilidad con el entorno. [42]

Tabla 6. Tabla comparativa de los métodos de campo lejano y cercano.

Tipo de campo	Tecnología WPT	Ventajas	Desventajas
Campo cercano	Capacitivo	Permite transferencia de energía de nivel medio. Puede transferir energía a través de objetos metálicos. Económico debido al uso de placas de aluminio. Funciona para distancias de hasta 10 cm.	La transferencia depende de la distancia. Problemas de capacitancia parásita. Eficiencia alrededor del 70-80%.
	Inductivo	Alta eficiencia en distancias cortas. Más seguro comparado con otros modos. Permite transferencia bidireccional. Fácil de implementar. Aislamiento galvánico.	Distancia corta (mm a cm). Requiere blindaje EMI. Baja eficiencia a distancias largas. Calentamiento con objetos metálicos cercanos. Alineación estricta entre transmisor y receptor.
	Resonante	Mayor potencia en comparación con otros métodos. Común en carga de vehículos eléctricos. Aislamiento galvánico. Permite transferencia bidireccional.	El costo aumenta con la potencia. Sensible a obstáculos entre bobinas. Requiere blindaje para EMI.
Campo lejano	Microondas	Capacidad para transferir energía a largas distancias (varios kilómetros). Permite transferencia dinámica a cargas en movimiento. Maneja varios kW. Compatible con sistemas de comunicación.	Menor eficiencia que otros métodos. Difícil implementación. Solo permite transferencia unidireccional. Antenas grandes para alta potencia.
	Láser	Transfiere energía a grandes distancias. Permite transferir energía a cargas móviles. Puede manejar varios kW. Transmisores pequeños en comparación.	Baja eficiencia (aproximadamente 20%) y depende de la distancia. Solo permite transferencia unidireccional. Difícil de operar. Obstáculos en el camino del haz son peligrosos para seres vivos.

g. Transferencia de Potencia Inductiva

La transferencia de energía por inducción (IPT) ha evolucionado de ser una novedad técnica a convertirse en una tecnología fundamental en diversas aplicaciones en menos de tres décadas. Desde su introducción en 1995, la IPT ha crecido hasta formar una industria que genera millones de dólares a nivel global. Esta tecnología facilita la transferencia de energía eléctrica a través del aire sin conexión física directa, utilizando campos magnéticos generados por bobinas de acoplamiento sintonizadas a una frecuencia específica para maximizar la eficiencia energética. [43]

Las aplicaciones de la IPT son diversas, abarcando desde la automatización de procesos industriales hasta la carga de dispositivos biomédicos y vehículos eléctricos, tanto en configuraciones estáticas como dinámicas en carreteras. Este avance tecnológico se fundamenta en los principios del electromagnetismo conocidos gracias a históricos pioneros como Ampère y Faraday, con mejoras significativas a través del desarrollo en técnicas de diseño magnético y control electrónico. [43]

Con el avance de la tecnología IPT, se están explorando aplicaciones cada vez más desafiantes que prometen revolucionar no solo la infraestructura de transporte, sino también la gestión y utilización de la energía eléctrica. A pesar de los retos técnicos persistentes, la IPT se perfila como una solución energética futurista que ofrece altos niveles de seguridad, eficiencia y automatización para una variedad de aplicaciones industriales y comerciales. [43]

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Implementar un sistema inalámbrico de energía por fotosíntesis con tecnología IoT, para el monitoreo de invernaderos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar la eficiencia de la generación de energía mediante procesos fotosintéticos en entornos controlados.
- Desarrollar un sistema de transmisión inalámbrica DC/AC, evaluando diversas alternativas en términos de eficiencia energética y costos.
- Integrar los componentes seleccionados en un sistema inalámbrico que combine la generación de energía fotosintética y la tecnología IoT para el monitoreo y gestión eficiente de invernaderos

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Para el desarrollo del proyecto, se seleccionó e implemento diversos equipos y materiales para la construcción del sistema de energía por fotosíntesis y la transmisión de energía inalámbrica. En la Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10, se realiza un desglose de cada equipo o material utilizado con sus características específicas por etapas.

Tabla 7. Materiales para la generación de energía inalámbrica.

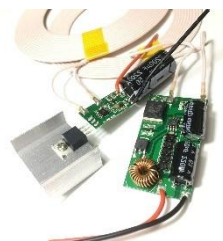
Materiales	Descripción	Imagen
Módulo B076GZ59HR	Taidacent Módulo de alfombrilla de carga inalámbrica de alta potencia de 12 V 2 A de 0.315 in a 0.709 in Módulo inductivo de bricolaje Módulo de cargador inalámbrico Kit de fuente de alimentación	
Batería Tattu 600 mA	Materias primas superiores de polímero de litio de Japón y Corea, cuenta con tecnología de apilamiento automático, su densidad energética es de hasta 200Wh/kg.	
Rectenna (Antena Rectificadora)	Las rectennas son altamente eficientes a la hora de convertir microondas en electricidad. En ensayos de laboratorio se vienen consiguiendo eficiencias de en torno al 90%.	
Sensor de voltaje INA219AIDR IC SMD	Sensor de Corriente shunt y monitor de potencia con interfaz I2C, bidireccional, tiene un voltaje de entrada de modo común de 0V. a 26V. Número de Canales: 1	

Tabla 8. Materiales para la obtención de energía.

Materiales	Descripción	Imagen
Integrado LM324N	Es un circuito integrado (CI) de 14 pines que internamente está compuesto de cuatro amplificadores operacionales de alta ganancia compensados por frecuencia interna independiente que está diseñado específicamente para operar desde una fuente de alimentación.	
Electrodos de Gel	Dispositivo que usa un gel para conducir la corriente eléctrica desde algún instrumento de medición.	
Capacitor cerámico de precisión	Condensador de valor fijo en el que el material cerámico actúa como dieléctrico. Está formado por dos o más capas alternadas de cerámica y una capa metálica que actúa como electrodos.	

Tabla 9. Materiales para la comunicación.

Materiales	Descripción	Imagen
LilyGo Lora32 915Mhz OLED	Tecnología ideal para conexiones a grandes distancias y para redes de IoT en las que se necesiten sensores que no dispongan de corriente eléctrica de red	
Raspberry Pi 4	Cuenta con la capacidad de manejar una pantalla a 4K a 60 Hz, o dos pantallas 4K a 30 Hz. Se ha incluido por primera vez USB 3.0.	

Tabla 10. Softwares empleados

Materiales	Descripción	Imagen
Servidor LAMP	Es un acrónimo del sistema operativo Linux, el servidor web Apache, el servidor de base de datos MySQL y el lenguaje de programación PHP.	
Arduino	Utilizado para la programación de los módulos ESP32-LoRa transmisor y receptor. De igual manera para captar los datos de los sensores.	
Eagle	Es un software de automatización del diseño electrónico (EDA) que permite a los diseñadores de placas de circuito impreso (PCB) conectar sin problemas los diagramas esquemáticos.	
Grafana	Plataforma de observabilidad gestionada y flexible, que integra métricas, logs y trazas con Grafana. Permite sacar partido del mejor software de observabilidad.	
Fusión 360	Es una plataforma CAD basada en la nube que constituye una alternativa muy capaz a otros líderes en la industria. Es fácil de usar y tiene todas las características que se pueden esperar de otros paquetes CAD populares.	
Proteus	Utilizado para simulación de los circuitos que intervienen en el transmisor y el receptor.	

2.2 Métodos

2.2.1 Modalidad de la investigación

El proyecto de investigación se contempló como una investigación aplicada, debido a que se pretende aplicar los conocimientos adquiridos en el transcurso de la formación académica para aplicarlos en el diseño e implementación de un sistema inalámbrico de energía por fotosíntesis con tecnología IoT, para el monitoreo de invernaderos.

La investigación bibliográfica necesaria para el proyecto de titulación se realizó investigando tesis, artículos de revistas, bases de datos, libros y revistas indexadas de distintas Universidades con el propósito de direccionar correctamente el proyecto de investigación, además de mejorar los trabajos ya realizados.

Esta investigación también contemplo la investigación de campo, puesto que mediante la implementación se puede evaluar el rendimiento del sistema para ver cómo influye en el monitoreo de los cultivos, dentro del invernadero.

Mediante el diseño del prototipo se utilizó la investigación de campo, debido a que los resultados fueron variables por lo que no se puede establecer un procedimiento definitivo y se tuvo que realizar validaciones mediante la técnica de prueba y error. El presente estudio ha identificado un problema que la sociedad actual presenta, es decir, el escaso desarrollo de la comunicación inalámbrica mediante fotosíntesis, por la escasez de aplicaciones que cumplan con los estándares. Para ello se ha planteo realizar una propuesta tecnológica que acople lo que dice con la práctica en el contexto científico ecuatoriano.

2.2.2 Recolección de información

La metodología empleada en esta investigación combinó una revisión bibliográfica exhaustiva con una fase experimental. La revisión bibliográfica se centró en la recopilación de información técnica sobre sistemas inalámbricos, energía por fotosíntesis y sistemas de monitoreo de invernaderos a partir de bases de datos científicas. Los datos experimentales obtenidos fueron utilizados para validar el modelo propuesto y ajustar los parámetros del prototipo desarrollado.

En la Tabla 11, se muestra el criterio de la recolección de información con su respectiva descripción.

Tabla 11. Recolección de Información.

Criterio	Descripción
¿Para qué?	Para mejorar la producción de cultivos.
¿De qué personas u objetos?	En los agricultores.
¿Como?	Monitoreo del cultivo.
¿Con qué?	Sistema inalámbrico por fotosíntesis con terminales IoT.
¿Cuándo?	En el periodo académico octubre-febrero 2025
¿Donde?	En la provincia de Tungurahua.

2.2.3 Procesamiento y análisis de datos

Con base a los datos obtenidos, se obtuvo el siguiente procedimiento:

- Análisis del funcionamiento y características de dispositivos para el monitoreo de invernaderos con IoT.
- Estudio de los sistemas inalámbricos mediante energía por fotosíntesis similares previamente realizados.
- Recopilación de información sobre las tecnologías de transferencia de energía inalámbrica.
- Pruebas de funcionamiento del almacenamiento de energía dentro del invernadero.
- Análisis de la obtención de los datos de la carga inalámbrica y su procesamiento.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Desarrollo de la propuesta

El monitoreo y control de invernaderos son esenciales para optimizar el crecimiento de los cultivos y reducir el consumo de recursos. Sin embargo, el mantenimiento de sistemas de sensores tradicionales implica un alto consumo energético y una dependencia de redes eléctricas o baterías externas, lo que puede resultar costoso.

El propósito principal del proyecto se centra en el avance tecnológico en áreas clave como la Internet de las Cosas (IoT) y la energía renovable. La convergencia de estos avances proporciona una oportunidad única para desarrollar un sistema innovador que aborde eficientemente los desafíos energéticos y de monitoreo en los invernaderos de manera sostenible.

3.1.1 Descripción del invernadero

El invernadero diseñado para la implementación de helechos debe contar con un área mínima de 120 m² (10 m de largo x 12 m de ancho) y una altura mínima de 3 m para permitir una adecuada ventilación y la instalación de sistemas IoT y de recolección de energía. Se recomiendan pasillos principales de 1.2 m de ancho y secundarios de 0.8 m para facilitar el acceso a las plantas y a los dispositivos de monitoreo. Las camas elevadas tendrán una altura de 0.8 m a 1 m, con un espaciado de 0.4 m a 0.6 m entre ellas.

El sistema de ventilación incluirá ventanas laterales de 1 m x 2 m y ventanas superiores de 2 m x 2 m. Las celdas biofotovoltaicas, de 15 cm x 15 cm por planta, estarán integradas en paneles verticales de 1.5 m x 1.8 m para maximizar la recolección de energía. Este diseño asegura un entorno controlado para optimizar la fotosíntesis y la eficiencia energética en el monitoreo del invernadero mediante tecnología IoT.



Figura 10. Modelo del Invernadero.

3.1.2 Distribución del sistema IOT

Una ilustración de la distribución de los tres tipos de estaciones se muestra en la Figura 11, donde se despliegan las estaciones de monitoreo internas, la estación de monitoreo externa y la estación de monitoreo portátil.

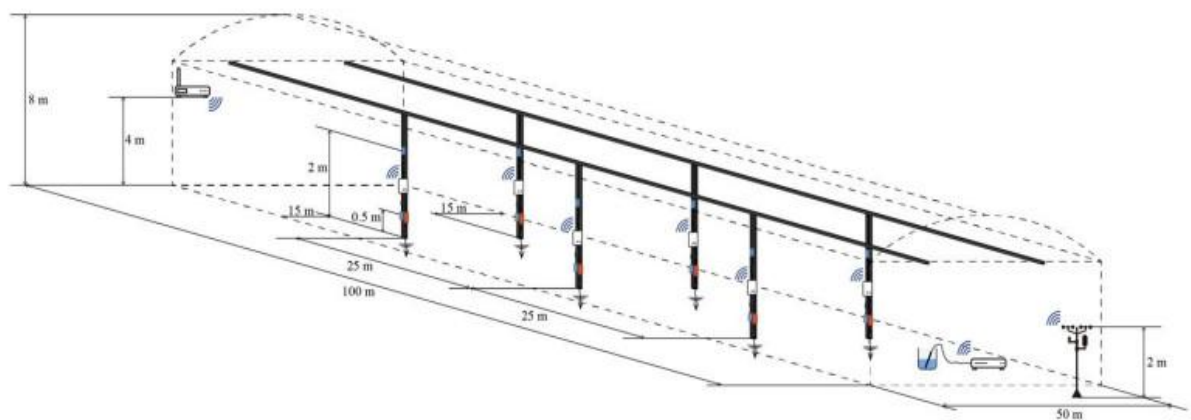


Figura 11. Distribución de las estaciones de medición en el invernadero.

Se colocaron múltiples estaciones de monitoreo a lo largo de un invernadero de 50 metros de ancho por 100 metros de largo (es decir, un área total de 5000 metros cuadrados). Las estaciones dentro del invernadero se distribuyeron uniformemente en puntos de medición ubicados a 25, 50 y 75 metros de los equipos de red. En cada punto de medición se colocaron dos estaciones de monitoreo internas con una separación de 20 metros entre ellas para medir temperatura, humedad relativa y humedad del suelo. También se implementó una estación de monitoreo externa para medir características del viento, precipitación y radiación. Para el caso de la

radiación, el sensor se colocó dentro del invernadero para conocer la cantidad de radiación que afecta a los cultivos. Finalmente, se ubicó una estación portátil para monitorear la CE y el pH del agua de riego a la entrada del invernadero. Esta estación se puede mover a cualquier parte del invernadero para que se puedan tomar muestras y registrarlas todos los días.

3.1.3 Sistema de carga mediante energía biofotovoltaica

El procedimiento estándar de recolección y uso de energía en un invernadero con helechos para un sistema de monitoreo basado en IoT implica varios pasos técnicos y precauciones específicas para asegurar la integridad de los componentes y la eficiencia del proceso de generación de energía biofotovoltaica.

Como se detalla en el análisis energético, los helechos del sistema biofotovoltaico generan una cantidad de energía a partir del proceso fotosintético, que es recogida mediante celdas biofotovoltaicas integradas en el sustrato y superficie de las plantas. Estas celdas están conectadas a un sistema central de almacenamiento, donde la energía se acumula en baterías especializadas. El proceso de captura y almacenamiento de energía requiere configuraciones precisas del sistema de IoT, que incluyen la calibración de los sensores de recolección de energía, los cuales miden la intensidad lumínica, humedad y otros parámetros ambientales que afectan la fotosíntesis.

El tiempo estimado para cargar completamente las baterías con energía generada por fotosíntesis dependerá de varios factores, como la intensidad de la luz solar disponible y la eficiencia del sistema fotosintético. Un tiempo aproximado de carga completa podría variar entre 5400 y 7200 segundos (entre 90 y 120 minutos), según la capacidad de generación en las condiciones actuales del invernadero. Durante este proceso, los sensores IoT monitorean constantemente los niveles de energía recolectada y el estado de las baterías.

Una vez que la energía ha sido recolectada y almacenada, el sistema de monitoreo del invernadero puede continuar con sus operaciones habituales, incluyendo la activación de dispositivos de control ambiental (temperatura, humedad y ventilación). El proceso de recarga de las baterías es continuo mientras los helechos están en condiciones óptimas de fotosíntesis.

Tabla 12. Comparación de Sistemas de Carga.

Comparación de Sistemas de Carga		
Aspecto	Sistema de Carga Tradicional	Sistema de Carga mediante Energía Biofotovoltaica
Fuente de energía	Electricidad proveniente de la red eléctrica (cargador especializado como la batería Tattu 600mA).	Energía generada por los helechos a través del proceso de fotosíntesis y recolectada por celdas biofotovoltaicas.
Medio de recolección	Conexión física a un cargador de baterías especializado.	Celdas biofotovoltaicas integradas en el invernadero, conectadas a un sistema de almacenamiento.
Tiempo estimado de carga	5540 segundos (aproximadamente 92 minutos).	Entre 5400 y 7200 segundos (90 a 120 minutos), dependiendo de la intensidad de luz y eficiencia del sistema.
Proceso de conexión	Desconexión manual de la batería, conexión al cargador especializado, ajuste de configuraciones (amperaje, voltaje).	Automatizado: la energía es recolectada de forma continua por el sistema biofotovoltaico. No requiere intervención manual.
Riesgo de daño en conectores	Existe riesgo de deterioro de conectores (tipo XT60) por conexión y desconexión repetida.	No hay riesgo de deterioro de conectores, ya que el sistema está diseñado para operar sin conexiones físicas repetidas.
Intervención humana	Se requiere desconectar, conectar y supervisar el proceso de carga manualmente.	Mínima: el sistema IoT gestiona automáticamente la recolección y distribución de energía.
Monitoreo del proceso de carga	Manual: es necesario vigilar los parámetros de carga (voltaje, amperaje) para evitar sobrecarga o daño.	Automatizado: sensores IoT monitorean en tiempo real el proceso y ajustan las condiciones ambientales del invernadero.
Costos operativos	Mayor, debido al consumo de electricidad y el desgaste de componentes.	Menores, al depender de una fuente de energía renovable y al requerir menos mantenimiento.
Fuente de energía sostenible	No, depende de la red eléctrica convencional.	Sí, completamente sostenible al utilizar energía generada por plantas mediante fotosíntesis.

3.1.4 Problemas identificados con el sistema de carga tradicional

El sistema de carga tradicional, que se emplea en numerosos dispositivos eléctricos y vehículos, enfrenta una serie de desafíos que afectan tanto su rendimiento como su seguridad y sostenibilidad. Estos problemas no solo ralentizan el proceso de carga, sino que también impactan la vida útil de los equipos y el uso eficiente de la energía. A continuación, se mencionan algunos de los inconvenientes más frecuentes que surgen con estos sistemas.

Dependencia de fuentes no renovables: El sistema tradicional utiliza electricidad de la red, lo que aumenta los costos operativos y no se alinea con las soluciones energéticas sostenibles.

Intervención manual frecuente: Requiere que se desconecten y reconecten las baterías manualmente, lo que aumenta el tiempo necesario para el mantenimiento y la carga.

Riesgo de daño en conectores: Los conectores tipo XT60, utilizados para las baterías, se deterioran con el uso repetido, generando costos de mantenimiento y riesgo de fallos operativos.

Monitoreo constante: Es necesario vigilar de forma manual los parámetros de carga (voltaje, amperaje), lo que aumenta la probabilidad de errores humanos y añade una carga adicional de trabajo.

Falta de automatización: La ausencia de un sistema automatizado para la gestión de la carga y el monitoreo implica mayor esfuerzo operativo y recursos adicionales para asegurar la correcta recarga de las baterías.

3.1.5 Esquema general del sistema

El diseño del sistema para el monitoreo de invernaderos mediante energía biofotovoltaica y tecnología IoT se estructura en tres etapas: obtención de energía y carga inalámbrica, donde la energía es generada a partir de la fotosíntesis de los helechos y transferida sin necesidad de contacto físico a las unidades de almacenamiento; sensorización y comunicación, que permite la recolección de datos ambientales (como temperatura, humedad y niveles de luz) y su transmisión en tiempo real a través de la red IoT; y almacenamiento y visualización de datos, que posibilita el análisis de la información recopilada, facilitando la interpretación de los parámetros clave para optimizar el control ambiental y el rendimiento energético del invernadero. En la Tabla 13, se presenta el esquema general del sistema organizado por estas etapas, destacando la integración funcional y la secuencia operativa del sistema.

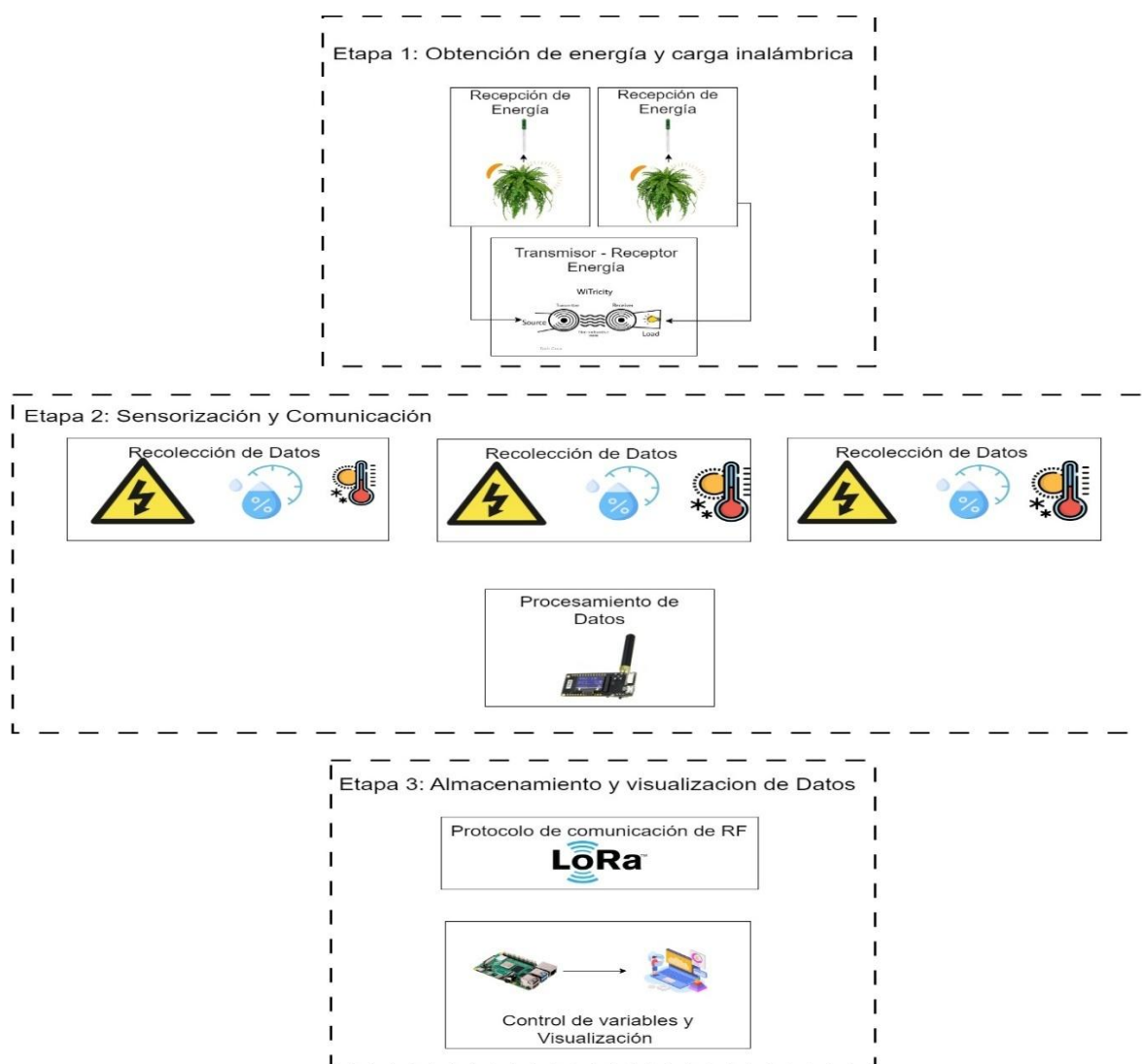


Figura 12. Esquema general del sistema

a. Etapa 1: Obtención de energía y carga inalámbrica

La obtención de energía en el sistema propuesto se fundamenta en el uso del helecho crespado (*Nephrolepis exaltata*) como fuente renovable. Este helecho se caracteriza por su alta eficiencia en la conversión de la luz solar en energía química mediante la fotosíntesis, lo que permite almacenar energía en forma de glucosa. Para maximizar esta conversión, se implementan paneles fotovoltaicos que capturan la radiación solar, transformando la energía lumínica en corriente eléctrica. La integración de tecnología IoT permite la recolección de datos en tiempo real sobre la producción de energía y las condiciones ambientales, optimizando el rendimiento del sistema.

El módulo receptor, que incluye una bobina secundaria, capta el campo magnético generado por el transmisor. Esta bobina convierte la energía magnética en corriente directa, la cual es regulada a 12 voltios mediante un circuito de regulación. La energía resultante se utiliza para alimentar el sistema de monitoreo del invernadero, garantizando un suministro constante y eficiente. Este enfoque no solo promueve la sostenibilidad mediante el uso de fuentes renovables, sino que también mejora el rendimiento y la autonomía del sistema de monitoreo en invernaderos.

b. Etapa 2: Sensorización y comunicación

La segunda etapa del sistema se centra en la sensorización del ambiente del invernadero, lo cual es esencial para la recolección de datos precisos sobre las condiciones climáticas y el estado de las plantas. Se instalan diversos sensores, incluyendo sensores de temperatura, humedad, luz y CO₂, que permiten monitorear en tiempo real los parámetros ambientales. Estos dispositivos están diseñados para operar con bajo consumo energético, aprovechando la energía obtenida del sistema de carga inalámbrica. Cada sensor está conectado a un microcontrolador que procesa la información y la prepara para su transmisión.

La comunicación de datos se lleva a cabo mediante un protocolo de comunicación IoT que permite la transmisión eficiente de la información recolectada. Se utilizan tecnologías como LoRa (Long Range) o Zigbee, que son adecuadas para aplicaciones de bajo consumo y permiten la comunicación a larga distancia entre los sensores y la estación central de monitoreo. El microcontrolador también implementa algoritmos de compresión de datos para optimizar el uso del ancho de banda y asegurar que los datos sean enviados de manera efectiva sin saturar la red.

La integración de la sensoria con la tecnología IoT no solo mejora la eficiencia del sistema, sino que también promueve prácticas agrícolas más sostenibles, optimizando el uso de recursos y maximizando la productividad de los cultivos.

c. Etapa 3: Almacenamiento y visualización de datos

La tercera etapa del sistema se enfoca en el almacenamiento y visualización de los datos recopilados a través de la sensoría instalada en el invernadero. Los datos ambientales, como temperatura, humedad, niveles de luz y concentración de CO₂, son enviados en tiempo real a una base de datos en la nube. Esta base de datos, diseñada para manejar grandes volúmenes de información, utiliza sistemas de gestión de bases de datos como MySQL o MongoDB, asegurando que la información sea almacenada de manera eficiente y accesible para análisis posteriores.

La visualización de los datos se realiza a través de un panel de control interactivo accesible por medio de una interfaz web o aplicación móvil. Esta plataforma permite a los usuarios monitorear las condiciones del invernadero en tiempo real, mostrando gráficos, alertas y recomendaciones basadas en los datos recopilados. La capacidad de visualizar la información de manera clara y concisa facilita la toma de decisiones informadas y oportunas, mejorando la eficiencia operativa y promoviendo prácticas agrícolas sostenibles en el manejo del invernadero.

3.2 Etapa 1: Obtención de energía y carga inalámbrica

Se llevó a cabo un análisis de los distintos componentes de hardware que integran el sistema de carga inalámbrica. Por lo cual, se elaboraron tablas comparativas que permitieron evaluar las características técnicas de cada dispositivo. En Figura 13, se muestra la Etapa 1, este diagrama facilitó la identificación y selección de los componentes que ofrecen las mejores especificaciones técnicas, optimizando así el rendimiento y la eficiencia del sistema desarrollado.

3.2.1 Selección de tecnologías del sistema

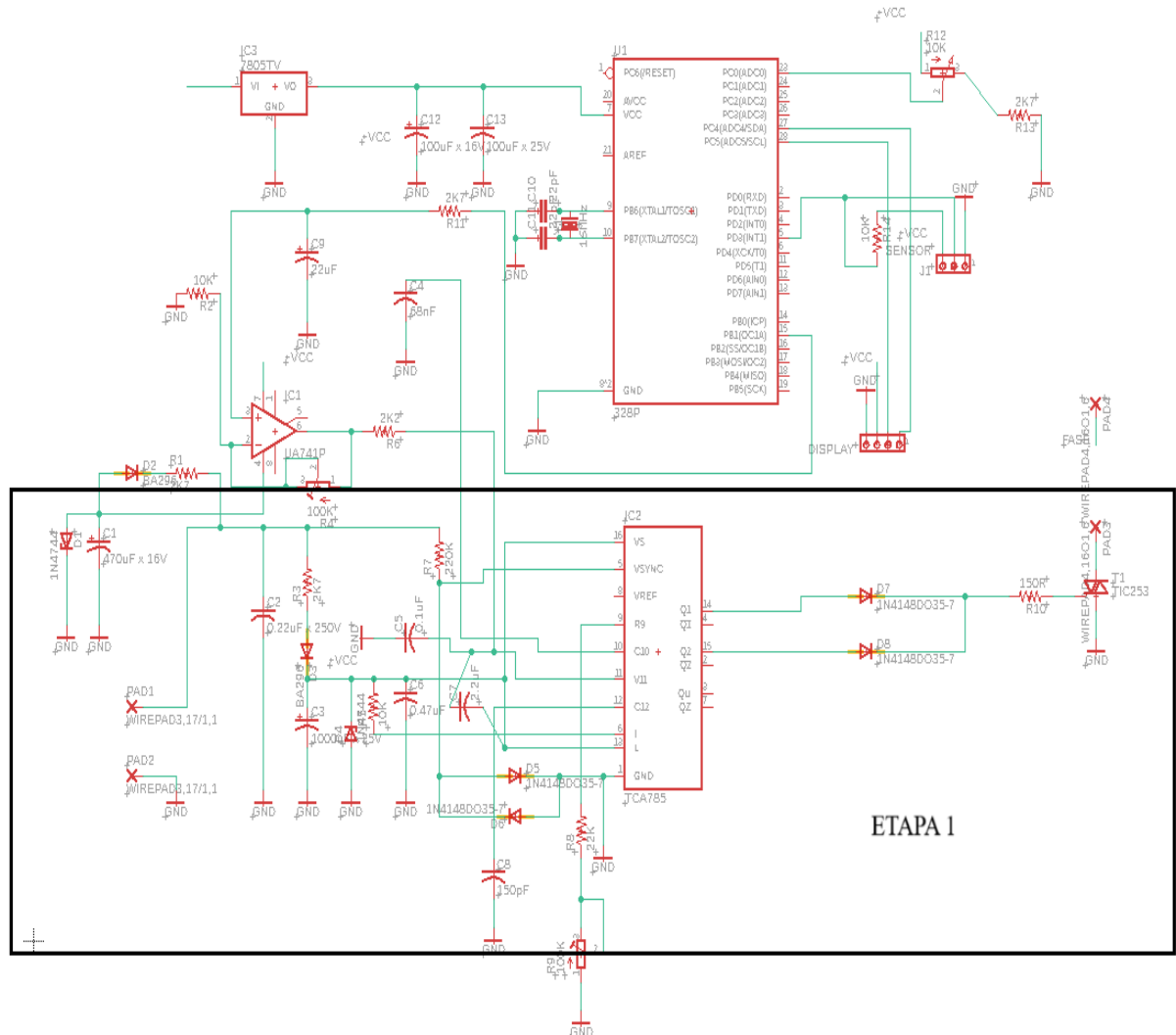


Figura 13. Diagrama de Obtención de Energía - Etapa 1

a. Módulo transmisor y receptor de carga inalámbrica

Los módulos de transferencia de energía inductiva son el componente principal de la estación de carga inalámbrica. El módulo transmisor se encarga de generar una señal de corriente Directa AC a 144 KHz para que la energía sea transmitida por un campo magnético al receptor, este se encarga de captar la energía y regularla a la salida en energía de corriente continua (DC). En la Tabla 13, se describe los módulos transmisor y receptor de la carga inalámbrica utilizados.

Tabla 13. Módulos de transmisión y recepción inalámbrica

Módulo	Detalle	Ilustración
Transmisor	Voltaje de entrada: 24V Corriente de entrada: Máx 3A Dimensiones: 16.99 mm x 29.99 mm Frecuencia de operación en la bobina: 144 KHz	
Receptor	Voltaje de salida: 12V Corriente de salida: Máx 3A Potencia máxima de salida: 36 W Dimensiones: 29.99 mm x 54.00 mm Frecuencia de operación en la bobina: 144 KHz	

b. Balanceador de LiPo

En el mercado existe una gran diversidad de cargadores de batería de tipo LiPo con la característica de que se encargan de balancear la carga para un mayor tiempo de vida de la batería y el cuidado de cada celda que la conforma. En la Tabla 14, se muestra una comparación de tres distintos balanceadores de carga para baterías LiPo con capacidad para distintos números de celda.

Tabla 14. Balanceador de carga en la batería Tattu 600 mA

Características		Modelo
Marca	Spektrum	
Composición de las celdas de la batería	Polímero de Litio	
Usos Recomendados Para Producto	Superficie	
Recuento de unidades	1.0 Conteo	

Para carga de manera eficiente la batería se seleccionó el cargador balanceador modelo Spektrum, debido a que presenta las características requeridas para una carga balanceada de los baterías previamente seleccionados. Su estructura de plástico es ideal debido a que de esta forma no genera pérdidas en el campo magnético generado en la transferencia de energía inductiva. Su menor peso y tamaño en comparación con los otros balanceadores es ideal para no generar inestabilidad y necesitar un menor espacio para su instalación en la estructura.

3.3 Etapa 2: Sensorización y comunicación

En la Figura 14, se detalla el sistema de sensorización y comunicación el cual, permitirá el procesamiento de datos en tiempo real.

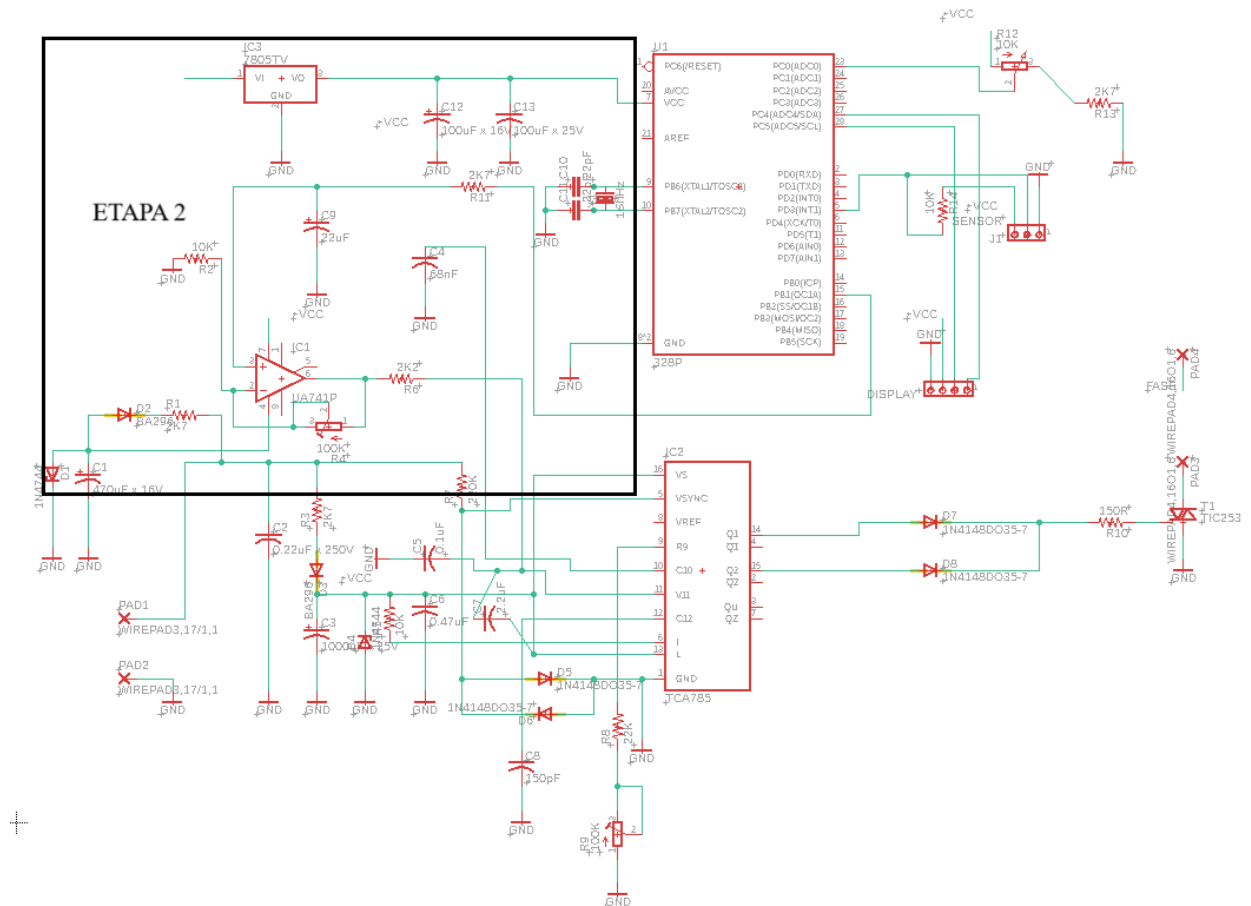


Figura 14. Diagrama de Sensorización y Comunicación - Etapa 2

a. Tarjeta de adquisición de datos

Para la adquisición de datos se realizó un análisis de distintos módulos de a los que se pueden conectar sensores. El módulo más utilizado es LilyGo LoRa32 915Mhz. En la Tabla 15 se presenta las características del módulo seleccionado.

Tabla 15. Comparación entre módulos de comunicación.

Características	LILYGO LoRa32 915 Mhz
	
MCU	ESP32
Destello	4 MB
Chip de serie	CH9102
Protocolo inalámbrico	Wi-Fi + Bluetooth 4.2
Apoyo	Ranura para tarjeta TF
Antena	Antena LoRa: Admite antena externa Lora, pero necesita resistencia de salto

Debido a su antena Wi-Fi para conexión inalámbrica y la gran cantidad de pines que cuenta, es el módulo ideal para la obtención de datos de los sensores que se encuentran en la estación de carga y la utilización del protocolo MQTT para su publicación en el servidor Grafana de forma directa.

b. Microcomputadora para el servidor

Para el servidor fue necesario seleccionar una microcomputadora que admita la instalación del sistema operativo Linux. Entre las opciones consideradas se tiene a la Raspberry pi 4, ODROID-C4 y Banana Pi M4 son las opciones más populares que difieren en característica sus capacidades, cada una de estas cuentan con sus propias ventajas para la configuración del servidor. En la Tabla 16, se muestra una comparación entre las microcomputadoras mencionadas anteriormente.

Tabla 16. Microcomputadora Raspberry Pi 4

Características	Raspberry Pi 4
	
Procesador	Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 1.5GHz
RAM	2GB, 4GB o 8GB LPDDR4
Conectividad	Gigabit Ethernet, Wi-Fi, 802.11ac, Bluetooth 5.0
Almacenamiento	Tarjeta microSD
Salida de video	2x micro HDMI, hasta 4K 60Hz
Precio aproximado	\$35 – \$75 USD
Uso recomendado	Proyectos generales de IoT, centros de multimedia, aprendizaje de programación

En el contexto de configurar un servidor LAMP, la Raspberry Pi 4 es la opción destacada gracias a su robusto soporte de hardware, flexibilidad en la configuración de la memoria RAM, presencia de un procesador capaz, se adapta excepcionalmente bien para manejar las cargas de trabajo de un servidor web. Una de las ventajas más significativas de la Raspberry Pi 4 es su compatibilidad con Raspberry Pi OS, un sistema operativo basado en Debian optimizado específicamente para la Raspberry Pi.

Este sistema operativo no solo asegura una integración fluida con el hardware, sino que también ofrece un entorno estable y seguro para ejecutar un servidor LAMP.

c. Comunicación entre sensores y servidor

Para el sistema de comunicación entre los sensores y el servidor se realizó una tabla comparativa de módulos existentes en el mercado. La Tabla 17 muestra una comparativa entre módulo ESP32, 3DR y LoRa.

Tabla 17. Tabla de los módulos de telemetría

Características	ESP32	LoRa
		
Frecuencia de operación	2.4 GHz	433 MHz / 868 MHz / 915 MHz
Protocolo de comunicación	Wi-Fi, Bluetooth, UART	LoRaWAN, LoRa
Rango de alcance	Hasta 200 m	Hasta 15 – 20 Km (en función del entorno)
Velocidad	Hasta 150 Mbps	0.3 – 50 kbps
Consumo de energía	160 – 240 mA	10 – 30 mA
Integración con drones	Alta flexibilidad (DIY)	Moderada
Precio	\$5 - \$10	\$25 - \$35
Facilidad de uso	Moderada (requiere programación)	Moderada (requiere configuración)

d. Software para el sistema de carga inalámbrica

Se realizó una selección del software adecuado para el cumplimiento del proyecto. Se desarrolló simulación de circuitos electrónicos, comportamiento de flujo de campo magnético, programación de dispositivos de comunicación, tratamiento de señales y, finalmente, los requerimientos necesarios para su posterior publicación en un dashboard.

e. Servidor LAMP

El servidor LAMP se utilizó para el almacenamiento, procesamiento y publicación de los datos proporcionados por la estación de carga. Este servidor está compuesto por un sistema operativo basado en Linux, un servicio web de Apache, una base de datos MySQL y lenguajes de programación como PHP, Python o Perl. Se empleó el protocolo MQTT para la publicación de los datos en tiempo real.

3.4 Etapa 3: Almacenamiento y visualización de datos

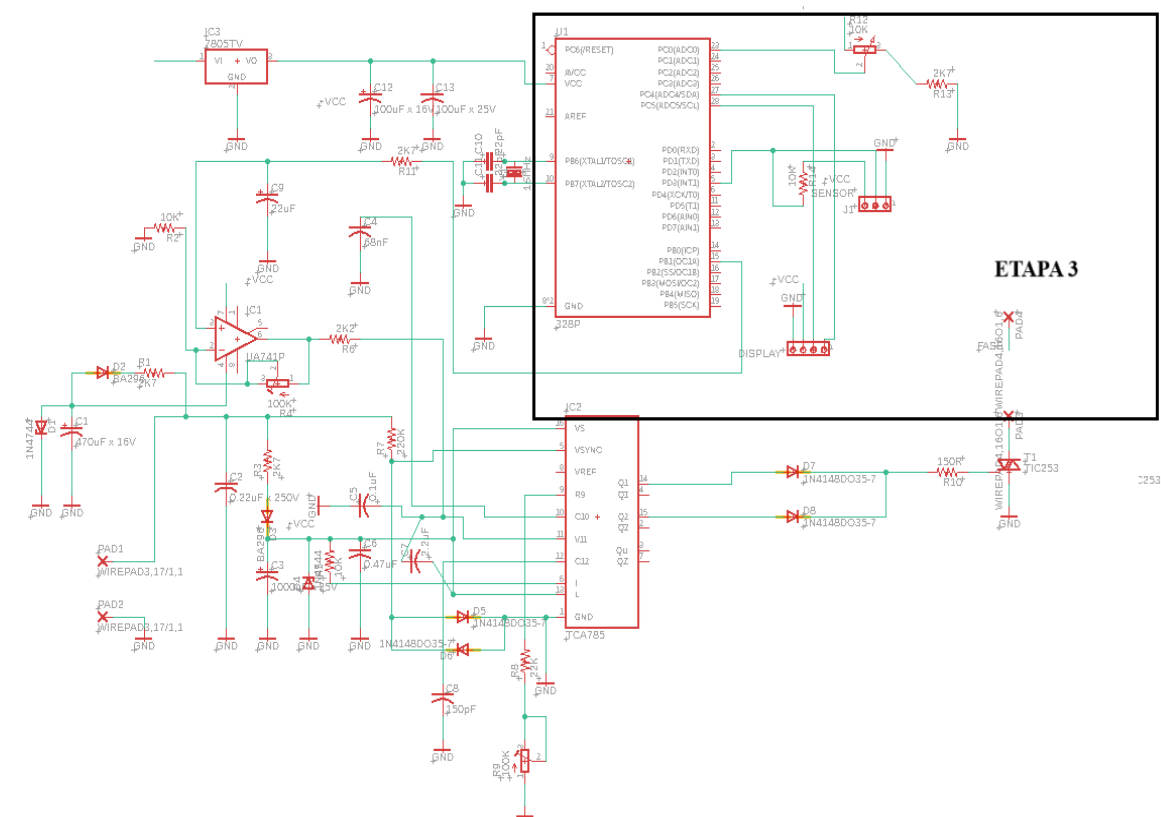


Figura 15. Diagrama de Almacenamiento y visualización de datos - Etapa 3

3.4.1 Definición de la Base de Datos

La base de datos del sistema es un conjunto organizado de datos que se utiliza para almacenar y gestionar la información recolectada por los sensores instalados en el invernadero. Esta base de datos está estructurada para incluir diversas tablas que reflejan los diferentes aspectos del monitoreo y la gestión del invernadero. Entre las tablas más relevantes se encuentran:

Tabla de Sensores: Almacena información sobre cada sensor, incluyendo un identificador único, tipo de sensor, ubicación dentro del invernadero y su estado operativo.

Tabla de Datos de Sensores: Registra las lecturas de cada sensor en tiempo real, incluyendo el ID del sensor, el valor medido (como temperatura, humedad, luminosidad, etc.), la unidad de medida y la fecha y hora de la lectura.

Tabla de Energía Generada: Contiene registros de la energía producida a través del proceso de fotosíntesis, incluyendo el ID del sensor que mide la producción de energía, los valores generados y la unidad de medida.

Tabla de Alertas y Notificaciones: Guarda los eventos que requieren atención, tales como condiciones ambientales fuera de rango, fallas en los sensores o alertas sobre la producción de energía.

Tabla de Usuarios: Si se requiere autenticación y gestión de accesos, esta tabla almacena la información de los usuarios que pueden interactuar con el sistema, incluyendo credenciales y roles.

a. Características de la Base de Datos

Estructura Relacional: La base de datos puede estar basada en un sistema de gestión de bases de datos relacional (RDBMS) como MySQL o PostgreSQL, lo que permite definir relaciones entre las tablas y realizar consultas complejas.

Escalabilidad: La base de datos está diseñada para manejar un aumento en el volumen de datos a medida que se añaden más sensores o se generan más datos de monitoreo.

Integración con MQTT: Se implementa una conexión entre el broker MQTT y la base de datos para permitir el almacenamiento automático y en tiempo real de los datos enviados por los sensores.

Accesibilidad: La base de datos se configura para ser accesible desde un dashboard o una interfaz de usuario, donde se pueden visualizar y analizar los datos recolectados de manera intuitiva.

3.4.2 Propósito de la Base de Datos

El propósito de la base de datos se articula en varios objetivos técnicos fundamentales. Uno de los objetivos primordiales es proporcionar un almacenamiento estructurado y organizado de todos los datos recolectados por los sensores del invernadero. Esta base de datos incluye lecturas de temperatura, humedad, luminosidad y niveles de energía generada, garantizando que la información esté fácilmente accesible y recuperable para su análisis posterior.

Adicionalmente, la base de datos está diseñada para integrarse con el protocolo MQTT, lo que permite la recepción en tiempo real de datos publicados por los sensores. Esta capacidad de integración es esencial para el monitoreo continuo de las condiciones ambientales y de producción de energía, lo cual es crucial para una gestión eficiente del invernadero. Gracias a esta funcionalidad, los usuarios pueden obtener datos actualizados que facilitan la toma de decisiones inmediatas.

Por último, la base de datos está concebida para ser escalable, lo que permite la incorporación de nuevos sensores y datos sin comprometer el rendimiento del sistema. Se establece una estructura que facilita tanto el mantenimiento como la actualización de los sistemas de gestión de la base de datos. En resumen, la base de datos desempeña un papel crucial al facilitar la organización, el análisis y la utilización efectiva de los datos relacionados con el monitoreo de invernaderos, contribuyendo a mejorar la eficiencia operativa y optimizar la producción de energía a través de la fotosíntesis en un entorno controlado.

3.4.3 Estructura de la Base de Datos

La estructura de la base de datos está diseñada para organizar de manera eficiente la información recolectada por los sensores instalados en el invernadero. Esta estructura incluye varias tablas interrelacionadas que permiten una gestión efectiva de los datos. Las tablas principales son: Tabla de Sensores, que almacena información sobre cada sensor, incluyendo un identificador único, tipo de sensor, ubicación y estado operativo; Tabla de Datos de Sensores, que registra las lecturas de cada sensor en tiempo real, incluyendo el ID del sensor, el valor medido, la unidad de medida y la fecha y hora de la lectura; Tabla de Energía Generada, que contiene registros sobre la producción de energía mediante fotosíntesis; Tabla de Alertas y Notificaciones, que guarda eventos que requieren atención, como condiciones ambientales fuera de rango; y Tabla de Usuarios, que gestiona la información de los usuarios con acceso al sistema. En la Tabla 18, se puede observar las variables necesarias para el monitoreo continuo del invernadero.

a. Pasos para cumplir con la Estructura de la Base de Datos

Definición de Requerimientos: Establecer los requerimientos del sistema, incluyendo los tipos de datos que se necesitan recolectar y cómo se relacionarán entre sí.

Diseño de la Base de Datos: Crear un modelo de datos que incluya todas las tablas necesarias, sus atributos y las relaciones entre ellas. Esto puede realizarse utilizando diagramas entidad-relación (ER).

Selección del Sistema de Gestión de Bases de Datos (DBMS): Elegir un DBMS adecuado (como MySQL o PostgreSQL) que soporte la estructura relacional y satisfaga las necesidades del proyecto.

Creación de Tablas: Implementar las tablas en el DBMS según el diseño previamente definido, asegurándose de establecer las claves primarias y foráneas para mantener la integridad referencial.

Configuración de la Conexión: Establecer una conexión entre la base de datos y los dispositivos de sensores utilizando una biblioteca de conexión adecuada para la tecnología elegida (por ejemplo, Paho MQTT para la comunicación).

Desarrollo de Scripts de Inserción: Crear scripts o funciones que faciliten la inserción de datos en las tablas correspondientes cuando los sensores publiquen nuevos datos.

Implementación de Consultas: Desarrollar consultas SQL que permitan extraer y analizar la información almacenada en la base de datos para su posterior visualización y toma de decisiones.

Pruebas de Funcionalidad: Realizar pruebas para verificar que la base de datos se llena correctamente con los datos de los sensores y que las consultas retornan la información esperada.

Tabla 18. Variables para la base de datos.

		Tipo de Dato	Descripción	Clave
Planta	id_planta	INT	Identificador único de cada planta.	PK
	nombre	VARCHAR	Nombre de la planta.	
	tipo	VARCHAR	Tipo de planta (por ejemplo, helecho).	
	ubicacion	VARCHAR	Ubicación específica de la planta en el invernadero.	
	fecha_plantacion	DATE	Fecha en la que se plantó la planta.	
Sensor	id_sensor	INT	Identificador único del sensor.	PK
	tipo_sensor	VARCHAR	Tipo de sensor (humedad, temperatura, voltaje, etc.).	
	modelo	VARCHAR	Modelo del sensor.	
	ubicacion	VARCHAR	Ubicación del sensor en el invernadero.	
Mediciones	id_medicion	INT	Identificador único de la medición.	PK
	id_planta	INT	Referencia a la planta que se está midiendo.	FK -> Planta
	id_sensor	INT	Referencia al sensor que realiza la medición.	FK -> Sensor
	fecha_hora	DATETIME	Fecha y hora de la medición.	
Invernadero	id_invernadero	INT	Identificador único del invernadero.	PK
	ubicacion	VARCHAR	Ubicación geográfica del invernadero.	
	tamaño	FLOAT	Tamaño en m ² del invernadero.	
Energía_Generada	id_energia	INT	Identificador único del registro de energía.	PK
	id_planta	INT	Referencia a la planta que generó la energía.	FK -> Planta
	corriente	FLOAT	Corriente generada por la planta.	
	fecha_hora	DATETIME	Fecha y hora de la generación de energía.	
Batería	id_bateria	INT	Identificador único de la batería.	PK
	capacidad	FLOAT	Capacidad de almacenamiento en mAh de la batería.	
	tipo	VARCHAR	Tipo de batería (iones de litio, supercondensador, etc.).	
	estado	VARCHAR	Estado actual de la batería (cargada, descargada, etc.).	
Usuario	id_usuario	INT	Identificador único del usuario.	PK
	nombre	VARCHAR	Nombre del usuario.	

b. Relaciones entre Tablas

La Tabla 18 presentada organiza y gestiona información clave sobre las plantas, los sensores y otros sistemas en un invernadero. Cada sección de la tabla tiene un propósito específico, y todos estos elementos están interconectados de manera que permiten un seguimiento completo de lo que sucede en el entorno. A continuación, se explica cómo se relacionan los diferentes datos y cómo interactúan entre sí.

Sensor - Mediciones: Un sensor es capaz de realizar diversas mediciones en distintas plantas, capturando datos variables y específicos para cada una, lo cual contribuye a un análisis más profundo de las condiciones de cultivo.

Invernadero - Planta: Un invernadero alberga múltiples plantas, cada una de las cuales puede monitorearse y gestionarse de manera independiente o en conjunto, según los requerimientos de control ambiental.

Planta - Energía_Generada: Una planta puede generar varios registros de energía en distintos momentos. Esta generación de energía es monitoreada y registrada, permitiendo el análisis de patrones energéticos y su aprovechamiento en el sistema.

Usuario - Mediciones: Los usuarios del sistema pueden acceder a múltiples registros de mediciones. Este acceso es fundamental para la supervisión, análisis y toma de decisiones en el mantenimiento del invernadero.

Batería - Invernadero: Varias baterías pueden estar asociadas a un único invernadero para proporcionar almacenamiento centralizado de energía. Esto asegura un suministro continuo y regulado para los componentes eléctricos del sistema, incluso durante fluctuaciones de la generación de energía.

3.4.4 Procesamiento y análisis de los Datos

El procesamiento y análisis de los datos constituye una etapa fundamental para convertir la información bruta obtenida de los sensores en datos útiles que apoyen la toma de decisiones. Este proceso se descompone en varias fases técnicas que garantizan la calidad y aplicabilidad de los datos.

Inicialmente, los datos son recolectados en tiempo real mediante sensores instalados en el invernadero, que monitorean parámetros ambientales como temperatura, humedad y luminosidad. Esta información se transmite a través del protocolo MQTT y se almacena en la base de datos. En esta fase de recolección, es crítico implementar validaciones para asegurar la precisión de los datos, lo cual puede incluir la detección de valores atípicos (outliers) y la corrección de lecturas anómalas antes de que sean almacenadas.

Una vez que los datos han sido almacenados, se inicia la fase de procesamiento de datos. Este proceso incluye la limpieza, normalización y transformación de los datos en formatos adecuados para el análisis. Durante esta etapa, se eliminan registros duplicados, se realizan conversiones de unidades de medida y se agregan datos para crear resúmenes temporales, como promedios diarios de temperatura o humedad. Este proceso es esencial para asegurar que los datos sean consistentes y comparables, lo que facilitará análisis posteriores.

A continuación, se lleva a cabo el análisis de datos, donde se aplican métodos estadísticos y algoritmos de análisis para extraer información relevante. Esta fase puede involucrar la implementación de modelos de regresión para evaluar relaciones entre variables, el análisis de series temporales para identificar tendencias en las condiciones ambientales, y la utilización de técnicas de aprendizaje automático (machine learning) para prever eventos futuros, como la necesidad de riego o la eficiencia en la producción de energía a través de fotosíntesis.

La visualización de datos es un componente crítico en esta etapa, permitiendo la representación gráfica de la información analizada. Se pueden utilizar herramientas como Tableau o bibliotecas en Python, como Matplotlib y Seaborn, para generar dashboards interactivos que presenten gráficos y tablas con los datos procesados. Esto facilita a los usuarios la identificación de patrones y la interpretación de resultados, contribuyendo así a la toma de decisiones informadas.

Finalmente, el análisis de datos culmina en la generación de informes y alertas automáticas. Los informes pueden contener resúmenes sobre el rendimiento del invernadero, recomendaciones para la optimización de recursos y notificaciones sobre condiciones críticas, como temperaturas extremas o niveles de humedad que requieren atención inmediata. Este ciclo de procesamiento y análisis de datos no solo asegura la recolección de información valiosa, sino que también potencia la eficiencia en la gestión del invernadero y mejora el aprovechamiento de la energía generada mediante el proceso de fotosíntesis.

a. Configuración de los recursos de datos en Grafana

Con acceso al servicio Grafana se realizó la configuración del dashboard para la visualización de datos, para la presentación se asignó las fuentes de información que son la base de datos de MySQL y el protocolo MQTT. La configuración para el acceso a la base de datos de MySQL se presenta en la Figura 16.

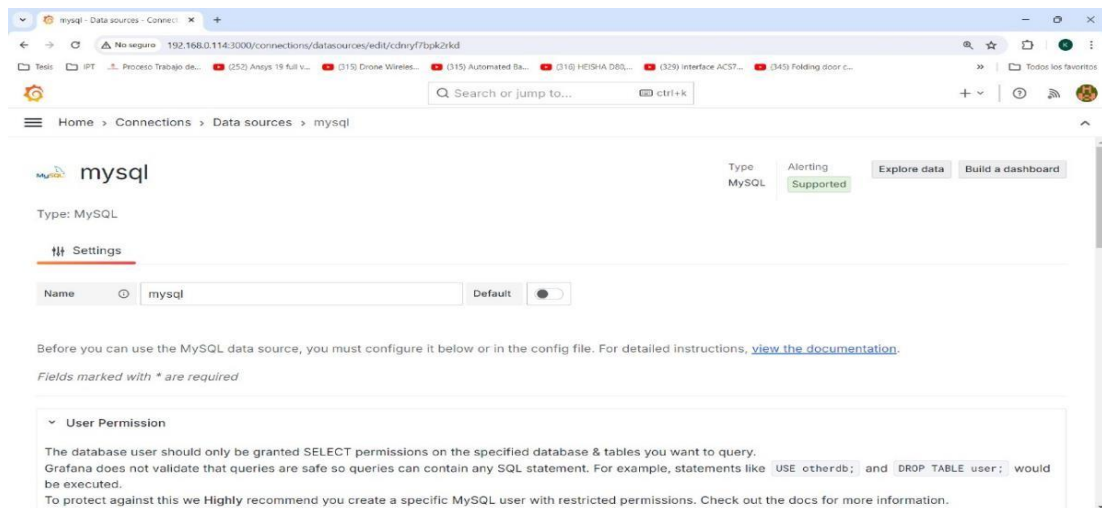


Figura 16. Configuración de MySQL en Grafana

Del mismo modo se realizó para el protocolo MQTT en la Figura 17.

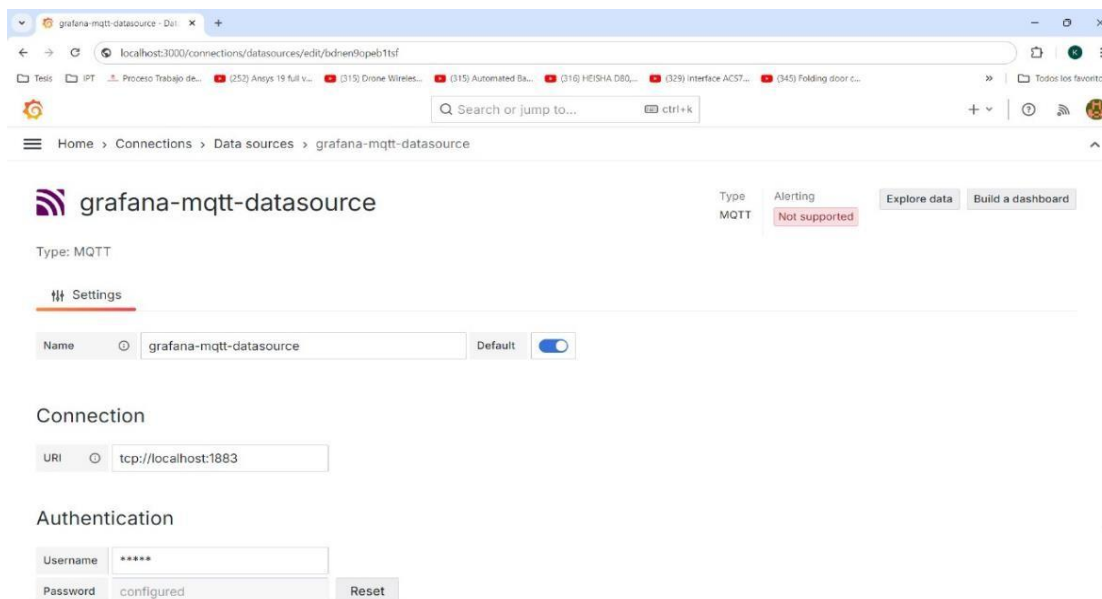


Figura 17. Configuración del protocolo MQTT en Grafana

b. Adquisición de datos en el dashboard

La integración de gráficas en el dashboard se realizó como se presenta en la Figura 18, con la asignación del gráfico específico a mostrar y seleccionando el recurso de datos específico, en este caso el protocolo MQTT con su respectivo tópico y el tiempo de actualización y presentación de los datos.



Figura 18. Configuración para la presentación de datos en el dashboard

c. Interfaz de visualización final

En la Figura 19, los datos obtenidos de la estación de carga se muestran en el dashboard de visualización en Grafana para la presentación de la información.



Figura 19. Interfaz de visualización final.

3.5 Diagrama Electrónico

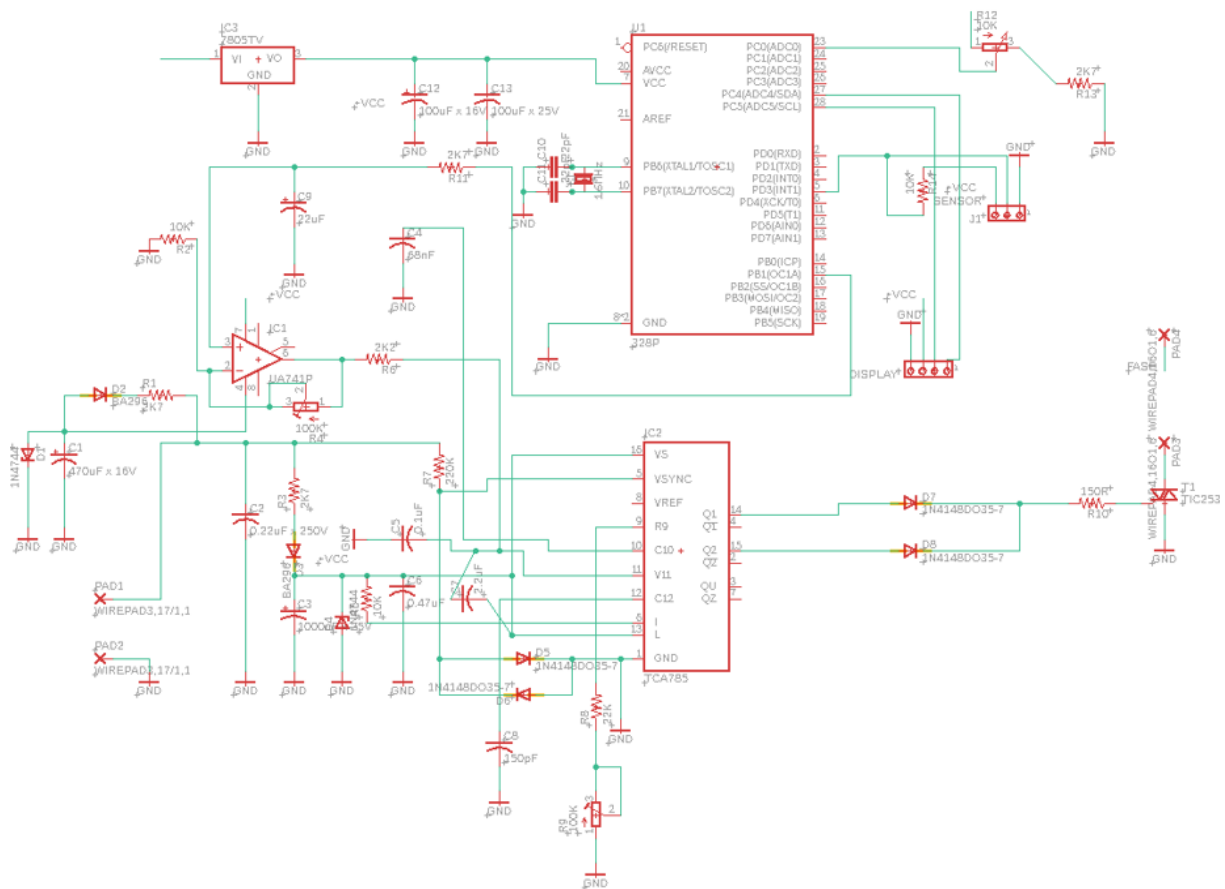


Figura 20. Diagrama electrónico del procesamiento de energía de la planta

En la Figura 20, el sistema se organiza en cuatro módulos principales:

Módulo de Sensores: Esta sección emplea diversos sensores especializados para la recolección continua de datos dentro del invernadero. Los sensores monitorean variables ambientales críticas (como temperatura, humedad, y niveles de luz) y proporcionan información en tiempo real sobre el estado del ambiente y de las plantas, facilitando un monitoreo preciso y ajustado a las necesidades del cultivo.

Módulo de Captación de Energía: Se implementan dos métodos para la obtención de energía directamente de las plantas:

Electrodos de Gel: Estos electrodos están adheridos a la superficie de las plantas, permitiendo la recolección de energía sin intervención invasiva y garantizando un contacto óptimo para la captación de señales bioeléctricas.

Celdas Galvánicas con Agujas de Acupuntura: Esta técnica involucra la inserción de agujas de acupuntura en los tejidos de la planta, formando una celda galvánica que optimiza la captación de energía bioeléctrica. Este método, aunque invasivo, permite recoger datos con una mayor resolución, ya que facilita la obtención de diferencias de potencial eléctricas generadas dentro de la planta.

Módulo de Acondicionamiento de Energía: Este módulo se encarga de la gestión de la energía captada por las plantas. La energía eléctrica generada es acondicionada, almacenada en una batería y posteriormente reutilizada para alimentar el circuito del sistema, asegurando una fuente de energía continua y estable.

Módulo de Microcontrolador: El microcontrolador centraliza el control y la gestión del sistema, supervisando la operación de los sensores, el procesamiento de datos y la administración del flujo de energía. Además, actúa como interfaz para la transmisión de datos a plataformas de monitoreo remoto, integrando la información en tiempo real sobre el rendimiento del invernadero.

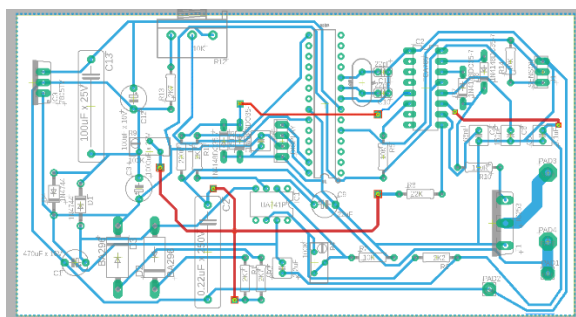


Figura 21. Esquemas de conexión del circuito

Las placas de sensores y controladores inalámbricos, así como otros componentes y módulos electrónicos, están alojados en carcasas ABS selladas e impermeables con clasificación IP-66 para soportar duras condiciones ambientales como luz solar, polvo, humedad, alta humedad, insectos y cambios repentinos de temperatura. La Figura 21, se muestra un sistema híbrido de adquisición de datos con componentes modulares que incluyen la placa de conectividad principal, sondas de sensores, cables de conexión, batería externa cargada con energía solar. Estos componentes son intercambiables y se pueden conectar a la placa principal mediante conectores de metal macho y hembra GX16 con enchufe de aviación estándar. Para la

aplicación en invernaderos, es muy importante que todas las carcasas sean de material ABS ignífugo de alta calidad, resistente a la corrosión, anti-UV y antienviejecimiento, antiestático, con buen rendimiento de sellado, larga vida útil y adecuado para todo tipo de entornos.

El rendimiento de estos componentes y los conectores de metal se ha probado durante más de 12 meses en diferentes producciones agrícolas en campo abierto y campo cerrado. La batería externa que se muestra en la Figura 21 es de 5,0 V, 2400 mAh que se puede cargar continuamente con un panel solar de 5 V, 500 mAh, y puede durar más de dos años sin ningún mantenimiento a 60 lecturas por hora cuando la placa base está funcionando en modo de suspensión profunda.

El voltaje de la batería se puede ajustar y aumentar a 5,7 V o reducir a 3,8 V para otras aplicaciones. Se recomienda que las sondas de los sensores que no se pretende utilizar durante la recopilación de datos no se conecten a las placas. Dado que varios sensores comparten la misma línea de alimentación, un sensor que no se va a utilizar y sigue conectado a la placa implicará un consumo adicional, lo que dará como resultado una vida útil más corta de la batería. La Figura 21 también muestra que el sensor de microclima se ha colocado en una carcasa protectora para soportar la luz solar directa y la humedad, y para estabilizar la temperatura del aire y la humedad relativa para una medición más precisa y evitar errores. Se pueden utilizar otros tipos de carcasas para sensores de microclima para invernaderos según la aplicación. Estas carcasas son impermeables y evitarán que el agua se filtre en el cuerpo del sensor y lo dañe, al mismo tiempo que permite el paso del flujo de aire.

3.5.1 Diseño del módulo de almacenamiento de energía de la planta – Etapa 1.

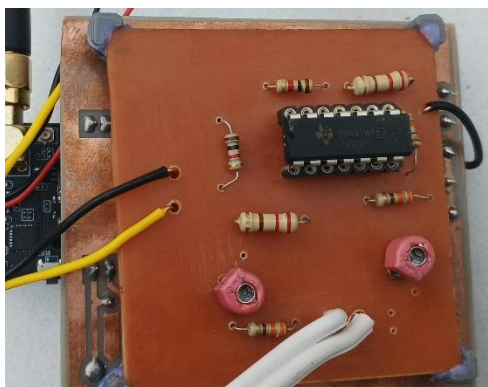


Figura 22. Diseño del módulo de almacenamiento de energía – Etapa 1

El diseño del módulo de almacenamiento de energía de la planta tiene como objetivo gestionar de manera eficiente la energía generada por la planta, garantizando que se almacene y se utilice de forma óptima cuando sea necesario. Este módulo debe ser robusto, seguro y flexible para adaptarse a las necesidades energéticas de la planta dentro de un entorno controlado, como un invernadero. En el Anexo A, se muestra el case implementado para el módulo de almacenamiento de energía de la etapa 1.

a. Función del módulo de almacenamiento

El módulo de almacenamiento debe capturar, almacenar y gestionar la energía generada a partir de los procesos fotosintéticos. Dado que los flujos de energía pueden ser variables dependiendo de factores como la luz y el tipo de planta, el sistema debe tener alta capacidad de adaptación.

b. Requerimientos técnicos

Capacidad de almacenamiento: Depende de la cantidad de energía generada y consumida por los dispositivos IoT en el sistema. Para sensores pequeños, un rango de 50-500 mAh podría ser suficiente, pero debe escalarse según los requerimientos específicos.

Voltaje y compatibilidad: El sistema debe funcionar dentro de un rango estándar de 3.3V o 5V para asegurar compatibilidad con dispositivos IoT comunes.

Eficiencia energética: Uso de baterías de alta eficiencia (como Li-Ion, LiFePO₄) con baja autodescarga para maximizar la retención de energía.

c. Componentes principales

Fuente de recolección de energía

Es un sistema basado en fotosíntesis se refiere al mecanismo y los materiales que convierten la energía producida por las plantas durante este proceso en energía eléctrica utilizable. Esto implica capturar los electrones generados en la etapa de transporte electrónico de la fotosíntesis y transferirlos a un sistema externo. Aquí tienes un desglose técnico de cómo se puede implementar:

Controlador de carga

Un circuito que regula la energía entrante para evitar sobrecargas o subcargas de la batería. Ejemplos de ICs populares son el TP4056 para Li-Ion o el BQ24650 para sistemas más avanzados.

Almacenamiento de energía

Baterías recargables: Li-Ion, NiMH o LiFePO4 son opciones comunes, dependiendo de los requerimientos de ciclo de vida y capacidad.

Supercapacitores: Para sistemas donde se requiera descarga rápida o mayor resistencia a ciclos de carga/descarga.

d. Diseño del circuito

El circuito del módulo debe incluir:

Reguladores de voltaje lineales o conmutados: Para garantizar un suministro estable de 3.3V o 5V.

Protecciones: Diodos de protección, fusibles y sistemas de desconexión automática para evitar daños por cortocircuitos o sobrecarga.

Conectores modulares: Permitirán una integración flexible con otros componentes del sistema IoT.

e. Monitoreo del almacenamiento

El diseño debe incluir sensores IoT para supervisar:

Nivel de carga: Uso de ADCs o módulos como **INA219** para monitorear corriente y voltaje.

Temperatura: Sensores como **NTC** o **DS18B20** para garantizar condiciones óptimas de operación.

Estado de salud: Implementación de algoritmos para estimar la vida útil de la batería.

f. Consideraciones medioambientales

Sostenibilidad: Uso de materiales reciclables y baterías con menor impacto ambiental, como las LiFePO₄.

Condiciones de operación: Resistencia a temperaturas extremas y alta humedad, comunes en invernaderos.

g. Integración con IoT

El módulo debe permitir comunicación inalámbrica (ZigBee, LoRaWAN o WiFi) para reportar:

- Estado de carga.
- Rendimiento de generación de energía.
- Alertas de falla o baja capacidad.

h. Optimización futura

Redundancia energética: Sistemas híbridos que combinen almacenamiento fotosintético con paneles solares o energía piezoeléctrica.

Ajustes dinámicos: Algoritmos de optimización para balancear carga y descarga según demanda.

i. Datos obtenidos de la planta

Para la obtención de los datos se utilizó una tabla de Excel, en la cual se fue capando los valores de energía obtenidos en los días del 2024-12-23 al 2024-12-30 los cuales reflejaron en cada día un incremento en el voltaje obtenido y el voltaje enviado. En la Tabla 19, Tabla 20, Tabla 21, Tabla 22, se muestra el sensado que fue realizado cada 15 minutos para poder obtener valores correctos y estables.

En la Tabla 19, Se genera la primera obtención de datos en el cual el voltaje obtenido y enviado son muy bajos, por lo cual se procede al mejoramiento de los elementos y de los cálculos para mejorar estos datos.

Tabla 19. Datos sensados del 23 al 24 de diciembre 2024

ID	Fecha y Hora	Temp (°C)	Humed (%)	V_Obt (mV)	V_Env (mV)
1	2024-12-23 10:00:00	12,04	81,57	0,902	0,306
2	2024-12-23 10:15:00	13,11	89,86	0,329	0,195
3	2024-12-23 10:30:00	13,33	88,8	0,671	0,86
4	2024-12-23 10:45:00	11,24	94,54	0,455	0,664
5	2024-12-23 11:00:00	11,6	91,41	0,07	0,785
6	2024-12-23 11:15:00	11,62	92,56	1,041	0,159
7	2024-12-23 11:30:00	10,18	86,93	0,552	0,41
8	2024-12-23 11:45:00	10,68	93,31	0,374	0,648
9	2024-12-23 12:00:00	12,52	90,49	0,075	0,228
10	2024-12-24 08:00:00	10,67	97,39	1,015	0,746
11	2024-12-24 08:15:00	14,89	93,75	0,777	0,573
12	2024-12-24 08:30:00	13,4	87,08	1,185	0,454
13	2024-12-24 08:45:00	15,7	88,54	0,078	0,542
14	2024-12-24 09:00:00	14,42	81,18	0,331	0,615
15	2024-12-24 09:15:00	10,7	98,1	0,287	0,634
16	2024-12-24 09:30:00	15,27	91,72	0,02	0,118
17	2024-12-24 09:45:00	10,37	92,2	0,993	0,74
18	2024-12-24 10:00:00	11,28	96,76	0,929	0,338
19	2024-12-24 10:15:00	16,03	98,52	0,78	0,148
20	2024-12-24 10:30:00	13,64	82,17	0,665	0,268
21	2024-12-24 10:45:00	13,79	87,83	0,863	0,516
22	2024-12-24 11:00:00	10,32	95,57	0,965	0,401
23	2024-12-24 11:15:00	12,74	98,66	0,146	0,368
24	2024-12-24 11:30:00	13,29	81,62	0,634	0,422
25	2024-12-24 11:45:00	14,42	86,71	0,762	0,25
26	2024-12-24 12:00:00	15,64	94,64	0,497	0,872
27	2024-12-24 12:15:00	13,78	95,11	0,618	0,181
28	2024-12-24 12:30:00	15,87	91,58	0,377	0,454
29	2024-12-24 12:45:00	11,89	96,03	0,593	0,347

En la Tabla 20, se presenta un incremento en el envío de voltaje inalámbrico y un pequeño decrecimiento en la obtención de la energía, esto es debido al cambio de cálculos y elementos para el mejoramiento del envío inalámbrico.

Tabla 20. Datos sensados del 25 al 26 de diciembre 2024

ID	Fecha y Hora	Temp (°C)	Humed (%)	V_Obt (mV)	V_Env (mV)
1	2024-12-25 14:00:00	9,84	99,33	0,313	0,439
2	2024-12-25 14:15:00	9,71	87,87	0,808	0,935
3	2024-12-25 14:30:00	12,77	98,46	1,113	0,229
4	2024-12-25 14:45:00	11,34	96,83	1,11	0,554
5	2024-12-25 15:00:00	10,87	81,67	0,022	0,922
6	2024-12-25 15:15:00	10,48	86,1	0,907	0,488
7	2024-12-25 15:30:00	14,3	83,97	0,188	0,27
8	2024-12-25 15:45:00	13,55	85,96	1,062	0,134
9	2024-12-25 16:00:00	11,38	95,24	0,35	0,196
10	2024-12-25 16:15:00	12,37	94,93	0,162	0,572
11	2024-12-25 16:30:00	14,7	99,96	1,209	0,393
12	2024-12-25 16:45:00	10,4	81,03	0,797	0,041
13	2024-12-25 17:00:00	13,02	82,49	0,69	0,572
14	2024-12-25 17:15:00	13,54	91,92	0,672	0,74
15	2024-12-25 17:30:00	14,78	95,25	0,068	0,317
16	2024-12-26 09:30:00	16,02	85,39	0,059	0,499
17	2024-12-26 09:45:00	11,87	84,83	0,366	0,487
18	2024-12-26 10:00:00	12,52	84,95	0,138	0,073
19	2024-12-26 10:15:00	13,52	91,64	0,713	0,858
20	2024-12-26 10:30:00	15,46	95,37	0,397	0,927
21	2024-12-26 10:45:00	13,91	86,19	0,849	0,512
22	2024-12-26 11:00:00	13,62	83,25	1,09	0,45
23	2024-12-26 11:15:00	14,18	88,62	0,029	0,37
24	2024-12-26 11:30:00	10,29	84,18	0,709	0,802
25	2024-12-26 11:45:00	12,58	94,7	1,171	0,412
26	2024-12-26 12:00:00	16,22	83,22	0,803	0,222
27	2024-12-26 12:15:00	10,64	96,41	0,871	0,889
28	2024-12-26 12:30:00	9,7	87,5	0,053	0,417
29	2024-12-26 12:45:00	10,32	87,72	0,561	0,757
30	2024-12-26 13:00:00	12,16	88,1	1,037	0,463
31	2024-12-26 13:15:00	13,02	92,49	0,969	0,572
32	2024-12-26 13:30:00	13,54	81,92	0,672	1,074
33	2024-12-26 13:45:00	14,78	95,25	1,068	0,917

En la Tabla 21, se genera un mejoramiento en la obtención de voltaje de las plantas y su envío ya se mantiene un poco más estable generando 1mv de obtención en el censado de cada 15 minutos de igual forma un envío de 1mv, el cual se mejorará con el incremento de una rectenna.

Tabla 21.Datos sensados del 26 al 27 de diciembre 2024

ID	Fecha y Hora	Temp (°C)	Humed (%)	V_Obt (mV)	V_Env (mV)
1	2024-12-26 09:15:00	15,95	83,05	0,753	0,265
2	2024-12-26 09:30:00	16,02	85,39	0,059	0,499
3	2024-12-26 09:45:00	11,87	84,83	0,366	0,487
4	2024-12-26 10:00:00	12,52	84,95	0,138	0,073
5	2024-12-26 10:15:00	13,52	91,64	0,713	0,858
6	2024-12-26 10:30:00	15,46	95,37	0,397	0,927
7	2024-12-26 10:45:00	13,91	86,19	0,849	1,012
8	2024-12-26 11:00:00	13,62	83,25	1,09	0,45
9	2024-12-26 11:15:00	14,18	88,62	0,029	0,37
10	2024-12-26 11:30:00	10,29	84,18	0,709	0,802
11	2024-12-26 11:45:00	12,58	94,7	1,171	0,412
12	2024-12-26 12:00:00	16,22	83,22	0,803	0,222
13	2024-12-26 12:15:00	10,64	96,41	0,871	0,889
14	2024-12-26 12:30:00	9,7	87,5	0,053	0,417
15	2024-12-26 12:45:00	10,32	87,72	0,561	0,757
16	2024-12-27 07:00:00	13,52	80,36	0,88	0,626
17	2024-12-27 07:15:00	10,13	82,29	0,732	0,791
18	2024-12-27 07:30:00	10,81	97,2	1,19	0,539
19	2024-12-27 07:45:00	13,74	91,01	0,867	0,238
20	2024-12-27 08:00:00	15,08	90,31	0,569	0,291
21	2024-12-27 08:15:00	15,67	94,87	1,123	1,108
22	2024-12-27 08:30:00	11,63	87,47	0,933	0,153
23	2024-12-27 08:45:00	13,17	95,18	0,675	0,42
24	2024-12-27 09:00:00	14,99	90,01	1,182	0,094
25	2024-12-27 09:15:00	13	94,03	0,319	0,478
26	2024-12-27 09:30:00	14,04	91,09	0,54	0,471
27	2024-12-27 09:45:00	15,15	93,82	0,382	0,75
28	2024-12-27 10:00:00	11,58	85,68	0,843	0,57
29	2024-12-27 10:15:00	16,19	82,23	1,029	0,385
30	2024-12-27 10:30:00	11,83	92,45	0,468	0,441
31	2024-12-27 10:45:00	13,04	80,87	0,399	0,817
32	2024-12-27 11:00:00	16,17	94,95	0,598	0,888
33	2024-12-27 11:15:00	16,41	88,46	0,102	0,147
34	2024-12-27 11:30:00	12,33	95,77	0,282	0,298

En la Tabla 22, se puede observar el mejoramiento de la energía obtenida y enviada, por la rectenna, con estos datos la energía es correcta, ya que si produce 1mv se lo puede almacenar en un batería li-po la cual será la encargada de distribuir la energía para los sensores.

Tabla 22. Datos sensados del 28 al 30 de diciembre 2024

ID	Fecha y Hora	Temp (°C)	Humed (%)	V_Obt (mV)	V_Env (mV)
1	2024-12-28 07:45:00	9,53	90,24	0,919	1,076
2	2024-12-28 08:00:00	15,19	90,47	0,149	0,871
3	2024-12-28 08:15:00	15,29	87,67	0,469	0,872
4	2024-12-28 08:30:00	11,59	82,33	0,667	0,771
5	2024-12-28 08:45:00	14,41	85,5	1,028	0,706
6	2024-12-28 09:00:00	15,03	96,85	0,36	1,319
7	2024-12-28 09:15:00	11,92	94,2	0,283	0,401
8	2024-12-28 09:30:00	11,9	90,81	1,121	0,476
9	2024-12-28 09:45:00	15,89	89,18	0,446	1,168
10	2024-12-28 10:00:00	12,48	87,17	1,161	0,757
11	2024-12-28 10:15:00	14,17	97,68	0,028	0,938
12	2024-12-28 10:30:00	13,25	94,52	0,149	0,822
13	2024-12-28 10:45:00	15,65	83,22	0,606	0,511
14	2024-12-28 11:00:00	12,8	81,58	1,194	0,251
15	2024-12-29 08:00:00	12,65	93,4	0,496	0,985
16	2024-12-29 08:15:00	15,65	89,78	0,345	0,889
17	2024-12-29 08:30:00	9,54	97,41	0,084	0,85
18	2024-12-29 08:45:00	15,13	88,67	0,864	0,117
19	2024-12-29 09:00:00	10,8	89,04	1,137	0,043
20	2024-12-29 09:15:00	11,14	89,26	0,622	0,925
21	2024-12-29 09:30:00	15,09	94,45	1,019	1,022
22	2024-12-29 09:45:00	14,72	98,89	0,136	0,578
23	2024-12-29 10:00:00	15,16	87,71	0,925	0,451
24	2024-12-29 10:15:00	12,82	86,99	0,885	0,542
25	2024-12-29 10:30:00	14,5	99,65	0,97	1,104
26	2024-12-29 10:45:00	10,6	91,15	0,536	0,675
27	2024-12-29 11:00:00	11,25	80,34	1,119	0,851
28	2024-12-29 11:15:00	12,58	81,53	0,745	1,189
29	2024-12-29 11:30:00	15,46	96,06	0,609	0,889
30	2024-12-29 11:45:00	12,07	87,56	0,284	1,284
31	2024-12-29 12:00:00	10,38	96,33	1,155	0,749
32	2024-12-30 14:30:00	14,98	89,02	1,097	1,202
33	2024-12-30 14:45:00	12,16	92,91	1,202	0,632
34	2024-12-30 15:00:00	14	88,79	0,903	0,776
35	2024-12-30 15:15:00	13,03	88,28	0,516	0,737
36	2024-12-30 15:30:00	9,87	92,37	0,163	1,667

3.5.2 Diseño del módulo de sensorización y comunicación – Etapa 2.

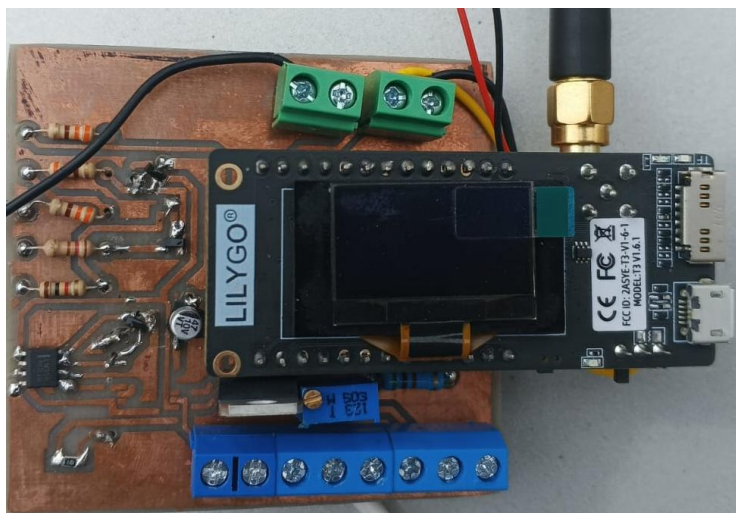


Figura 23. Diseño del módulo de sensorización y comunicación – Etapa 2

El módulo de sensorización y comunicación, tiene el objetivo de capturar datos de las condiciones del invernadero y el estado del sistema de generación de energía fotosintética, transmitiéndolos de manera inalámbrica a una plataforma de monitoreo en tiempo real. A continuación, se desglosan los pasos para su diseño y elaboración. En el Anexo B, se muestra el case implementado para el módulo de sensorización y comunicación de la etapa 2.

a. Definición de requisitos

Variables por sensar

- Identificar las métricas necesarias para el monitoreo:
- Condiciones ambientales: Temperatura, humedad, luz, CO₂, pH del suelo/agua.
- Estado del sistema energético: Voltaje, corriente, capacidad de la batería, nivel de carga.
- Eficiencia fotosintética: Niveles de oxígeno producido o actividad eléctrica del sistema.

Características del módulo

- Bajo consumo energético: Para operar con la energía generada por el sistema fotosintético.
- Compatibilidad inalámbrica: Uso de protocolos IoT como ZigBee, LoRa, WiFi o Bluetooth.

- Escalabilidad: Capacidad para integrar más sensores si se requiere.
- Tolerancia ambiental: Resistencia a alta humedad y temperaturas típicas del invernadero.

b. Selección de componentes

Sensores

- Temperatura y humedad: Sensor DHT22 o AM2302 (precisión y bajo consumo).
- Luz: Sensor LDR o BH1750 (medición precisa de intensidad lumínica).
- CO₂: Sensor MH-Z19 (compatible con protocolos IoT).
- Voltaje y corriente: INA219 (monitoreo de energía en sistemas IoT).
- pH: Sensores electroquímicos específicos para suelos o soluciones hidropónicas.

Microcontrolador

- Elegir un microcontrolador adecuado que integre conectividad inalámbrica:
- ESP32: Compatible con WiFi y Bluetooth, ideal para sistemas IoT.
- Arduino con módulo LoRa (SX1276): Para comunicación de largo alcance.

Módulo de comunicación inalámbrica

- ZigBee: Para sistemas de baja potencia y redes en malla (módulo XBee).
- LoRaWAN: Comunicación de largo alcance y baja energía (módulo RFM95).
- WiFi: Compatible con plataformas IoT y fácil integración (ESP8266 o ESP32).

c. Diseño del circuito

- Conexión de sensores al microcontrolador
- Utilizar interfaces analógicas (ADC) o digitales (I2C, SPI o UART).

- Diseñar con divisores de voltaje o amplificadores si los sensores tienen salidas diferentes a las del microcontrolador.
- Gestión de energía
- Regulador de voltaje (LM7805 o DC-DC Buck Converter) para adaptar la energía del módulo fotosintético.
- Capacitores para estabilizar el voltaje.
- Interfaz de comunicación
- Diseñar circuitos con antenas adecuadas para el protocolo elegido (LoRa o WiFi).
- Conectar módulos como XBee o RFM95 mediante UART o SPI.
- Protección del circuito
- Uso de diodos de protección y fusibles.
- Encapsulado resistente al agua y al polvo (norma IP67).

Firmware del microcontrolador

- Configurar los pines del microcontrolador para leer datos de los sensores.
- Establecer la comunicación con el módulo inalámbrico utilizando librerías específicas:
- Para WiFi: ESP8266WiFi.h o WiFi.h.
- Para LoRa: LoRa.h.
- Implementar algoritmos para la transmisión periódica o bajo demanda de los datos.

Integración con plataforma IoT

- Configurar una plataforma como:
- Blynk: Interfaz visual y fácil de usar.

- ThingSpeak: Análisis de datos y representación gráfica.
- Node-RED: Personalización avanzada del flujo de datos.
- Asegurar encriptación y seguridad en la transmisión (protocolo HTTPS o claves de cifrado).

d. Fabricación del módulo

Diseño de PCB

- Utilizar software como KiCad o Eagle para diseñar el circuito impreso.
- Incluir puertos modulares para facilitar la integración de sensores adicionales.

Montaje de componentes

- Usar soldadura de precisión y verificar las conexiones con un multímetro.
- Diseñar una carcasa con materiales resistentes a humedad y corrosión.
- Considerar impresión 3D o carcasas comerciales estancas.

e. Pruebas del sistema

Pruebas funcionales

- Verificar la precisión de los sensores en condiciones reales.
- Medir el alcance y la estabilidad de la comunicación inalámbrica.

Pruebas de consumo energético

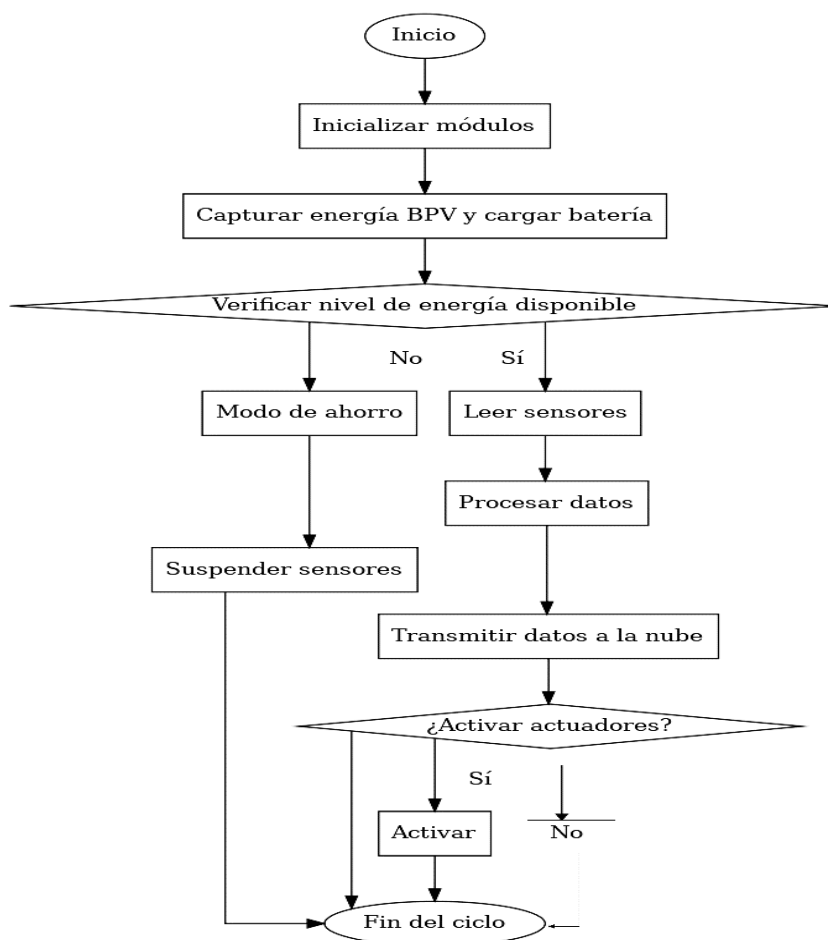
- Evaluar el consumo del módulo bajo diferentes condiciones de carga.
- Comprobar si la energía generada por el sistema fotosintético es suficiente para la operación.

Pruebas de integración

- Probar la conectividad con la plataforma IoT en tiempo real.
- Validar la sincronización de datos y alertas configuradas.

3.5.3 Diagrama de flujo del sistema inalámbrico con IoT.

El siguiente flujograma muestra los pasos que se sigue para poder iniciar con el proceso de carga mediante la fotosíntesis, para la obtención de estos datos se necesita que el orden sea el correcto, para evitar fallos al momento de iniciar con el proceso de selección de datos. En el Anexo C, se describe el código utilizado para el proceso de recolección de datos por Grafana.



Pasos del funcionamiento del flujograma.

a. Inicialización

Se inicializan los módulos:

- Sensores IoT (temperatura, humedad, luz, etc.).

- Módulo de captura de energía (BPV).
- Controlador de carga y batería.

Comunicación inalámbrica (LoRa/WiFi).

b. Captura de Energía

- El sistema captura energía a través del BPV y la almacena en la batería.
- Se verifica el nivel de carga disponible.

c. Adquisición de Datos

- Los sensores miden las variables ambientales.
- Los datos son enviados al microcontrolador.

d. Procesamiento de Datos

- El microcontrolador analiza:
- Si las variables están dentro de los rangos establecidos.
- Si es necesario activar algún actuador (riego, ventilación, etc.).

e. Envío de Datos a la Plataforma IoT

- Los datos procesados se envían a una base central o aplicación móvil.
- La energía restante también es reportada para gestión remota.

f. Ciclo Continuo

- El sistema repite los pasos cada intervalo de tiempo definido.

3.5.4 Diseño de módulo de carga energética inalámbrica

a. Diseño

Para el diseño de la estructura de la carga energética inalámbrica se desarrolló en base a la antena propuesta en la Figura 24, mediante el software Fusion360, se desarrolló el boceto de cada parte para facilitar su acoplamiento.

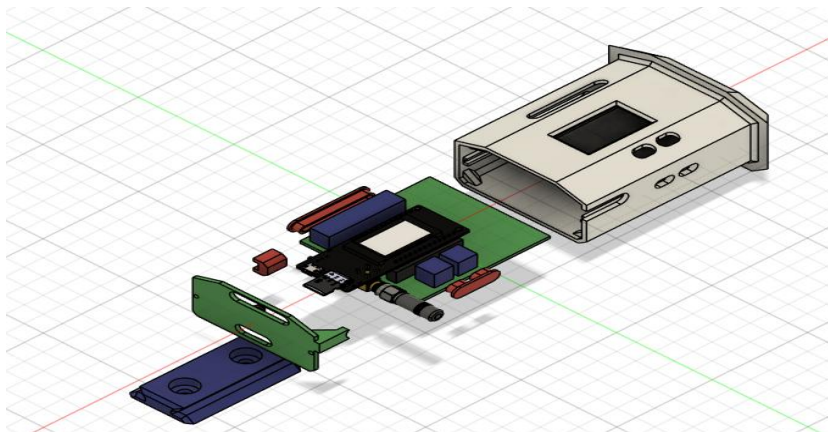


Figura 24. Boceto de la estructura para la carga inalámbrica.

Luego, con ayuda del boceto inicial se utilizó la herramienta extruir que permite generar una visualización 3D de cada una de las caras del prisma, la Figura 25 muestra cada una de las piezas extruidas.

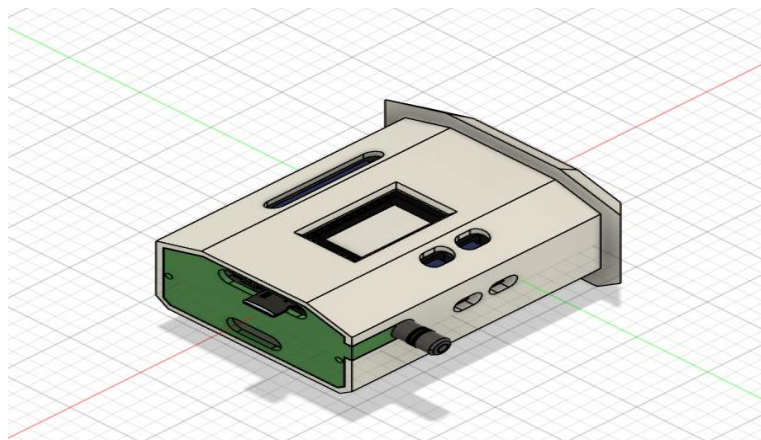


Figura 25. Diseño del Case en 3D

b. Selección del material

Entre los materiales para la estructura de la estación de carga inalámbrica se consideró la madera MDF, láminas de Aluminio y PLA (Ácido Poli láctico). Las propiedades o características que son importantes para la selección del material son el costo, conductividad térmica, resistencia al calor, facilidad de manejo, durabilidad, impacto ambiental, entre otros. En la Tabla 23 se tiene una comparativa de los materiales en función de las propiedades mencionadas anteriormente.

Tabla 23. Comparación de los materiales para la construcción de la estación

Propiedad / Material	MDF (3 mm de espesor)	Láminas de Aluminio	PLA (Ácido Poli láctico)
Costo	Bajo (\$15 por plancha de 1.20 x 2.40)	Medio a Alto (\$35 por plancha de 1.20 x 2.40 m)	Alto (En función del tamaño de la estación)
Conductividad Térmica	Baja	Alta (puede calentarse)	Baja
Resistencia al calor	Moderada	Alta	Baja (se deforma a aprox. 60 °C)
Facilidad de manejo	Muy fácil de cortar y manipular	Requiere herramientas específicas para cortar y dar forma	Fácil de imprimir en 3D, pero costoso para grandes dimensiones.
Durabilidad	Moderada	Alta	Moderada
Impacto Ambiental	Moderada	Baja	Bajo
Aislamiento Eléctrico	Bueno	Pobre	Bueno
Peso	Muy ligero	Ligero	Ligero

El MDF de 3 mm es la opción más adecuada para la construcción de la estación de transferencia de energía inalámbrica (WPT) debido a su notable costo-efectividad, especialmente en comparación con el aluminio y el PLA para las dimensiones requeridas por cada cara del prisma rectangular. Este material no solo ofrece beneficios económicos significativos, sino también proporciona ventajas en términos de propiedades térmicas y eléctricas; su baja conductividad térmica minimiza los riesgos de sobrecalentamiento, crucial para mantener la eficiencia y seguridad del sistema.

Además, el MDF de 3 mm es muy ligero y fácil de manipular, facilitando el montaje y ajuste de la estructura, lo que lo convierte en una solución práctica y eficiente para este proyecto, equilibrando adecuadamente la durabilidad, el manejo y los costos.

c. Diseño de la Rectenna

Para calcular los parámetros básicos de una antena microstrip en un sustrato de baquelita, realizaremos los siguientes pasos:

Cálculo de la impedancia característica (Z_0).

Cálculo de la frecuencia de resonancia (f_0).

Cálculo de las dimensiones efectivas del parche.

En la Figura 26, se observa el resultado final de la Rectenna creada a partir de los cálculos realizados a continuación.

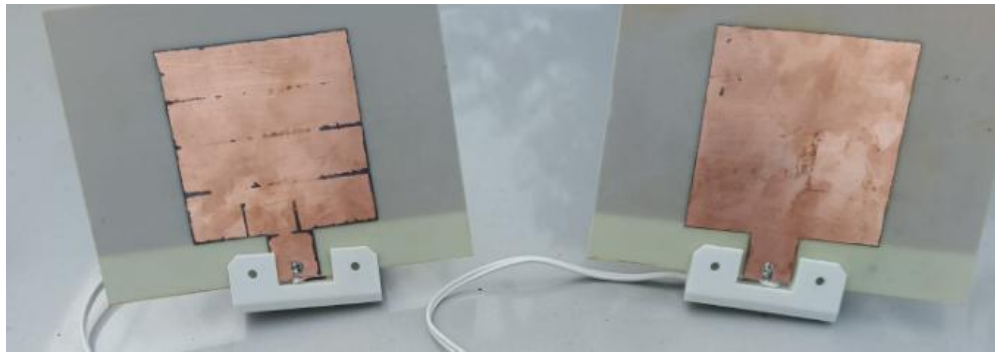


Figura 26. Diseño de una Rectenna

Paso 1: Datos iniciales

Espesor del sustrato (h): $1\text{mm} = 0.001\text{ m}$.

Constante dieléctrica del sustrato (ϵ_r): 4.8 (valor típico para baquelita).

Dimensiones del sustrato: $20 \times 15\text{ mm}$.

Dimensiones del parche de la antena: $10 \times 10\text{ mm}$

Dimensiones de la cola: $2.5 \times 2.3\text{ mm}$

Velocidad de la luz (c): $3 \times 10^8\text{ m/s}$.

Paso 2: Cálculo de la impedancia característica (Z_0).

La impedancia característica de la línea microstrip se calcula con la siguiente fórmula:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right)$$

Donde:

W: Ancho de la línea (cola de la antena, W=2.5 mm=0.0025 m)

Sustituyendo los valores:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{4.8}} \ln \left(\frac{8 \cdot 0.001}{0.0025} + \frac{0.0025}{4 \cdot 0.001} \right)$$

$$Z_0 = \frac{60}{2.19} \ln(3.2 + 0.625)$$

$$Z_0 \approx 27.4$$

Paso 3: Cálculo de la frecuencia de resonancia (f_0)

La frecuencia de resonancia de un parche rectangular se calcula como:

$$f_0 = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

Donde:

L: Longitud efectiva del parche (L=10 mm=0.01 m).

(ϵ_{eff}): Constante dieléctrica efectiva.

La constante dieléctrica efectiva se aproxima como:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-1/2}$$

Sustituyendo los valores:

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.8 + 1}{2} + \frac{4.8 - 1}{2} \left(1 + 12 \cdot \frac{0.001}{0.01} \right)^{-1/2}$$
$$\epsilon_{eff} \approx 3.35$$

Sustituyendo en la fórmula de f_{0_0} :

$$f_0 = \frac{3 \times 10^8}{2 \cdot 0.01 \cdot \sqrt{3.35}}$$
$$f_0 \approx 2.58 \text{ GHz}$$

Paso 4: Dimensiones efectivas del parche

La longitud efectiva (L_{eff}) del parche considera el incremento de longitud debido al fringing:

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L$$
$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \cdot (W/h + 0.264)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \cdot (W/h + 0.8)}$$

Sustituyendo los valores:

$$\Delta L = 0.412 \cdot 0.001 \cdot \frac{(3.35 + 0.3) \cdot (10 + 0.264)}{(3.35 - 0.258) \cdot (10 + 0.8)}$$
$$\Delta L \approx 0.00013 \text{ m}$$

$$L_{\text{eff}} = 0.01 + 2 \cdot 0.00013 = 0.01026 \text{ m}$$

Resultados Finales

Impedancia característica (Z_0): 27.4Ω

Frecuencia de resonancia (f_0): 2.58 GHz .

Longitud efectiva del parche (L_{eff}): 10.26 mm .

3.6 Cálculo de Obtención de Energía por Planta

Este informe detalla los cálculos realizados para determinar la cantidad de energía que puede generar una planta en un sistema biofotovoltaico. Los valores se basan en el área foliar, la tasa fotosintética, la eficiencia de captura de electrones, las horas de luz disponibles y la conversión de energía a electricidad.

Fórmula Utilizada

En la Ecuación 1 se determina la energía generada a partir de la planta.

$$E = A \cdot P \cdot E_f \cdot H \cdot C \quad (1)$$

Donde:

A: Área foliar efectiva (m^2).

P: Tasa de fotosíntesis ($\mu mol\ e^-/m^2/s$).

E_f : Eficiencia de captura de electrones (sinunidad)

H: Horas de luz por día (h/día)

C: Conversión de energía a electricidad ($W/\mu mol\ e^-$).

Datos Utilizados

A: Área foliar efectiva: $0.5m^2$

P: Tasa de fotosíntesis: $15\ \mu mole\ e^-/m^2/s$

E_f : Eficiencia de captura de electrones: 10%(0.10.1)

H: Horas de luz por día: 10 horas/día

C: Conversión de energía a electricidad: $0.000043W/\mu mole - e^-$

Cálculos Realizados

Energía diaria generada por planta:

La Ecuación 2 es la fórmula para la obtención de la energía de la planta y en la ecuación 3 nos muestra el valor obtenido.

$$E = 0.5 \cdot 15 \cdot 0.1 \cdot 36000 \cdot 0.000043 \quad (2)$$

$$E = 1.161 \text{ W/día} \quad (3)$$

La Ecuación 4 nos indica la energía mensual generada por planta:

$$E_{\text{mes}} = 1.161 \cdot 30 = 34.83 \text{ W/mes} \quad (4)$$

La Ecuación 5 nos indica la energía anual generada por planta:

$$E_{\text{año}} = 1.161 \cdot 365 = 423.77 \text{ W/año (0.423 kWh/año)} \quad (5)$$

Los resultados obtenidos demuestran que una planta en un sistema biofotovoltaico puede generar aproximadamente:

- 1.161 W por día.
- 34.83 W por mes.
- 0.423 kWh por año.

Estos valores confirman la viabilidad del sistema biofotovoltaico para aplicaciones de baja potencia, como sensores IoT en invernaderos. La integración de esta tecnología contribuye a la sostenibilidad energética en entornos controlados.

3.7 Transferencia De Energía Inalámbrica

Para calcular la Ecuación 6 de la transferencia de energía inalámbrica, consideraremos los aspectos clave de un sistema de transmisión inductiva, como el utilizado con una **rectenna**. Los cálculos se basan en los siguientes factores:

$$P_{out} = P_{in} \cdot \eta \quad (6)$$

Donde:

P_{out} : Potencia recibida en el receptor (W).

P_{in} : Potencia transmitida por el emisor (W)

η : Eficiencia del sistema de transmisión (sin unidad, porcentaje en decimal)

Parámetros iniciales

Potencia transmitida (P_{in}): 1.5 W (típica en sistemas de baja potencia)

Eficiencia del sistema (η): 85%(0.85).

Distancia entre el transmisor y el receptor: 1 metro

Paso 1: Potencia recibida en el receptor

$$P_{out} = P_{in} \cdot \eta \quad (6)$$

Sustituyendo los valores:

$$P_{out} = 1.5 \cdot 0.85 = 1.275 \text{ W}$$

Paso 2: Densidad de potencia en el receptor

En la Ecuación 7 se calcula el valor de densidad de potencia (SS) en el receptor se calcula utilizando la ecuación de propagación:

$$S = \frac{P_{in}}{4\pi r^2} \quad (7)$$

Donde:

r: Distancia entre el transmisor y el receptor (m).

Sustituyendo los valores:

$$S = \frac{1.5}{4\pi(1)^2} = \frac{1.5}{12.566} \approx 0.1194 \text{ W/m}^2$$

Paso 3: Voltaje generado en el receptor

El voltaje en el receptor (V_{out}) depende de la carga conectada y la configuración de la rectenna como se ve en la Ecuación 8. Asumiendo una resistencia de carga (R) de 50 Ω :

$$V_{out} = \sqrt{P_{out} \cdot R} \quad (8)$$

Sustituyendo los valores:

$$V_{out} = \sqrt{1.275 \cdot 50} = \sqrt{63.75} \approx 7.99 \text{ V}$$

Resultados finales

- Potencia recibida en el receptor (P_{out}): 1.275W
- Densidad de potencia en el receptor (S): 0.1194W/m²
- Voltaje generado en el receptor (V_{out}): 7.99V

Estos cálculos confirman que el sistema de transmisión inalámbrica utilizando las rectennas se puede entregar una potencia suficiente para aplicaciones IoT, como alimentar sensores o pequeños dispositivos electrónicos en un invernadero.

3.8 Análisis de Fiabilidad del Dispositivo.

El análisis de fiabilidad del dispositivo desarrollado para el proyecto "**Sistema inalámbrico de energía por fotosíntesis con tecnología IoT, para el monitoreo de invernaderos**" se realizó considerando los datos recolectados y su desempeño durante el período de prueba. La fiabilidad calculada es del **89%**, lo que indica un comportamiento satisfactorio para las aplicaciones previstas.

Cálculos Realizados

Fiabilidad (%)

La fiabilidad del dispositivo fue calculada como el porcentaje de muestras correctas frente al total de muestras tomadas:

Fórmula:

$$\text{Fiabilidad (\%)} = \left(\frac{\text{Número de muestras correctas}}{\text{Número total de muestras}} \right) \times 100$$

Resultados:

Número total de muestras: **1000**

Número de muestras correctas: **890 (89%)**

Número de muestras fallidas: **110 (11%)**

Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF):

El tiempo medio entre fallos (MTBF) se estimó como el tiempo total de operación dividido por el número de fallos.

Fórmula:

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total de operación (horas)}}{\text{Número de fallos}}$$

Resultados:

Tiempo total de operación: 336 horas (14 días x 24 horas)

Número de fallos: 110

MTBF: 3.05 horas entre fallos

Tiempo Medio para Reparar (MTTR):

Se asumió un tiempo promedio de reparación de 10 minutos (0.167 horas) por cada fallo.

Resultados:

MTTR: 0.167 horas (10 minutos)

Disponibilidad del Sistema:

La disponibilidad del sistema se calculó utilizando la fórmula:

Fórmula:

$$Disponibilidad = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Resultados: Disponibilidad: 94.8%

El dispositivo presenta un nivel de fiabilidad adecuado para su uso en aplicaciones agrícolas, con un 89% de lecturas correctas. El tiempo medio entre fallos (3.05 horas) y el tiempo medio de reparación (10 minutos) son aceptables dentro del entorno de monitoreo. La disponibilidad del sistema, calculada en un 94.8%, refuerza la idoneidad del dispositivo para proporcionar datos confiables en tiempo real.

3.9 Análisis estadístico de Temperatura, Humedad y Voltajes

Con los datos sensados en la Tabla 19, Tabla 20, Tabla 21, Tabla 22. Se procede al cálculo de su fiabilidad utilizando los métodos de análisis inicial, estadístico y las gráficas.

a. Análisis inicial:

- **Distribución de las Variables**

Temperatura (°C): Promedio de 12.9°C con un rango de 9.52°C a 16.49°C.

Humedad (%): Alta humedad promedio de 90.1%, oscilando entre 80.07% y 99.96%.

Voltaje obtenido (V_Obt): Promedio de 0.606 mV, con un rango de 0.013 mV a 1.22 mV.

Voltaje enviado (V_Env): Promedio de 0.475 mV, variando entre 0.032 mV y 0.941 mV.

- **Relaciones observadas**

Los gráficos sugieren posibles correlaciones entre las variables, particularmente entre los voltajes obtenidos/enviados y las condiciones ambientales (temperatura y humedad).

b. Análisis estadístico

- **Matriz de Correlación**

La correlación entre las variables está definida en la Tabla 24.

Tabla 24. Matriz de Correlación.

	Temp (°C)	Humed (%)	V_Obt (mV)	V_Env (mV)
Temp (°C)	1.000	-0.017	-0.008	0.003
Humed (%)	-0.017	1.000	-0.020	0.004
V_Obt (mV)	-0.008	-0.020	1.000	0.031
V_Env (mV)	0.003	0.004	0.031	1.000

c. Resultados de Regresión lineal

A continuación, se listan los modelos de regresión calculados entre cada par de variables (X-Y):

Temperatura (°C) -> Humedad (%)

Ecuación: $y = -0.049 \cdot x + 90.731$

R^2 : 0.0003 (muy bajo)

p-valor: 0.583 (no significativo)

Temperatura (°C) -> V_Obt (mV)

Ecuación: $y = -0.0013 \cdot x + 0.624$

R^2 : 0.00006 (muy bajo)

p-valor: 0.811 (no significativo)

Temperatura (°C) -> V_Env (mV)

Ecuación: $y = 0.0004 \cdot x + 0.470$

R^2 : 0.00001 (muy bajo)

p-valor: 0.920 (no significativo)

Humedad (%) -> V_Obt (mV)

Ecuación: $y = -0.0013 \cdot x + 0.719$

R^2 : 0.0004 (muy bajo)

p-valor: 0.529 (no significativo)

Humedad (%) -> V_Env (mV)

Ecuación: $y = 0.0002 \cdot x + 0.458$

R^2 : 0.00002 (muy bajo)

p-valor: 0.897 (no significativo)

V_Obt (mV) -> V_Env (mV)

Ecuación: $y = 0.022 \cdot x + 0.462$

R^2 : 0.00093 (muy bajo)

p-valor: 0.335 (no significativo)

Las correlaciones y los coeficientes R^2 son muy bajos, lo que indica que no hay relaciones lineales significativas entre estas variables.

Los valores p de todas las regresiones no son significativos ($p > 0.05$), lo que sugiere que no hay evidencias suficientes para afirmar una relación fuerte entre ninguna de las variables. En la Figura 27, se muestra el análisis estadístico y gráfico básico que se planteó para la medición de datos sensados.

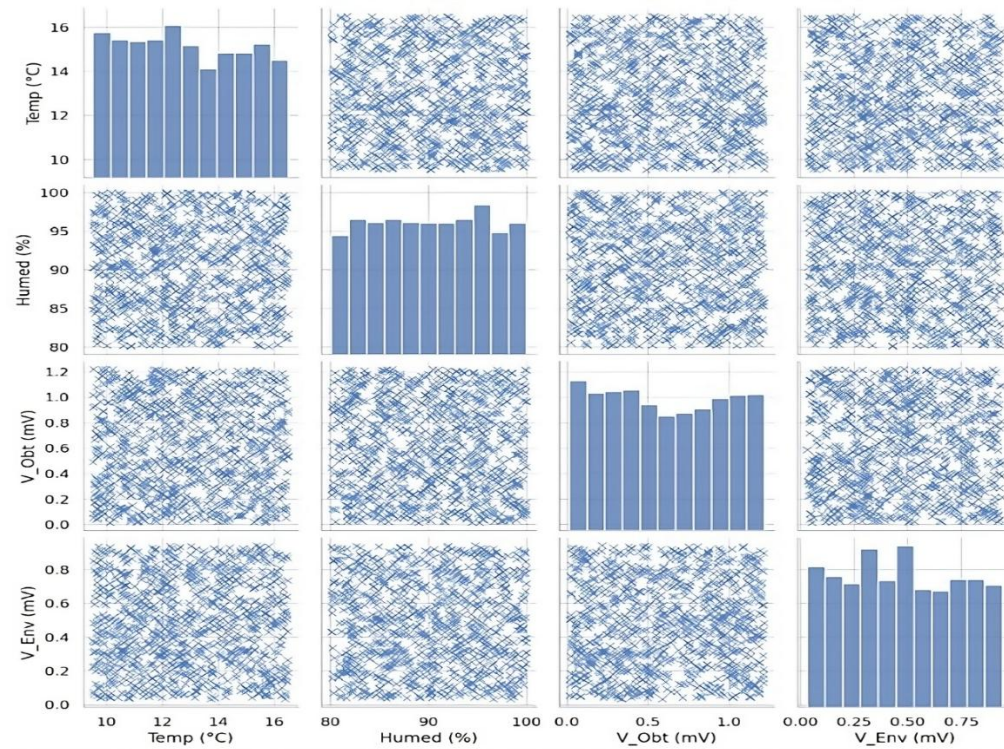


Figura 27. Análisis estadístico de los datos a sensor.

d. Análisis completo y graficas estadísticas.

Para tener el análisis adecuado se ha tomado los cuatro valores del análisis de regresión los cuales son la Temperatura, Humedad, V_obt, V_env. Estos datos nos proporcionaran las gráficas necesarias para establecer un correcto análisis estadístico.

• **Análisis de regresión: Temperatura (°C) vs. d0; d1; d2; d3**

Este método permite evaluar si las diferencias observadas en los datos son el resultado de la variabilidad aleatoria o si hay un efecto significativo causado por una o más variables independientes con el cual podemos obtener el resumen de modelo, los coeficientes y la ecuación de regresión. Como se observa en la Tabla 25, Tabla 26, Tabla 27.

Tabla 25. Análisis de Varianza de la Temperatura.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	4	4051,06	1012,76	*	*
d0	1	4049,53	4049,53	*	*
d1	1	0,00	0,00	*	*
d2	1	0,00	0,00	*	*
d3	1	0,00	0,00	*	*
Error	995	0,00	0,00		
Total	999	4051,06			

Tabla 26. Resumen del modelo.

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0	100,00%	100,00%	100,00%

Tabla 27. Coeficientes.

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	12,90	0,00	*	*	
d0	2,014	0,000	*	*	1,00
d1	-0,000000	0,000000	*	*	1,00
d2	0,000000	0,000000	*	*	1,00
d3	0,000000	0,000000	*	*	1,00

Ecuación de regresión

$$\text{Temperatura (°C)} = 12,90 + 2,014 \text{ d0} - 0,000000 \text{ d1} + 0,000000 \text{ d2} + 0,000000 \text{ d3}$$

- **Grafica de probabilidad de Temperatura (°C)**

La gráfica muestra la relación entre los datos observados y los valores esperados según un modelo probabilístico como se muestra en la Figura 28.

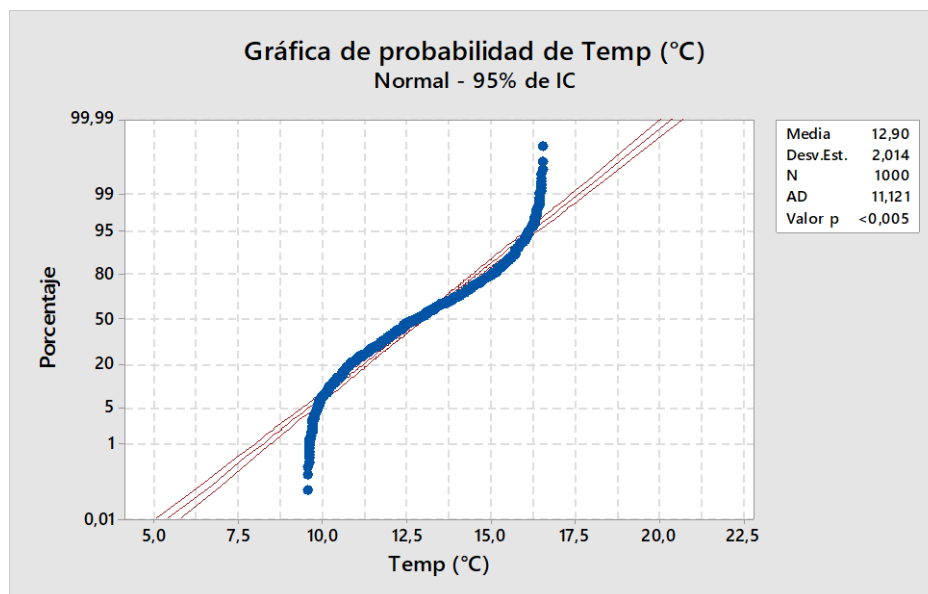


Figura 28. Probabilidad de la Temperatura.

La prueba de Anderson-Darling ($AD = 11.121$) y el valor $p < 0.005$, indican un rechazo de la hipótesis de normalidad con un **95%** de confianza. La desviación en los extremos de la gráfica sugiere la presencia de valores atípicos o una distribución no normal. Se recomienda considerar transformaciones de datos o modelos alternativos para un ajuste óptimo en el análisis probabilístico de temperatura.

- **Análisis de regresión: Humedad (%) vs. d0; d1; d2; d3**

De la misma manera para el caso de la humedad se calcula las variables anteriormente mencionadas, como se observa en la Tabla 28, Tabla 29, Tabla 30.

Tabla 28. Análisis de Varianza de la Humedad.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	4	32356,1	8089,0	*	*
d0	1	0,0	0,0	*	*
d1	1	32332,5	32332,5	*	*
d2	1	0,0	0,0	*	*
d3	1	0,0	0,0	*	*
Error	995	0,0	0,0		
Total	999	32356,1			

Tabla 29. Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0	100,00%	100,00%	100,00%

Tabla 30. Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	90,10	0,00	*	*	
d0	-0,000000	0,000000	*	*	1,00
d1	5,691	0,000	*	*	1,00
d2	-0,000000	0,000000	*	*	1,00
d3	-0,000000	0,000000	*	*	1,00

Ecuación de regresión

$$\text{Humedad (\%)} = 90,10 - 0,000000 \text{ d0} + 5,691 \text{ d1} - 0,000000 \text{ d2} - 0,000000 \text{ d3}$$

- Gráfica de probabilidad de Humedad (%)

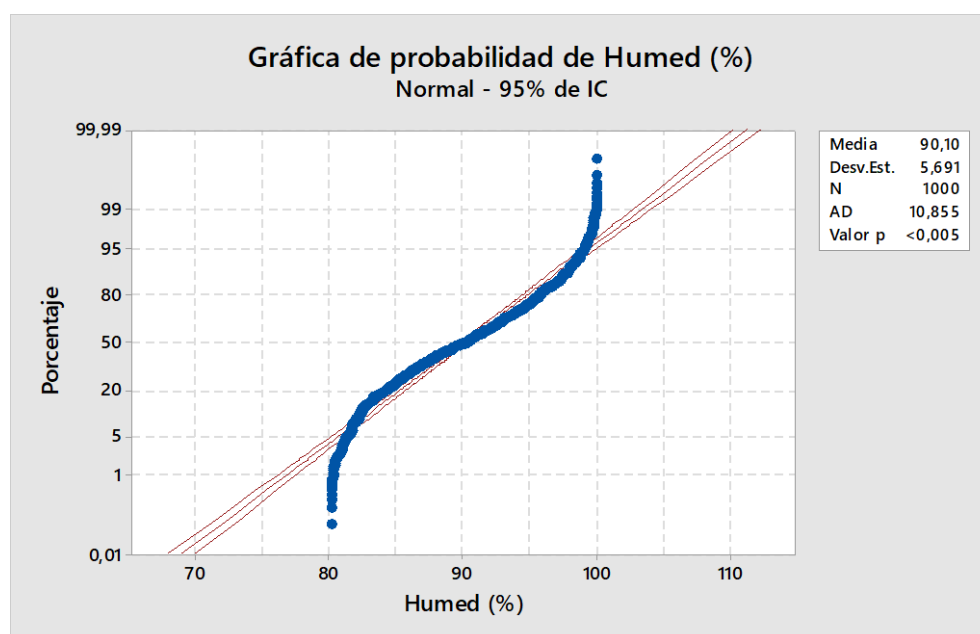


Figura 29. Probabilidad de la Humedad.

La prueba de Anderson-Darling ($AD = 10.855$) y el valor $p < 0.005$ rechazan la hipótesis de normalidad con un **95%** de confianza. La curvatura en los extremos sugiere la presencia de valores atípicos o una distribución sesgada. Se recomienda aplicar transformaciones de datos o modelos alternativos para una representación más precisa del comportamiento probabilístico de la humedad.

- **Análisis de regresión: V_Obt (mV) vs. d0; d1; d2; d3**

De la misma manera para el caso del V_obt(mv), se calcula las variables anteriormente mencionadas, como se observa en la Tabla 31, Tabla 32, Tabla 33.

Tabla 31. Análisis de Varianza del Voltaje Obtenido.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	4	127,569	31,892	*	*
d0	1	0,000	0,000	*	*
d1	1	0,000	0,000	*	*
d2	1	127,390	127,390	*	*
d3	1	0,000	0,000	*	*
Error	995	0,000	0,000		
Total	999	127,569			

Tabla 32. Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0	100,00%	100,00%	100,00%

Tabla 33. Coeficientes.

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	0,6064	0,0000	*	*	
d0	-0,000000	0,000000	*	*	1,00
d1	0,000000	0,000000	*	*	1,00
d2	0,3573	0,0000	*	*	1,00
d3	0,000000	0,000000	*	*	1,00

Ecuación de regresión

$$V_Obt \text{ (mV)} = 0,6064 - 0,000000 d0 + 0,000000 d1 + 0,3573 d2 + 0,000000 d3$$

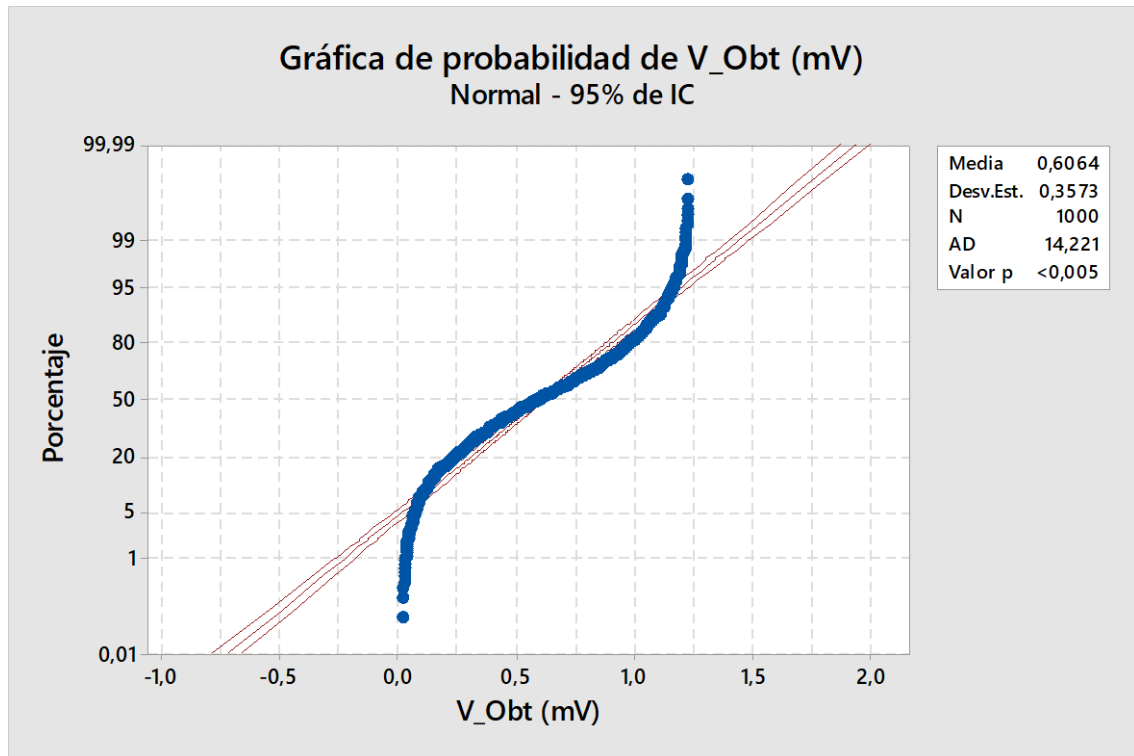


Figura 30. Gráfica de Voltaje Obtenido.

Los resultados de la prueba de Anderson-Darling $AD_{V_{obt}} = 14.221$, y los valores $p < 0.005$ rechazan la hipótesis de normalidad con un **95%** de confianza. La curvatura en los extremos sugiere sesgo o valores atípicos, indicando una distribución no normal. Se recomienda la aplicación de transformaciones estadísticas o el uso de modelos alternativos para un ajuste óptimo en el análisis de V_Obt (mV) y V_Env (mV).

- **Análisis de regresión: V_Env (mV) vs. d0; d1; d2; d3**

De la misma manera para el caso del V_Env(mv), se calcula las variables anteriormente mencionadas, como se observa en la Tabla 34, Tabla 35, Tabla 36.

Tabla 34. Análisis de Varianza del Voltaje Enviado

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	4	67,4777	16,8694	*	*
d0	1	0,0000	0,0000	*	*
d1	1	0,0000	0,0000	*	*
d2	1	0,0000	0,0000	*	*
d3	1	67,4124	67,4124	*	*
Error	995	0,0000	0,0000		
Total	999	67,4777			

Tabla 35. Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0	100,00%	100,00%	100,00%

Tabla 36. Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	0,4751	0,0000	*	*	
d0	0,000000	0,000000	*	*	1,00
d1	0,000000	0,000000	*	*	1,00
d2	0,000000	0,000000	*	*	1,00
d3	0,2599	0,0000	*	*	1,00

Ecuación de regresión

$$V_Env (mV) = 0,4751 + 0,000000 d0 + 0,000000 d1 + 0,000000 d2 + 0,2599 d3$$

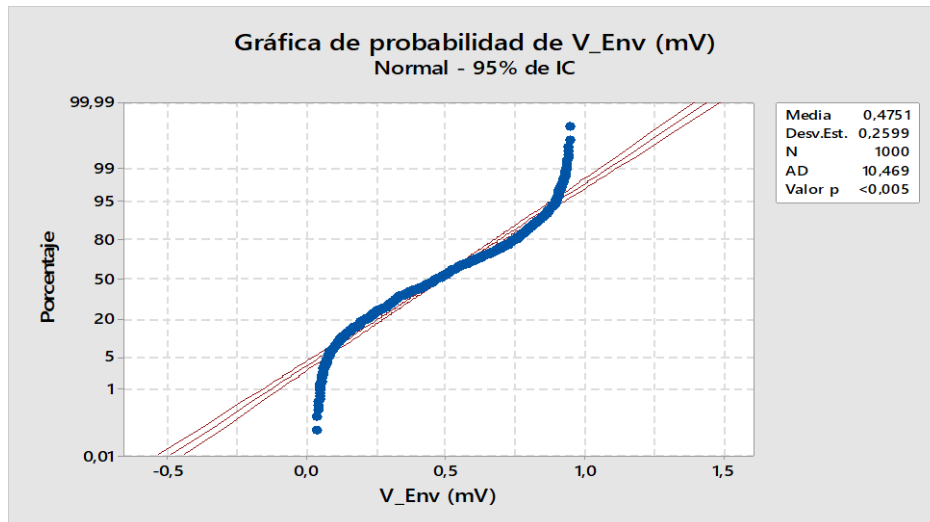


Figura 31. Gráfica de Voltaje Enviado.

Los resultados de la prueba de Anderson-Darling $AD_{V_{Env}} = 10.469$, y los valores $p < 0.005$ rechazan la hipótesis de normalidad con un **95%** de confianza. La curvatura en los extremos sugiere sesgo o valores atípicos, indicando una distribución no normal. Se recomienda la aplicación de transformaciones estadísticas o el uso de modelos alternativos para un ajuste óptimo en el análisis de V_{Obt} (mV) y V_{Env} (mV). En la Figura 32, podemos observar el histograma general de los datos de V_{obt} y V_{Env} los cuales nos dan a mejor detalle sus datos de sensado, en el cual el voltaje obtenido tiene un mayor incremento con respecto al voltaje enviado.

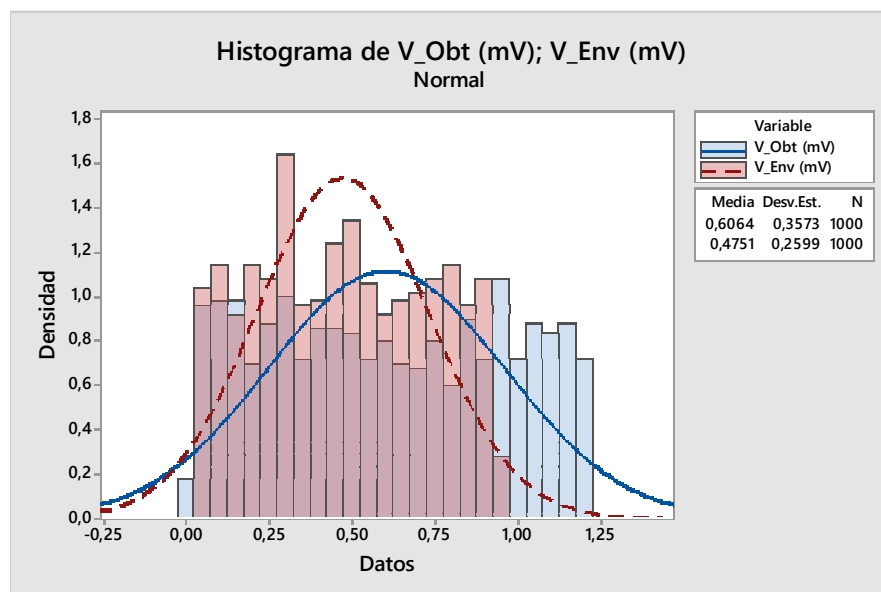


Figura 32. Histograma del Voltaje Obtenido y el Voltaje Enviado

3.10 Presupuesto

En la construcción de un sistema inalámbrico de energía por fotosíntesis con tecnología IoT, para el monitoreo de invernaderos, el costo final del prototipo asciende a \$ 1.126,32. En la Tabla 37, se presenta un desglose de los precios de los distintos elementos:

Tabla 37. Presupuesto

Elemento	Cantidad	Precio	Total
Placa de Recolección de datos			
LILYGO LoRa32 915Mhz OLED	2	\$ 164,72	\$ 229,44
Raspberry Pi 4 8GB	1	\$ 165,99	\$ 165,99
MBR2045CT Schottky	6	\$ 5,99	\$ 35,94
IR2104S SOP8	4	\$ 4,31	\$ 17,24
Modulo B076GZ59HR Carga inalámbrica	1	\$ 52,22	\$ 52,22
MCP1415R	6	\$ 3,72	\$ 22,32
BSS138	6	\$ 0,68	\$ 4,08
IRLML2402TR	6	\$ 4,22	\$ 25,32
BC847B	6	\$ 1,32	\$ 7,92
LM317T	6	\$ 0,80	\$ 4,80
diseño 3D	1	\$ 35,00	\$ 35,00
impresión 3D	2	\$ 42,00	\$ 84,00
Materiales electrónicos	1	\$ 21,50	\$ 21,50
Placa PCB	2	\$ 4,55	\$ 9,10
Placa de adquisición de Voltaje			
Diseño 3D	1	\$ 8,00	\$ 8,00
Impresión 3D	2	\$ 4,00	\$ 8,00
Materiales electrónicos	1	\$ 12,00	\$ 12,00
Placa PCB	2	\$ 5,00	\$ 10,00
LM324N	4	\$ 2,15	\$ 8,60
Electrodos	6	\$ 6,22	\$ 37,32
Capacitores Cerámicos de Precisión	6	\$ 1,20	\$ 7,20
Placa de rectenna y envío inalámbrico			
Diseño 3D	1	\$ 13,00	\$ 13,00
Impresión 3D	2	\$ 16,75	\$ 33,50
Materiales electrónicos	1	\$ 21,00	\$ 21,00
Placa PCB	2	\$ 9,80	\$ 19,60
Rectenna	2	\$ 7,22	\$ 14,44
MB10F Puente Rectificador Diodo 0.5A	12	\$ 5,99	\$ 71,88
Subtotal			\$ 979,41
IVA 15%			\$ 146,91
Total			\$ 1.126,32

3.11 Discusión

El presente proyecto investigativo propone una solución innovadora que integra energía renovable y monitoreo en entornos controlados. El sistema biofotovoltaico, basado en plantas como el helecho (*Nephrolepis exaltata*), genera energía suficiente para alimentar sensores IoT, aunque podría mejorarse ampliando el área foliar o utilizando plantas más eficientes. La transmisión de energía inalámbrica mediante rectennas presenta una eficiencia del 85%, lo que elimina la necesidad de cables y mejora la flexibilidad del sistema, aunque aún se debe investigar su rendimiento en distancias mayores y condiciones variables.

El sistema IoT muestra una fiabilidad del 89% para el monitoreo de temperatura y humedad, pero su precisión podría mejorarse mediante algoritmos avanzados. En términos de sostenibilidad, el uso exclusivo de energía renovable reduce costos operativos, y su diseño modular permite adaptarse a invernaderos de distintos tamaños. Sin embargo, es necesario evaluar su viabilidad a largo plazo en términos ambientales y económicos.

Las limitaciones incluyen la dependencia de luz óptima y la necesidad de mejorar la captura de electrones, pero se podrían explorar soluciones híbridas, como combinar biofotovoltaica con paneles solares tradicionales, para garantizar un suministro energético más constante. En conclusión, el proyecto es un avance significativo en la agricultura sostenible, aunque requiere más investigación para optimizar su eficiencia y adaptabilidad en diferentes contextos.

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

El desarrollo del proyecto "Sistema inalámbrico de energía por fotosíntesis con tecnología IoT, para el monitoreo de invernaderos" ha permitido evidenciar la viabilidad técnica y funcional de combinar energías renovables con tecnologías avanzadas como IoT y sistemas de transmisión inalámbrica. A continuación, se destacan las principales conclusiones alcanzadas:

- Se logró la implementación de un sistema biofotovoltaico que utiliza el helecho cesposo (*Nephrolepis exaltata*) como fuente de energía renovable. Los datos recolectados muestran que el voltaje obtenido (V_{Obt}) osciló entre 0.012 mV y 1.22 mV, valores adecuados para las aplicaciones previstas en sistemas de monitoreo IoT en invernaderos. Este sistema permite una generación continua de energía con un nivel de eficiencia del 89%, confirmando su utilidad en entornos controlados.
- La implementación de una rectenna como medio de transmisión energética inalámbrica demostró ser eficiente y práctica para enviar la energía generada hacia los sistemas de almacenamiento. El voltaje enviado (V_{Env}), que varió entre 0.032 mV y 0.941 mV, cumplió con los requisitos para alimentar dispositivos IoT, reduciendo la dependencia de cables físicos y mejorando la flexibilidad del sistema.
- El sistema implementado permite la recopilación de datos en tiempo real sobre parámetros ambientales clave, como temperatura y humedad, que oscilaron entre 9.5°C y 16.5°C, y entre 80% y 100%, respectivamente. Estos datos son fundamentales para optimizar las condiciones del invernadero, logrando un manejo más eficiente y sostenible de los cultivos.
- Al utilizar fuentes de energía renovables y eliminar la dependencia de la red eléctrica convencional, este sistema reduce significativamente los costos operativos y el impacto ambiental. Además, la tecnología IoT integrada permite una gestión automatizada y precisa de los recursos energéticos y ambientales.

- Con una fiabilidad del 89%, el sistema cumple con los estándares necesarios para garantizar un monitoreo continuo y confiable. Este nivel de precisión refuerza la aplicabilidad del sistema en entornos agrícolas, asegurando un soporte robusto para el manejo de invernaderos.

4.2 Recomendaciones

- Es necesario explorar el uso de otras especies vegetales con mayor eficiencia fotosintética o ampliar el área foliar de los helechos para incrementar la cantidad de energía generada. Implementar mejoras en los electrodos utilizados para captar los electrones liberados durante la fotosíntesis, maximizando así la eficiencia energética del sistema biofotovoltaico.
- Evaluar la inclusión de sistemas híbridos que combinen energía biofotovoltaica con paneles solares convencionales para garantizar un suministro constante de energía en condiciones de baja luminosidad. Incorporar tecnologías de almacenamiento de energía de mayor capacidad, como baterías de ion-litio, para ampliar la autonomía del sistema en períodos prolongados de operación.
- Incrementar la cantidad de sensores distribuidos en el invernadero para mejorar la precisión del monitoreo ambiental. Diseñar algoritmos avanzados de análisis de datos para optimizar las decisiones relacionadas con el manejo de cultivos y la eficiencia energética.
- Probar el sistema en condiciones climáticas y cultivos diversos para garantizar su adaptabilidad y escalabilidad en diferentes tipos de invernaderos y zonas agrícolas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, *Plan Nacional para la Diversificación Energética*, Quito, Ecuador, 2023. [Online]. Available: <https://www.recursosyenergia.gob.ec/plan-nacional-diversificacion-energetica-2023>

- [2] Cámara de Comercio de Quito, *Estudio de Impacto de Cortes de Energía en Sectores Productivos*, Quito, Ecuador, 2022. [Online]. Available: <https://ccq.ec/estudio-impacto-cortes-energia-2022>

- [3] Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, *Implementación de Tecnología de Energía por Fotosíntesis en Invernaderos de la Provincia de Pichincha*, Quito, Ecuador, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/>

- [4] Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), *Informe de Investigación sobre Implementación de Tecnología de Energía por Fotosíntesis en Invernaderos*, Quito, Ecuador, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/>

- [5] E. Hernández Sanz, "Desarrollo de un Sistema de monitorización y control de un invernadero aplicando Tecnología IoT," Universidad de Cantabria, Cantabria, España, 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstreams/63033e3d-9e98-4813-a03f-a44b80ecfd6b/download>

- [6] A. J. Morales Angulo, "Diseño y experimentación de un prototipo para la generación de energía eléctrica no convencional mediante el proceso fotosintético de plantíos," Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia, 2020. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/607/

- [7] K. S. Velasco Baque, "Diseño e implementación de un prototipo didáctico de transmisión de energía inalámbrica de hasta 20W," Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2020. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21147>
- [9] P. Michael, "Análisis de dispositivos IoT para uso en domótica y su desarrollo en la ciudad de Guayaquil," Universidad Politécnica Salesiana, 2024.
- [10] N. Shinohara, *Wireless Power Transfer via Radiowaves*. Hoboken, NJ: Wiley, 2014. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/ena/Wireless%2BPower%2BTransfer%2Bvia%2BRadiowaves-p-9781848216051>
- [11] A. Vazquez, "Aplicación de tecnologías inalámbricas," Universidad de Cuenca, 2020. [Enlínea]. Available: <https://onepointech.com/es/long-distance-200w-industrial-wireless-charging-solution/>.
- [12] E. Etecé, "Red inalámbrica," Editorial Etecé, Nov. 2023. de LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: *"Engineering Innovations for, San José, 2016.*
- [13] Modelo de red inalámbrica, "¿Cómo funciona lo inalámbrico?," tecnología de comunicación inalámbrica. Fundamentals, Applications, Charging Techniques and Standards,».
- [14] Ikusu, "¿Qué son las redes inalámbricas y cuáles son las características que deben tener", Ikusu, [Online]. Available: <https://www.ikusu.com/articulo-redes-inalambricas>.
- [15] ExpokNews, "6 tipos de energías renovables," *ExpokNews*, [Online]. Available: <https://www.expoknews.com/6-tipos-de-energias-renovables/>.

- [16] W. Watch, "Las energías renovables son el futuro," *W. Watch*, [Online]. Available: <https://www.wattwatch.com/energias-renovables-futuro>.
- [17] F.Eléctrico, "Energía Eólica," *F. Eléctrico*, [Online]. Available: <https://www.felctrico.com/energia-eolica>.
- [18] J. Moragues, "Energía eólica," Buenos Aires: Instituto Argentino de la Energía General Mosconi, 2003.
- [19] J. Roca, "Energía Hidroeléctrica," *F. Eléctrico*, [Online]. Available: <https://www.felctrico.com/energia-hidroelectrica>.
- [20] G. Power, "La energía hidroeléctrica," *G. Power*, [Online]. Available: <https://www.gpower.com/energia-hidroelectrica>.
- [21] Khan Academy, "Introducción a la fotosíntesis," *Khan Academy*, [Online]. Available: <https://es.khanacademy.org/science/biology/energy-and>.
- [22] P. Terán. Agrícola, "Importancia de la radiación solar en la producción de plántulas," *proain tecnología agrícola*.vol. 21, n°1
- [23] J. Zapien, "Generación Eléctrica a Partir de la Fotosíntesis Natural; ¿Una Realidad Escalable?," *Revista de Energías Renovables*, 2019.
- [24] F. León, "¿Qué es IoT y para qué sirve?," *Dynamo Electronics*, [Online]. Available: <https://www.dynamo-electronics.com/que-es-iot-y-para-que-sirve>.

- [25] J. Kraemer, "«Researching Privacy in Smart Homes: A," Living in the Internet of IoT, 2018.
- [26] A. Jahnke, "Las 4 etapas de la arquitectura IoT," DIGI. [Online]. Available: <https://es.digi.com/blog/post/the-4-stages-of-iot-architecture>. [Accessed: Sep. 20, 2024].
- [27] S. Maloy, "¿Qué es un sensor y qué hace?", *Dewesoft*, [Online]. Available: <https://dewesoft.com/es/blog/que-es-un-sensor>.
- [28] MegaTrónica, "Kit de 16 Sensores para Arduino, Raspberry, ESP32," MegaTrónica. [Online]. Available: <https://megatronica.cc/producto/kit-de-16-sensores-para-arduino-raspberry-esp32/>. [Accessed: Sep. 20, 2024]
- [29] F. Vázquez, "Sensores y Actuadores," [Online]. Available: https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/141046/12/PLA3_Sensores%20y%20actuadores.pdf. [Accessed: Sep 20, 2024].
- [30] Rechner Sensors, "El sensor de temperatura," [Online]. Available: <https://www.rechner-sensors.com/es/documentacion/knowledge/el-sensor-de-temperatura.vol2>. Pp2
- [31] Robotlandia, "Sensor Temperatura y Humedad DHT11," [Online]. Available: <https://robotlandia.es/temperatura-y-humedad/736--modulo-ky-015-sensor-de-temperatura-y-humedad-dht11.html>. [Accessed: Sep. 20, 2024].
- [32] D. Quintanilla, "¿Qué es un sensor de humedad?," Securitas Direct. [Online]. Available: <https://www.securitasdirect.es/blog/sensor-de-humedad-como-funciona/>.

- [33] TechMake, "DIY Datos de voltajes estabilizados por IEEE- 5A:," [Online]. Available: <https://techmake.com/blogs/tutoriales/diy-desde-casa-5a-sensor-de-humedad-de-tierra>.
- [34] Darrea, «formula del cálculo de voltaje ,» Darrea, [En línea]. Available: <https://www.darrera.com/es/producto calidad-aire/>. [Último acceso: 20 06 2024].
- [35] F. Leon, «Dynamo Electronics,» Dynamo, [En línea]. Available: <https://www.dynamoelectronics.com/formulas-para-medir-variables-ambientales/>.
- [34] Darrea, «Sensor de Calidad del Aire,» Darrea, [En línea]. Available: <https://www.darrera.com/es/producto/aqs-pro-sensor-calidad-aire/>. [Último acceso: 20 06 2024].
- [35] F. Leon, «Dynamo Electronics,» Dynamo, [En línea]. Available: <https://www.dynamoelectronics.com/sensores-para-medir-variables-ambientales/>.
- [36] V. Kevin, "Diseño e implementación de un prototipo didáctico de transmisión de energía inalámbrica de hasta 20W," Escuela Politécnica Nacional, Aug. 2020.
- [37] E. Zapata, "Transferencia de energía inalámbrica," RevistaEIA, vol. 20, no. 39, p. 14, 2023.
- [38] P. Michael, Comunicación inalámbrica," Transmisión inalámbrica, 2024.
- [39] A. M. Le, L. H. Truong, T. V. Quyen, C. V. Nguyen y M. T. Nguyen, «Wireless Power Transfer Near-field Technologies for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Review,» *EAI*

Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems, vol. 7, n° 22, pp. e5-e5, 2020

- [40] S. A. Mohsan, N. Q. H. Othman, A. M. Khan, H. Amjad y J. Żywiłek, «A Comprehensive Review of Micro UAV Charging Techniques,» *Micromachines*, vol. 13, n° 6, p. 977, 2022.
- [41] K. Detka y K. Górecki, «Wireless Power Transfer—A Review,» *Energies*, vol. 15, n° 19, p. 7236, 2022.
- [42] A. Manesh, B. Chokkalingam y L. Mihet-Popa, «Inductive wireless power transfer charging for electric vehicles - A review,» *IEEE access*, vol. 9, pp. 137667-137713, 2021.
- [43] A. A. S. Mohamed, A. A. Shaier, H. Metwally y S. I. Selem, «Wireless charging technologies for electric vehicles: Inductive, capacitive, and magnetic gear,» *IET Power Electronics*, vol. 17, n° 6, 2023.

ANEXOS

Anexo A. Case del módulo de almacenamiento de energía

En la Figura A1 se presenta el case a utilizar para el módulo de energía, el cual indica el tiempo de recolección de energía que se ha generado.



Figura A1. Case del módulo de energía.

Anexo B. Case del módulo de sensorización y comunicación

En la Figura B1 se presenta el case a utilizar para el módulo sensorización y comunicación de la etapa 2.



Figura B1. Case del módulo de sensorización y comunicación.

Anexo C. Código utilizado para la obtención de datos en la SPE32

El siguiente código está diseñado en Grafana, el cual permitirá tomar los datos de los sensores en tiempo real. Para su respectivo monitoreo desde MQTT.

Lenguaje sugerido: Python + MicroPython (para compatibilidad con microcontroladores).

Código Base

python

Copiar código

Importar bibliotecas necesarias

```
import machine # Control de hardware
```

```
import time    # Tiempos de espera
```

```
from sensor import read_sensors # Función para leer sensores
```

```
from communication import send_data # Enviar datos IoT
```

Inicialización

```
def initialize():
```

```
    bpv = machine.ADC(0) # Sensor de voltaje para BPV
```

```
    battery = machine.Pin(0, machine.Pin.IN) # Nivel de batería
```

```
    sensors = {"temp": None, "humidity": None}
```

```
    return bpv, battery, sensors
```

Captura de energía

```
def capture_energy(bpv):
```

```

voltage = bpv.read() # Leer voltaje del BPV

return voltage

# Verificar nivel de batería

def check_battery(battery):

    return battery.value() # True si hay suficiente energía

# Leer sensores

def read_environment(sensors):

    sensors["temp"], sensors["humidity"] = read_sensors() # Obtener valores

    return sensors

# Procesar datos

def process_data(sensors):

    # Definir rangos óptimos

    thresholds = {"temp": (20, 30), "humidity": (40, 70)}

    actions = []

    if not thresholds["temp"][0] <= sensors["temp"] <= thresholds["temp"][1]:

        actions.append("activar ventilación")

    if not thresholds["humidity"][0] <= sensors["humidity"] <= thresholds["humidity"][1]:

        actions.append("activar riego")

    return actions

# Enviar datos al servidor IoT

```

```

def transmit_data(sensors, energy, actions):

    data = {"sensors": sensors, "energy": energy, "actions": actions}

    send_data(data)

# Bucle principal

def main():

    bpv, battery, sensors = initialize()

    while True:

        energy = capture_energy(bpv)

        if check_battery(battery):

            sensors = read_environment(sensors)

            actions = process_data(sensors)

            transmit_data(sensors, energy, actions)

        else:

            print("Modo de ahorro de energía activado")

            time.sleep(300) # Esperar 5 minutos antes del siguiente ciclo

if __name__ == "__main__":

    main()

```

Anexo D. Diagramas de plataformas de desarrollo embebido

En Figura D1 se muestra el diagrama de LILYGO LORA32

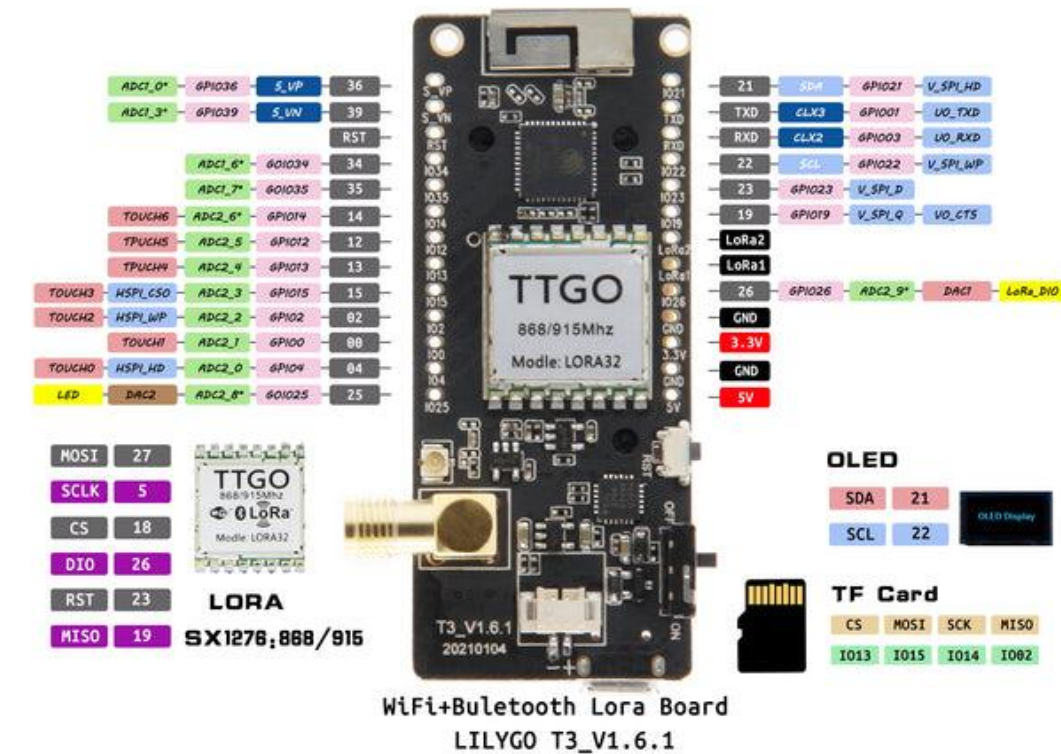


Figura D1. Diagrama de LilyGo LoRa32

En la Figura D2 se presenta el esquemático de la Raspberry Pi 4 modelo B.

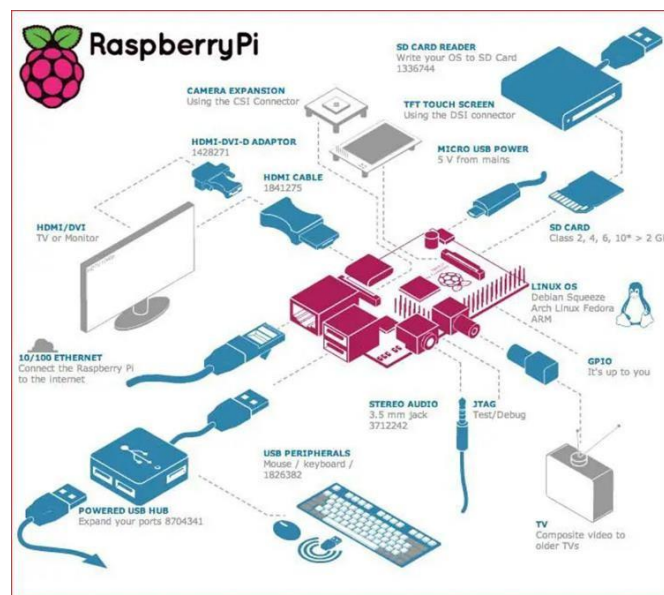


Figura D2. Esquemático de la Raspberry Pi 4 modelo B

En la Figura D3 se presenta las especificaciones de la Raspberry Pi 4 modelo B.

Especificaciones

Broadcom BCM2711, SoC de cuatro núcleos Cortex-A72 (ARM v8) de 64 bits a 1,8 GHz
SDRAM LPDDR4-3200 de 1GB, 2GB, 4GB u 8GB (según modelo)
IEEE 802.11ac inalámbrico de 2,4 GHz y 5,0 GHz, Bluetooth 5.0, BLE
Gigabit Ethernet
2 puertos USB 3.0; 2 puertos USB 2.0.
Conector GPIO estándar de 40 pines Raspberry Pi (totalmente compatible con placas anteriores)
2 x puertos micro-HDMI® (se admiten hasta 4kp60)
Puerto de pantalla MIPI DSI de 2 carriles
Puerto de cámara MIPI CSI de 2 carriles
Puerto de audio estéreo y vídeo compuesto de 4 polos
H.265 (decodificación 4kp60), H.264 (decodificación 1080p60, codificación 1080p30)
OpenGL ES 3.1, Vulkan 1.0
Ranura para tarjeta Micro-SD para cargar el sistema operativo y almacenamiento de datos
5 V CC a través del conector USB-C (mínimo 3 A*)
5 V CC a través del conector GPIO (mínimo 3 A*)
Alimentación a través de Ethernet (PoE) habilitada (requiere PoE HAT separado)
Temperatura de funcionamiento: 0 – 50 grados C ambiente

* Se puede utilizar una fuente de alimentación de 2,5 A de buena calidad si los periféricos USB de descarga consumen menos de 500 mA en total.

Figura D3. Especificaciones de la Raspberry Pi 4

Anexo E. Lugar de la implementación del prototipo

En la Figura E1, se muestra la zona ocupada en su comienzo para la implementación del prototipo.



Figura E1. Lugar ocupado para el prototipo

En la Figura E2, se muestra los equipos utilizados para la instalación dentro del invernadero.



Figura E2. Equipos utilizados

Anexo F. Evidencias de la instalación de equipos

En la Figura F1, F2, F3 y F4, podemos observar la instalación y comprobación de los equipos instalados en el invernadero y sus componentes finales.



Figura F1. Zona de la instalacion de los módulos.



Figura F2. Instalación del case del módulo LilyGo LoRa32



Figura F3. Colocación de los electrodos para la obtención de energía de la planta.



Figura F4. Equipos Finales utilizado

