

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO / INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

TÍTULO DE LA TESIS

Sistema de recolección de energía eléctrica múltiple para aplicaciones autónomas de localización.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

Fausto Yair González García

DIRECTOR DE TESIS

DR. ALBINO MARTÍNEZ SIBAJA

CODIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ PASTOR RODRÍGUEZ JARQUIN

Orizaba, Veracruz, 12/septiembre/2024

Dependencia: División de Estudios de

Posgrado e Investigación

Asunto: Autorización de Impresión

OPCIÓN: I

C. FAUSTO YAIR GONZÁLEZ GARCÍA

Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

P R E S E N T E.-

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MÚLTIPLE PARA
APLICACIONES AUTÓNOMAS DE LOCALIZACIÓN".

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®



DRA. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
ENCARGADA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



C. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Orizaba, Veracruz, 19/agosto/2024
Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

FAUSTO YAIR GONZÁLEZ GARCÍA

La cual lleva el título de:

**“SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MÚLTIPLE PARA APLICACIONES
AUTÓNOMAS DE LOCALIZACIÓN”**

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. ALBINO MARTÍNEZ SIBAJA



—
FIRMA

SECRETARIO: DR. JOSÉ PASTOR RODRÍGUEZ JARQUIN



—
FIRMA
—
FIRMA

VOCAL: DR. IGNACIO HERRERA AGUILAR



—
FIRMA
—
FIRMA

VOCAL SUP.: M.C. ENRIQUE ALEJANDRO CUELLAR
CORTÉS

TA-09-18



CONTENIDO

CONTENIDO	2
LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE TABLAS	5
AGRADECIMIENTOS	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	9
1.2 PROBLEMÁTICA	10
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	10
1.4 HIPÓTESIS.....	11
1.5 OBJETIVO GENERAL.....	11
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.7 METODOLOGÍA.....	12
1.8 ESTADO DEL ARTE.....	13
1.9 ALCANCES.....	18
1.10 LÍMITES.....	18
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 RESUMEN.....	¡Error! Marcador no definido.
2.2 ANTECEDENTES	19
2.3 SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA	20
2.4 SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGIA SOLAR	21
2.4.1 EFECTO FOTOVOLTAICO.....	21
2.4.2 CELDAS SOLARES.....	22

2.4.3 HORAS DE SOL PICO	24
2.4.4 ÁNGULO DE INCLINACIÓN	25
2.4.5 ÁNGULO DE AZIMUT	26
2.5 SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA	26
2.5.1 EFECTO SEEBECK	27
2.5.2 EFECTO PELTIER	28
2.5.3 EFECTO THOMSON	29
2.6 SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA	30
2.6.1 EFECTO PIEZOLEÉCTRICO	30
2.6.2 ESTRUCTURAS DE DISPOSITIVOS DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA	31
2.6.3 MODELADO DE UN PIEZOLEÉCTRICO	33
2.7 CONVERTIDORES DE ENERGÍA DE CD-CD TIPO ELEVADOR	36
2.7.1 IC DE ADMINISTRACIÓN DE ENERGÍA (PMIC)	37
2.8 COMUNICACIÓN POR RF Y GSM	38
2.8.1 Comunicación por GSM	42
CAPÍTULO 4. DESARROLLO	43
4.1 ELECCIÓN DE SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA	45
4.2 COMPONENTES UTILIZADOS	47
REFERENCIAS	56
ANEXOS	61

LISTA DE FIGURAS

ILUSTRACIÓN 1. EFECTO FOTOVOLTAICO	21
ILUSTRACIÓN 2. TIPOS DE CELDAS SOLARES	23
ILUSTRACIÓN 3. PARÁMETROS DE LA PLATAFORMA	24
ILUSTRACIÓN 4. HORAS DE SOL PICO POR DÍA EN MÉXICO	25

ILUSTRACIÓN 5 (WHICH DIRECTION SHOULD YOUR SOLAR PANELS FACE - SOLARDESIGNGUIDE, 2021)	26
ILUSTRACIÓN 6. DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN ENERGÍA TERMOELÉCTRICA.....	27
ILUSTRACIÓN 7. APLICACIÓN DEL EFECTO SEEBECK EN LA RECOLECCIÓN DE ENERGÍA TERMOELÉCTRICA.....	28
ILUSTRACIÓN 8. SE MUESTRA EL EFECTO PELTIER Y EL EFECTO THOMSON.....	29
ILUSTRACIÓN 9. GENERACIÓN DE VOLTAJE A TRAVÉS DE UN PIEZOELÉCTRICO.....	31
ILUSTRACIÓN 10. CONFIGURACIONES COMUNES DE PIEZOELÉCTRICOS PARA LA RECOLECCIÓN DE ENERGÍA, (A), (B) CONFIGURACIONES DE MODO DE RESONANCIA, (C), (D) CONFIGURACIONES FUERA DE RESONANCIA.	31
ILUSTRACIÓN 11 . DIAGRAMA CIRCUITO ELEVADOR.....	36
ILUSTRACIÓN 12. CONFIGURACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE SIGFOX.....	40
ILUSTRACIÓN 13. LORAWAN ARQUITECTURA.....	41
ILUSTRACIÓN 14. ESTRUCTURA COMUNICACIÓN GSM.....	42
ILUSTRACIÓN 15. CONSUMO DE ENERGÍA CUANDO EL DISPOSITIVO SE ENCUENTRA EN MODO DORMIDO.	43
ILUSTRACIÓN 16. CONSUMO DE ENERGÍA CUANDO EL DISPOSITIVO SE LE SOLICITA SU UBICACIÓN.	44
ILUSTRACIÓN 17. PRUEBA DE CONSUMO DE ENERGÍA CON COMUNICACIÓN CELULAR.....	45
ILUSTRACIÓN 18. MODELO DE PIEZOELÉCTRICO UTILIZADO.	46
ILUSTRACIÓN 19. DATOS DEL COMPORTAMIENTO DEL PIEZOELÉCTRICO.	46
ILUSTRACIÓN 20 PRUEBA DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA SOLAR.....	47
ILUSTRACIÓN 21. MICROCONTROLADOR ATMEGA328P-MMHR.....	48
ILUSTRACIÓN 22. MÓDULO WSSFM10R2	48
ILUSTRACIÓN 23 . MÓDULO GPS SIM33ELA.....	49
ILUSTRACIÓN 24 CIRCUITO INTEGRADO DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA.	49
ILUSTRACIÓN 25. CELDAS SOLARES KXOB25-14X1F	50
ILUSTRACIÓN 26. PCB FINAL.....	50
ILUSTRACIÓN 27. CONSUMO DE ENERGÍA EN MODO DORMIDO CON SIGFOX.	51
ILUSTRACIÓN 28. PROMEDIO DE TODO EL CICLO DE SIGFOX.	51
ILUSTRACIÓN 29. PRUEBAS DE CONSUMO DE ENERGÍA CON COMUNICACIÓN SIGFOX.	52
ILUSTRACIÓN 30. COBERTURA SIGFOX.	53

ILUSTRACIÓN 31. MENSAJES RECIBIDOS.....	54
ILUSTRACIÓN 32. ESQUEMÁTICO DEL DISPOSITIVO.....	61
ILUSTRACIÓN 33. DISEÑO DE PCB.....	61
ILUSTRACIÓN 34. MODELO 3D DEL DISPOSITIVO.....	62

LISTA DE TABLAS

TABLA 1	22
TABLA 2	23
TABLA 3	32
TABLA 4	33
TABLA 5	35
TABLA 6	37
TABLA 7	41
TABLA 8	52

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se centra en la implementación de un sistema de recolección de energía para mejorar la autonomía de un dispositivo de rastreo. Se evaluaron y compararon dos tecnologías de comunicación: GSM y Sigfox (LPWAN), con el objetivo de determinar su viabilidad con el sistema de energía propuesto. La recolección de energía es esencial para garantizar el funcionamiento continuo de estos dispositivos en una variedad de aplicaciones, desde la monitorización de especies, hasta la coordinación y control de vehículos. Se consideró que la implementación del sistema de recolección solar es la opción más viable debido a su amplia investigación y desarrollo, así como el favorable entorno donde se planea utilizar el dispositivo. La zona donde se prevé desplegar el dispositivo goza de una significativa exposición solar, lo que sugiere que la energía solar podría ser aprovechada de manera adecuada. Al utilizar celdas solares en conjunto con un convertidor elevador de baja potencia, se logró una potencia de aproximadamente 80 mW, lo que proporciona la energía necesaria para mantener el dispositivo funcionando y recargarse de manera continua. Se investigan dos tecnologías de comunicación comunes: GSM, idónea para entornos urbanos debido a su amplia cobertura de red y su capacidad para gestionar altas densidades de tráfico de datos; y comunicación Sigfox que es una comunicación LPWAN (Red de área amplia de bajo consumo) preferida en áreas remotas junto a su capacidad de transmitir señales a larga distancia con menor consumo de energía.

ABSTRACT

This thesis focuses on the implementation of an energy harvesting system to enhance the autonomy of a tracking device. Two communication technologies, GSM and Sigfox (LPWAN), were evaluated and compared to determine their compatibility with the proposed energy system. Energy harvesting is essential to ensure the continuous operation of these devices in various applications, from species monitoring to vehicle coordination and control. The implementation of a solar harvesting system was considered the most viable option due to its extensive research and development, as well as the favorable environment where the device is planned to be deployed. The deployment area benefits from significant solar exposure, suggesting that solar energy could be effectively utilized. By using solar cells in conjunction with a low-power boost converter, an approximate power of 80 mW was achieved, providing the necessary energy to keep the device operational and continuously recharge. Two common communication technologies were investigated: GSM, suitable for urban environments due to its extensive network coverage and ability to handle high data traffic densities; and Sigfox communication, which is an LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) communication preferred in remote areas due to its capability to transmit signals over long distances with lower energy consumption.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El uso de dispositivos de rastreo se ha vuelto cada vez más común en distintos campos, desde la logística hasta la agricultura, pasando por la seguridad y la monitorización de personas y animales. Estos dispositivos de rastreo, permiten localizar y seguir la trayectoria de un objeto o individuo en tiempo real, están compuestos por diferentes componentes electrónicos que requieren de una fuente de energía para funcionar.

Según un estudio reciente realizado por Bodkhe et al. (2024), la preocupación por la seguridad durante los viajes en solitario o nocturnos es una queja frecuente entre la población, ya que la seguridad es la principal preocupación. Es crucial ofrecer un seguimiento de ubicación de emergencia para que el público en general pueda desplazarse o visitar cualquier destino con seguridad, incluso en horas no convencionales. Considerando estos aspectos, los dispositivos de rastreo GPS han surgido como una herramienta prometedora para proporcionar una vigilancia continua y una respuesta rápida.

Sin embargo, el uso de baterías para suministrar energía en dispositivos de rastreo, especialmente en lugares remotos o de difícil acceso, puede verse limitado por la duración de la carga de las baterías, lo que puede provocar una disminución en el rendimiento y la precisión del dispositivo de rastreo. Es por ello que el uso de tecnologías de recolección de energía se ha vuelto cada vez más atractiva para los diseñadores de estos dispositivos.

La recolección de energía, se refiere al proceso de obtención de energía a partir de fuentes alternativas como la luz solar, el calor o las vibraciones mecánicas. Esta energía puede ser transformada y almacenada para alimentar los componentes electrónicos de los dispositivos de rastreo, permitiendo así su funcionamiento sin necesidad de cambiar o recargar baterías con regularidad.

1.2 PROBLEMÁTICA

Existen dispositivos de rastreo que se utilizan para monitorear la ubicación de vehículos y garantizar su seguridad. Estos dispositivos suelen estar incrustados en la carrocería del coche, con un tamaño estratégico de visualización y una batería de ion de litio de 500mAh. Sin embargo, la capacidad limitada de estas baterías es un desafío importante, ya que su baja potencia implica que la duración máxima de uso sea de sólo dos días, lo que puede resultar insuficiente para ciertas aplicaciones. Además, la señal de localización del dispositivo puede perderse si la batería se agota antes de tiempo. Por lo tanto, la problemática es cómo aumentar la duración de la batería de los dispositivos de rastreo incrustados en la carrocería del coche para garantizar una comunicación ininterrumpida y una mayor seguridad en su utilización. Se requiere una solución innovadora para mejorar la eficiencia energética de estos dispositivos, que permita una mayor duración de la batería sin sacrificar la precisión de la señal de localización y el diseño del tamaño.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Con el avance de la tecnología se han desarrollado localizadores GPS de vehículos capaces de obtener datos precisos en un determinado tiempo. Sin embargo, existen todavía escasas mejoras en términos de recolección de la energía.

No obstante, para un mundo en el que la importancia de la localización en diversos artefactos ha aumentado el interés social, el uso de localizadores puede ayudar a rastrear en áreas y obtener datos críticos para propósitos específicos. El acoplamiento de un sistema de recolección de energía a un dispositivo de localizador manifestaría un progreso destacado.

Al respecto, se considera que, la recolección de energía es la conversión de energía no utilizada o desperdiciada en el ambiente en energía eléctrica útil. Se puede utilizar para alimentar pequeños sistemas electrónicos como sensores inalámbricos y está comenzando a permitir el uso generalizado y libre de mantenimiento [1] esta actualización permite enriquecer el trabajo, donde también se hace un ejercicio de reflexión donde se destaca el avance continuo de los sistemas de recolección de energía.

Por ello, se ha derivado al requerimiento de uso de los sistemas de recolección de energía, lo que ayudarán a extraer una pequeña cantidad de energía del entorno ambiental donde se encuentre ubicado el vehículo y así obtener una mayor autonomía del dispositivo, lo que permitirá la accesibilidad de más tiempo a nuestro sistema de localización.

1.4 HIPÓTESIS

1.- Es factible implementar un sistema de recolección de energía para una batería de ion de litio que le permita mejorar la autonomía de un dispositivo de rastro en vehículos.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema de recolección y almacenamiento de energía que mejore la eficiencia y ofrezca la potencia necesaria que permita extender la autonomía de un dispositivo de rastreo en vehículos.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar información para la generación de Estado del Arte, Estado de campo y marco teórico al proyecto a desarrollar.
- Determinar el tipo de sistema de recolección de energía que se pueda adaptar al sistema de localización
- Analizar los convertidores de CD/CD para la aplicación de baja potencia.

1.7 METODOLOGÍA

Actividad	Tareas	Producto obtenido
Revisión del estado del arte, estado del campo y marco teórico.	Investigar, seleccionar y organizar información en revistas científicas, plataformas de universidades.	Compilar distintos trabajos con la finalidad de analizar sus resultados obtenidos y cuales nos pueden servir para el proyecto.
Identificar el sistema de recolección de energía adecuado para el sistema.	Comparar las ventajas y desventajas de cada sistema de recolección de energía y elegir el adecuado para el dispositivo.	Sistema que se ocupara para el proyecto.
Identificar un convertidor ideal de CD/CD de baja potencia	Analizar y elegir convertidor de CD/CD de baja a potencia a ocupar.	Esquema eléctrico, componentes a ocupar.
<i>Diseñar la estrategia del manejo de energía.</i>	Optimizar la mayor energía posible	Tener la menor cantidad de pérdidas de energía.
Probar hasta obtener la mejor configuración	Desarrollo de pruebas en distintos lugares.	Resultados finales.

1.8 ESTADO DEL ARTE

El estado del arte en una tesis constituye una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con el tema de investigación. Esta sección busca situar el trabajo dentro del contexto más amplio de la disciplina, analizando estudios previos, teorías y modelos. La revisión destaca brechas en el conocimiento, limitaciones y áreas sin explorar, justificando la necesidad de la nueva investigación. El objetivo de esta sección es demostrar la comprensión del autor sobre el estado actual del campo y establecer la relevancia y originalidad del trabajo.

Se dará inicio a la investigación a partir del artículo de Bäumker et al. (2021). El proyecto aborda la creación de un sensor inalámbrico de recolección de energía para el seguimiento de iguanas rosadas en entornos hostiles. Este localizador implementa un sistema de recolección de energía solar y se ha aplicado con éxito en áreas carentes de infraestructura de comunicación. El dispositivo, con bajo consumo y un conjunto de sensores variados, tiene una vida útil promedio de año y medio. La innovación radica en su capacidad para funcionar sin necesidad de batería, a diferencia de los localizadores comerciales convencionales. Este artículo sienta las bases para la investigación al ofrecer un enfoque pionero en la monitorización de especies en entornos desafiantes, proporcionando un panorama mejor para el desarrollo posterior de la investigación propuesta.

El estudio realizado por Salazar y Marulanda (2021) se enfocó en el proyecto "Diseño de un sistema de recolección de energía solar para el suministro de energía a un nodo sensor inalámbrico autónomo". El propósito principal fue desarrollar sistemas que aprovechen la energía solar de manera eficiente, con el objetivo de asegurar el rendimiento de las redes inalámbricas de sensores a costos bajos.

Los resultados obtenidos revelaron una notable autonomía del nodo sensor alimentado por el sistema solar propuesto, especialmente diseñado para sostener una comunicación inalámbrica en la cual se envían paquetes de datos cada 20 minutos. Como conclusión, Salazar y Marulanda determinó que el sistema demostró su utilidad al evaluar el consumo real de un nodo sensor inalámbrico, destacando la eficacia de un paquete compuesto por dos celdas de baterías de iones de litio. Este artículo proporciona valiosa información para comprender cómo la recolección de

energía solar puede ser implementada eficientemente en nodos sensores inalámbricos autónomos.

El trabajo desarrollado por Hossain et al. (2021) se centró en el proyecto "Recolección de energía solar del pavimento de asfalto". El objetivo principal de este proyecto era diseñar una nueva técnica para recolectar energía solar a partir de pavimentos de asfalto. La propuesta consiste en una caja solar de pavimento que incorpora una muestra de policarbonato transparente y un panel solar de película delgada. Este dispositivo tiene la capacidad de acumular energía en una batería durante el día y convertirla en energía eléctrica según sea necesario.

Los resultados obtenidos indican que la caja solar de pavimento propuesta puede generar un promedio de cargas en el campo de 23.7 W/m^2 de manera continua durante 6 horas al día en condiciones de sol. Como conclusión, Hossain et al. sugieren que esta técnica de instalación puede ser implementada en cruces de peatones e intersecciones para alertar a conductores distraídos en momentos de paso de peatones, lo que posiblemente contribuirá a mejorar la seguridad de los peatones. Este artículo proporciona información valiosa sobre una novedosa técnica de recolección de energía solar y su aplicación potencial en entornos urbanos para aumentar la conciencia y seguridad vial.

La investigación llevada a cabo por Akay et al. (2018) se enfocó en el proyecto "Bota de combate de recolección de energía para posicionamiento satelital". El objetivo central de este estudio era desarrollar una bota de combate que proporcionara una alternativa a la alimentación convencional a través de la conversión de la energía generada por el acto de caminar. El dispositivo diseñado recoge energía eléctrica mediante bombillas de aire dispuestas en la suela del zapato, las cuales activan una serie de microturbinas conectadas a pequeños motores de corriente continua. Los resultados obtenidos mediante pruebas con una persona de 75 kg demostraron que el dispositivo generó una potencia continua promedio que variaba entre 30 mW y 80 mW, dependiendo de la forma de caminar y la velocidad de movimiento del sujeto. Fue necesario realizar formas variadas de movimiento durante aproximadamente 15 minutos para generar suficiente energía y enviar una transmisión GPS detallada con coordenadas geográficas. Esta información se transmitió como un mensaje de texto a un teléfono celular.

La conclusión extraída por Akay et al. sugiere que la generación de flujo de aire y la compresión del bulbo de aire en la suela de la bota de combate son eficientes para recolectar energía, lo que permite la alimentación autónoma de dispositivos, como el posicionamiento satelital a través de

un sistema GPS. Este artículo ofrece perspectivas valiosas sobre la aplicación práctica de la recolección de energía en contextos específicos, como el militar, y destaca la eficacia de la tecnología propuesta en el proyecto.

Brada et al. (2018) llevaron a cabo la investigación "Recolección de energía de vibración electromagnética para aplicaciones en ferrocarril" con el propósito de desarrollar una solución aplicable en vagones de tren para capturar energía de las vibraciones existentes. Utilizaron un convertidor electromagnético cerca del riel, generando energía a través de una bobina cuando el tren pasa. Incorporaron un piezoelectrico en la parte inferior de la vía férrea, aprovechando películas piezoelectricas para recolectar 1 mW de potencia. Los perfiles medidos mostraron señales de frecuencia en el rango de 10 a 50 Hz y una aceleración de hasta 2 g, identificando perfiles prometedores con una amplitud de aceleración de hasta 10 m/s² y un rango de frecuencia de 20 a 40 Hz. Este estudio destaca la viabilidad de recolección de energía en entornos ferroviarios, proporcionando una solución eficiente y sostenible.

Bajo la investigación de Xie et al. (2021), se exploró la "Recolección de energía de vibración piezoelectrica para marcapasos cardíacos autoalimentados". El objetivo era crear un marcapasos utilizando un sistema implantable de recolección de energía piezoelectrica. Los resultados demostraron que el sistema de recolección de energía de vibración piezoelectrica, una vez implantado, impulsó el marcapasos para generar pulsos eléctricos. Además, este sistema estimuló directamente el tejido miocárdico a través del epicardio, logrando un efecto de estimulación. La conclusión obtenida sugiere que los resultados respaldan la viabilidad de la estrategia de estimulación epicardio, abriendo nuevas posibilidades para el desarrollo de marcapasos autoalimentados.

Siguiendo la investigación, Bäumker et al. (2021) desarrollaron el estudio teniendo como título "Rastreador de recolección de energía térmica para vida silvestre". Su objetivo era crear un localizador animal alimentado exclusivamente por la recolección de energía térmica, utilizando la diferencia de temperatura entre el pelaje y el entorno. Resultando en suficiente energía para fijar la posición en un GPS cada 1-1.5 horas, concluyeron que la corriente de reposo se debía mayormente a la fuga del condensador. Con la energía recolectada, el collar intentaba fijar posición cada 1-1.5 horas, usando aproximadamente 621 mJ, y transmitía datos inalámbricamente

cada 14 minutos a 15 dBm de potencia. Este enfoque innovador ofrece una solución eficiente para rastrear animales en entornos silvestres aprovechando la energía térmica.

Tabbai et al. (2019) llevaron a cabo el proyecto "Efecto piroeléctrico en compuesto de titanato/poliuretano de plomo para la recolección de energía térmica". Su objetivo central fue transformar la energía térmica en energía eléctrica a través de un polímero compuesto que exhibe propiedades piroeléctricas. Los resultados revelaron un rendimiento destacado de la recolección de energía piroeléctrica, alcanzando $8.42 \text{ C/m}^2 \text{ K}$ a temperatura ambiente, con una corriente de aproximadamente 81.5 nA y una densidad de potencia de hasta 23 mW. Aunque la densidad de potencia recolectada de fuentes ambientales suele ser baja, concluyeron que los compuestos desarrollados son materiales idóneos para dispositivos autónomos utilizados en aplicaciones de ingeniería industrial o en la vida diaria.

Adaptado por Nguyen et al. (2020), la investigación titulada "Sistemas híbridos de recolección de energía solar-RF para sillas de ruedas eléctricas" tuvo como objetivo desarrollar un sistema que pudiera recolectar simultáneamente energía de dos fuentes para alimentar sillas eléctricas. Se construyó un modelo híbrido de captación de energía mediante radiofrecuencia (RF) y energía solar, diseñado para suministrar energía de manera continua y eficiente a sillas de ruedas eléctricas. Los resultados de la simulación demostraron la superioridad y estabilidad del sistema híbrido cuando se emplea la corriente de refuerzo y el estabilizador en el sistema de carga. Este enfoque innovador tiene el potencial de mejorar significativamente la autonomía y estabilidad operativa de sillas de ruedas eléctricas.

En la investigación de Sangaran et al. (2020) llevaron a cabo el proyecto "Recolección de energía de radiofrecuencia avanzada con administración de energía de múltiples fuentes para sensores de baja potencia y aplicaciones de carga móvil". Su objetivo principal era implementar dos sistemas de recolección de energía para abastecer suficiente energía y cargar teléfonos inteligentes. El primer sistema, ubicado en el centro de datos, captura energía de 2.4 GHz para alimentar sensores de movimiento conectados al sistema de iluminación del área. El segundo sistema recoge la señal de 70 MHz del modulador y 13 GHz del amplificador de alta potencia del sistema de enlace ascendente. En resumen, la instalación de carga, disponible las 24 horas del día, permite a los usuarios cargar temporalmente sus dispositivos en casos de emergencia o como respaldo en

ausencia de su cargador. Este enfoque proporciona una fuente de energía renovable constante aprovechando las salidas no utilizadas del acoplador de energía de RF.

El artículo más reciente es el de los autores Md Yusop et al. (2022), titulado "Solar Energy Harvester For Pet GPS Collar". En dicho artículo, se diseñó un collar para mascotas utilizando un sistema de recolección de energía solar, el cual se empleó para cargar la batería instalada. El panel solar utilizado proporcionó suficiente energía para activar el sistema GPS, permitiendo una salida de hasta 4.3 V. A través de una comparación entre los datos de ubicación recibidos por el dispositivo GPS y los datos de GPS recibidos de un teléfono móvil, se obtuvieron resultados que mostraron ligeras diferencias en el valor de las coordenadas, indicando así la efectividad del método implementado.

Uno de los artículos más recientes, es obra de los autores Saraereh et al. (2020) y lleva por título "A Hybrid Energy Harvesting Design for On-Body Internet-of-Things (IoT) Networks". En esta investigación, se desarrolló un recolector de energía híbrido con el objetivo de mejorar la vida útil de los dispositivos en redes de atención médica. Los autores combinan un sistema de recolección de energía térmica y por radiofrecuencia (RF). Aunque su enfoque no se dirige específicamente a dispositivos de rastreo, los hallazgos de su investigación podrían resultar de gran utilidad para su aplicación en sistemas de rastreo.

Este artículo, uno de los más recientes sobre el tema, es obra de Gregersen et al. (2023) y lleva por título "A novel kinetic energy harvesting system for lifetime deployments of wildlife trackers". En este estudio, se examina una unidad de recolección de energía cinética de pequeño tamaño como fuente de energía para un dispositivo personalizado de rastreo de vida silvestre, con el propósito de evaluar su idoneidad para el seguimiento de animales durante toda su vida. Los autores integraron un microgenerador kinetron MSG32 con un condensador de iones de litio de última generación (LIC). El dispositivo de rastreo es capaz de transmitir datos de manera remota a través de la red Sigfox "Internet de las cosas".

El artículo más reciente y de notable relevancia es el de Wild et al. (2023), titulado "A multi-species evaluation of digital wildlife monitoring using the Sigfox IoT network". En este estudio, los investigadores llevaron a cabo un análisis de datos de diversas especies en 12 países, empleando la red Sigfox. Aunque su enfoque principal se centró en el bajo consumo de potencia para la

transmisión y ubicación de datos digitales a larga distancia, los dispositivos de rastreo destacan al utilizar dos fuentes de recolección de energía, solar y cinética.

Este último artículo captura la atención por su enfoque integral en la evaluación de monitoreo digital de vida silvestre a través de la red Sigfox. La relevancia de los dispositivos de rastreo se destaca por su capacidad para aprovechar tanto la energía solar como la cinética. Los resultados obtenidos indican que la red IoT de Sigfox proporciona una solución robusta y lista para el campo, permitiendo el rastreo de una amplia variedad de especies. Más allá de su impacto en la biometría, esta tecnología promete contribuir a diversas áreas de investigación.

1.9 ALCANCES

- La implementación del sistema para recolectar energía ambiental se centrará en dispositivos localizadores en vehículos.
- Se establecerán las variables y se analizará la información sobre los distintos sistemas de recolección de energía encontrados en estudios y artículos.
- Se definirá una estrategia para la administración de energía con el objetivo de evitar grandes pérdidas energéticas.

1.10 LÍMITES

- Dificultades al realizar pruebas en lugares específicos.
- El alcance del proyecto será útil para asegurar que avance según lo planificado y alcance el éxito.
- Los beneficios de un sistema que recolecte energía ambiental en dispositivos localizadores ampliarán la vida útil de estos dispositivos.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Los antecedentes juegan un papel crucial al proporcionar la base sobre la cual se originan los descubrimientos significativos. El efecto Seebeck fue descubierto por Thomas Johann Seebeck, quien observó que un circuito compuesto por dos alambres de metales diferentes, con uniones a distintas temperaturas, desviaba la aguja de una brújula. Este descubrimiento tuvo lugar en el año 1821. Inicialmente, Seebeck creyó que este fenómeno se debía al magnetismo inducido por la diferencia de temperatura. No obstante, rápidamente se percató de que estaba relacionado con la generación de una corriente eléctrica inducida. La disparidad de temperatura origina un potencial eléctrico (voltaje) capaz de impulsar una corriente eléctrica a lo largo de un circuito cerrado. En la actualidad, este fenómeno es conocido como el efecto Peltier-Seebeck. (Sutrave, 2020)

En el libro de Xu y He (2017), narra cómo fue el principio básico detrás de los generadores EM es la ley de Faraday de la inducción EM, descubierta por Michael Faraday en 1831, que dice que cuando un conductor eléctrico se mueve a través de un campo magnético, se induce una diferencia de potencial entre los extremos del conductor. La fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida en el circuito es proporcional a la tasa de cambio temporal del flujo magnético enlazado. Este hallazgo, complementando la obra de pioneros como Seebeck, marcó otro paso crucial en la comprensión de las conexiones fundamentales entre electricidad y magnetismo.

El término de Energy Harvesting o recolección de energía ha estado presente desde la antigüedad. Los antiguos griegos sabían que algunos materiales generaban electricidad al ser comprimidos o flexionados, pero no tenían conocimiento sobre cómo aplicar este fenómeno de manera útil. Fue hasta que los hermanos Curie, J. and Curie. P. (1880). publicaron “Desarrollo por compresión de la electricidad polarizada en los cristales hémiedres en las caras inclinadas” descubrieron el efecto piezoelectrónico y empezaron a investigar cómo aprovechar su potencial. A partir de ahí, se han desarrollado múltiples aplicaciones de sistemas de generación de energía a partir de movimientos y vibraciones ambientales. La energía recolectada se utiliza para alimentar dispositivos electrónicos y sistemas electrónicos autónomos.

El descubrimiento del efecto fotovoltaico realizado por Becquerel en 1839 constituyó uno de los más importantes aportes a la ciencia en el siglo XIX. La tecnología solar se basa en el principio

físico de convertir este tipo de energía, absorbida por un material altamente conductor, en corriente eléctrica. Hacia los años cincuenta los laboratorios Bell lograron fabricar una celda que podía convertir la radiación solar en electricidad. Este resultado tecnológico animó a otros investigadores y empresas a fabricar celdas fotovoltaicas de capa delgada. (Urbano et al., 2010)

2.2 SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA

Según el autor Kobashi y Laszczyk (2021) en su libro microsupercapacitores, define a la recolección de energía como el proceso de obtener energía del entorno mediante el aprovechamiento de fuentes como mecánicas, térmicas, radiantes y bioquímicas. En palabras del autor, este fenómeno está estrechamente vinculado con la tendencia de miniaturización de dispositivos electrónicos de consumo y la difusión del concepto de Internet de las cosas. En este contexto, la recolección de energía implica principalmente la conversión de estas fuentes en energía eléctrica para alimentar dispositivos electrónicos pequeños y autónomos. Las expresiones 'poder', 'cosecha' o 'barrido de energía' se utilizan para describir este proceso, que, aunque no es novedoso, tiene aplicaciones más amplias de lo que comúnmente se conoce.

La recolección de energía nos brinda muchas ventajas prometedoras y características únicas para futuras comunicaciones inalámbricas que no pueden ser ofrecidos por comunicaciones convencionales operadas por batería o red eléctrica, incluida la capacidad autosostenible, reducción de la huella de carbono, nodos verdaderamente inalámbricos sin que requieren reemplazo de batería y conexión a redes eléctricas, despliegue fácil y rápido en cualquier entorno tóxico, hostil o inaccesible.

Aplicaciones de los sistemas de recolección de energía:

- Sensores y dispositivos autónomos.
- Redes de sensores inalámbricos.
- Dispositivos portátiles y wearables.
- Internet de las cosas (IoT).
- Sistemas de monitoreo y control remoto.

Cada una de estas aplicaciones representa un campo específico en el que los sistemas de recolección de energía desempeñan un papel crucial, contribuyendo a la eficiencia operativa y la sostenibilidad.

2.3 SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGIA SOLAR

La conversión de la luz solar en electricidad se lleva a cabo a través del uso de celdas solares, dispositivos que aprovechan materiales semiconductores para generar un campo eléctrico constante. (Calise et al., 2019) La energía solar es una de las fuentes más comunes en los sistemas de recolección de energía, permitiendo obtener decenas o incluso cientos de mW a partir de células solares relativamente pequeñas.

2.3.1 EFECTO FOTOVOLTAICO

El efecto fotovoltaico consiste en la emisión de electrones por un material cuando se le ilumina con radiación electromagnética. La obtención de energía eléctrica se realiza a través de celdas fotovoltaicas. (Montoya Rasero, 2011)

En la ilustración 1, se muestra cómo funciona el efecto fotovoltaico, cuando los fotones incidentes tienen una energía superior a esta banda prohibida, la celda solar generará una corriente eléctrica.

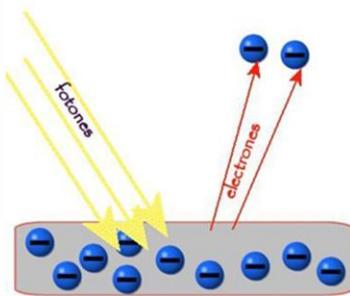


Ilustración 1. Efecto fotovoltaico

2.3.2 CELDAS SOLARES

En un mundo cada vez más consciente de la necesidad de fuentes de energía limpias y sostenibles, las celdas solares han aparecido como una solución prometedora. Las celdas solares se han convertido en una solución esencial para la generación de energía limpia y sostenible.

Las celdas solares se componen de materiales semiconductores, generalmente silicio, que poseen la propiedad de generar electricidad al ser expuestos a la luz solar. Cuando la luz solar, compuesta por partículas llamadas fotones, incide sobre las celdas solares, libera electrones y genera un flujo de corriente eléctrica. Este fenómeno, conocido como efecto fotovoltaico, constituye la base de las celdas solares modernas. Según la Solar Energy International, (2004) existen diversos tipos de celdas solares. En la Tabla 1, se muestra una comparación de las diferentes celdas solares comerciales.

Tabla 1

Comparativa de las diferentes celdas solares comerciales.

Tipo de celda solar	Eficiencia de conversión de energía	Ventajas	Desventajas
Celdas monocristalinas	15% - 20%	Alta eficiencia de conversión. Ahorran espacio a comparación de los otros tipos de celdas. Resistentes.	Elevado costo de producción.
Celdas policristalinas	13% - 16%	Precio promedio.	Menos eficientes que las celdas monocristalinas.
Celdas amorfas	8% - 12%	Bajo costo de producción. Flexibles.	Necesita el doble de espacio para producir la misma eficiencia de conversión.

Nota: Se están desarrollando continuamente nuevas tecnologías, como las celdas solares de material perovskita, que permiten la absorción de una amplia gama de longitudes de onda de la luz solar y, por ende, generan una alta corriente eléctrica (Sugianto, 2020).

Conforme a la obra de Solanki (2015), las celdas solares de silicio cristalino, ya sean monocristalinas o policristalinas, son las más comunes en la actualidad debido a su eficiencia y durabilidad. Las celdas policristalinas ofrecen una buena relación costo-eficiencia y por último las celdas amorfas o también conocidas como celdas de capa fina se destacan por su bajo costo y flexibilidad. La elección de la tecnología más adecuada dependerá de los requisitos específicos de cada aplicación, como el espacio disponible, el presupuesto y las necesidades de flexibilidad. En la ilustración 2, se muestran las distintas celdas solares.

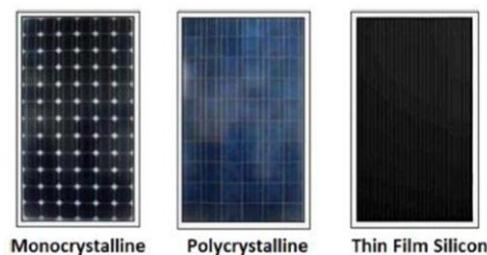


Ilustración 2. Tipos de celdas solares.

Tabla 2

Diferentes fabricantes de celdas solares más utilizadas para aplicaciones de recolección de energía

Fabricante	País	Tiendas	Conversión de eficiencia de energía
Lightricity	Reino unido	Directo	30%
IXYS Solar (now LittleFuse)	Estados unidos	Digikey	25%
Epishine	Suecia	Farnell, newark	13%
Dracula Technologies	Francia	Directo	
Panasonic	Europa	Digikey	
PowerFilm Solar	Estados unidos	Direct, mouser, digikey	5%
3GSolar	Israel	Directo	13%-19%
GlorySolar	China	Directo, Alibaba	

InfinityPV	Dinamarca	Directo	2-5%
Peafowl Solar Power	Suecia	Directo	

2.3.3 HORAS DE SOL PICO

En Kielar (2023), definen las horas de sol pico como una medida de la cantidad de luz solar que cae sobre un área dada, un concepto también conocido como irradiación solar o insolación solar.

Una hora pico de sol es cuando la intensidad del sol es un promedio de 1,000 W/m². Generalmente la intensidad de la luz solar es mayor en el medio del día. También es cuando los paneles solares reciben la mayor cantidad de luz solar directa. Sin embargo, la cantidad de radiación solar recibida durante el día puede cambiar, dependiendo de varios factores como el clima, la hora del día o la cobertura de nubes.

Existen herramientas para saber las horas de sol pico promedio de los diferentes lugares del planeta. Los Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) de la NASA brindan acceso a una plataforma que permite verificar las horas de sol pico por mes en un lugar predeterminado, considerando diferentes ángulos de inclinación. En la ilustración 3, se muestra los parámetros obtenidos de la ciudad de Veracruz ocupando la plataforma POWER | Data Access Viewer (nasa.gov)

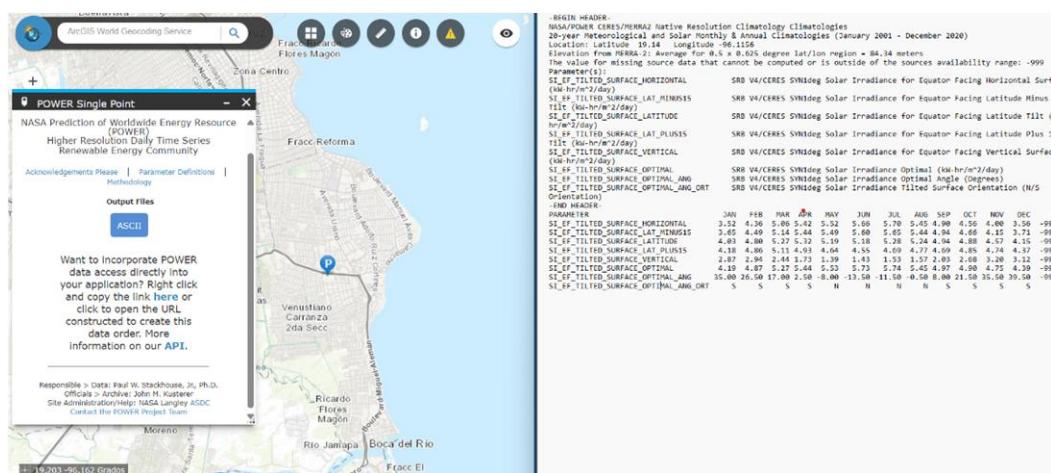


Ilustración 3. Parámetros de la plataforma

Se han creado tablas que permiten calcular las horas pico de sol para varias ciudades de México.

Horas de sol pico por día para la República Mexicana											
Entidad Federativa	Ciudad	Latitud norte (°)		Horas de sol pico*		Entidad Federativa	Ciudad	Latitud norte (°)		Horas de sol pico*	
		Hor	Inc	Hor	Inc			Hor	Inc	Hor	Inc
Aguascalientes	Aguascalientes	21.88	5.78	6.10		Nayarit	Tepic	21.51	6.06	6.42	
Baja California	Ensenada	31.87	5.98	6.76		Nuevo León	Monterrey	25.70	5.17	5.43	
	Mexicali	32.65	5.96	6.81		Oaxaca	Oaxaca	17.06	4.88	5.01	
	Tijuana	32.54	5.96	6.79		Puebla	Puebla	19.06	5.22	5.44	
Baja California Sur	La Paz	24.15	6.46	6.89		Querétaro	Querétaro	20.61	5.57	5.87	
	San José del Cabo	23.06	6.41	6.80		Quintana Roo	Cancún	21.16	6.01	6.32	
Campeche	Campeche	19.83	5.91	6.16		Chetumal	Chetumal	18.51	5.85	6.09	
Chiapas	Tuxtla Gutiérrez	16.76	4.88	5.00		San Luis Potosí	San Luis Potosí	22.16	5.57	5.85	
Chihuahua	Chihuahua	28.63	5.96	6.52		Sinaloa	Culiacán	24.82	6.05	6.52	
	Ciudad Juárez	31.73	5.78	6.41			Los Mochis	25.80	6.35	6.84	
Coahuila	Saltillo	25.42	5.54	5.86			Mazatlán	23.20	6.04	6.47	
	Torreón	25.53	5.96	6.37		Sonora	Ciudad Obregón	27.49	6.35	6.89	
Colima	Colima	19.26	5.97	6.30			Hermosillo	29.07	6.22	6.81	
Distrito Federal	Ciudad de México	19.33	5.11	5.36		Tabasco	Villahermosa	18.00	5.36	5.50	
Durango	Durango	24.04	5.92	6.36		Tamaulipas	Ciudad Victoria	23.73	5.18	5.38	
Guanajuato	Guanajuato	21.02	5.77	6.09			Nuevo Laredo	27.49	4.95	5.19	
	León	21.11	5.75	6.07			Tampico	22.21	5.05	5.23	
Guerrero	Acapulco	16.88	6.19	6.52		Tlaxcala	Tlaxcala	19.32	5.08	5.29	
	Chilpancingo	17.54	6.09	6.43		Veracruz	Coatzacoalcos	18.15	4.88	5.00	
Hidalgo	Pachuca	20.11	4.96	5.17			Orizaba	18.85	4.64	4.76	
Jalisco	Guadalajara	20.69	5.89	6.24			Veracruz	19.20	4.56	4.66	
Méjico	Toluca	19.28	5.77	6.09			Xalapa	19.50	4.71	4.84	
Michoacán	Morelia	19.71	5.79	6.13		Yucatán	Mérida	20.97	5.94	6.23	
Morelos	Cuernavaca	18.92	5.76	6.07		Zacatecas	Zacatecas	22.77	5.86	6.21	

Hor = Plano horizontal Inc = Plano inclinado a la latitud de la localidad correspondiente
 *De acuerdo con datos del Sistema de Información Geográfica para las Energías Renovables en México (SIGER) IIE-GENC, y del Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Ilustración 4. Horas de sol pico por día en México

2.3.4 ÁNGULO DE INCLINACIÓN

El ángulo de inclinación se refiere al ángulo entre la superficie de un panel solar y el suelo o el plano horizontal. El ángulo de inclinación óptimo para un panel solar depende de la latitud del lugar y la época del año. (Dutta, 2023) Este parámetro es crucial para alcanzar una mayor captación de radiación solar y, por ende, la eficiencia energética del sistema fotovoltaico.

El grado de inclinación es un factor crucial para aprovechar al máximo la radiación solar recibida por los paneles solares. Este ángulo varía según la ubicación y cambia diariamente, mensualmente y anualmente debido a la posición del Sol. Es fundamental calcular con precisión el ángulo de inclinación adecuado para cada ubicación, ya que esto garantiza la máxima producción de energía por parte del sistema solar. (Kumar & Chandel, 2013, pág. 503)

2.3.5 ÁNGULO DE AZIMUT

El ángulo de azimut se refiere al ángulo horizontal medido entre una dirección de referencia generalmente el norte y la dirección en la que mira un panel solar.

El ángulo de azimut solar de una pared, también conocido como ángulo de sombra horizontal (α_F), es la medida del ángulo entre el plano vertical que contiene la normal a la superficie de la pared y el plano vertical que atraviesa el centro del disco solar. (Page, 2012) Este parámetro es esencial para determinar la dirección óptima de la superficie para capturar la radiación solar.

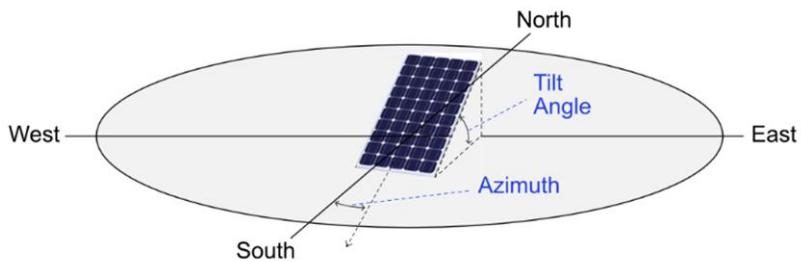


Ilustración 5 (Which Direction Should Your Solar Panels Face - SolarDesignGuide, 2021)

2.4 SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA

La recolección de energía térmica, también conocida como recolección de energía térmica, es el proceso de convertir el calor residual o las diferencias de temperatura ambiente en energía eléctrica utilizable. Esta tecnología utiliza un generador termoeléctrico (TEG) que utiliza el efecto Seebeck para producir energía eléctrica. En la ilustración 3, se muestra la arquitectura para un sistema de recolección de energía térmica. (Li e al., 2011)

El efecto termoeléctrico consta de tres efectos: el efecto seebeck, el efecto peltier y el efecto Thomson.

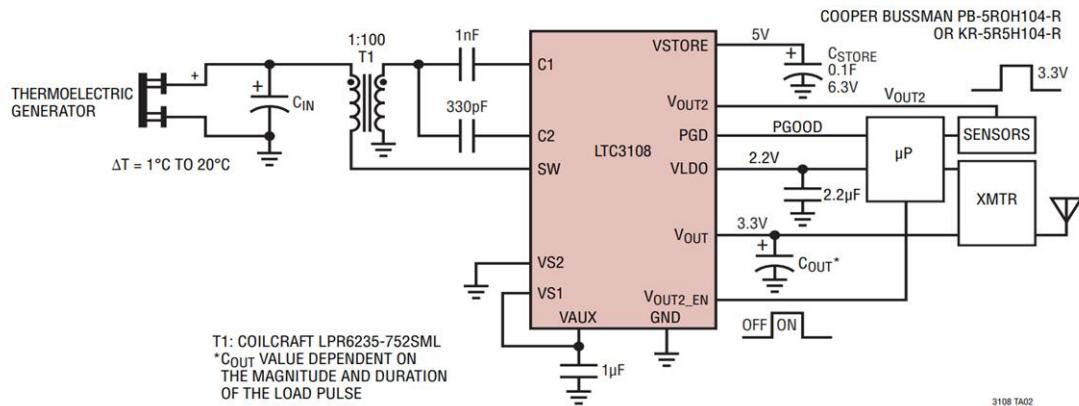


Ilustración 6. Diseño de un sistema de recolección energía termoeléctrica.

2.4.1 EFECTO SEEBECK

Los sistemas de energía termoeléctrico es una técnica prometedora para aprovechar la energía térmica disponible en el entorno y convertirla en electricidad utilizable. Uno de los fundamentos clave de este proceso es el efecto Seebeck, el cual permite la conversión directa de una diferencia de temperatura en una corriente eléctrica.

En el libro de Lee, H. (2015) se describe este fenómeno de la siguiente manera: El efecto seebeck es la conversión de una diferencia de temperatura en una corriente eléctrica. Como se muestra en la figura B.1, el cable A se une en ambos extremos al cable B y se inserta un voltímetro en el cable B. Suponga que se impone una diferencia de temperatura entre dos uniones, por lo general se encontrará que existe una diferencia de potencial, $\Delta\phi$ o voltaje V aparecerá en el voltímetro. La diferencia de potencial es proporcional a la diferencia de temperatura. La diferencia de potencial V es

$$V = \alpha_{AB} \Delta T \quad (1)$$

donde $\Delta T = T_H - T_L$ y α se denomina coeficiente de Seebeck (también llamado termopotencia) que generalmente se mide en $\mu V/K$. El signo de α es positivo si la fuerza electromotriz, *emf*,

tiende a conducir una corriente eléctrica a través del cable A desde la unión caliente a la unión fría, como se muestra en la ilustración 7. El coeficiente de Seebeck relativo también se expresa en términos del Seebeck absoluto. coeficientes de los cables A y B como

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B \quad (2)$$

en la práctica, rara vez se mide el coeficiente de Seebeck absoluto porque el medidor de voltaje siempre lee el coeficiente de Seebeck relativo entre los cables A y B. El coeficiente de Seebeck absoluto se puede calcular a partir del coeficiente de Thomson.

En el mismo libro se abordan también los efectos Peltier y Thomson, que están estrechamente relacionados con el efecto Seebeck y desempeñan un papel crucial en los sistemas de recolección de energía termoeléctrica.

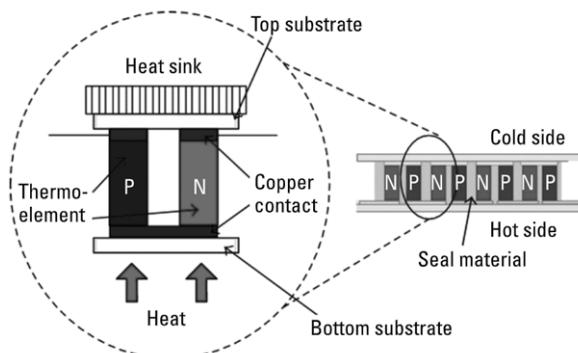


Ilustración 7. Aplicación del efecto seebeck en la recolección de energía termoeléctrica.

2.4.2 EFECTO PELTIER

Cuando la corriente fluye a través de una unión entre dos alambres diferentes, se encuentra que se debe agregar o restar calor continuamente en la unión para mantener su temperatura constante, lo cual se muestra en la figura B.2. El calor es proporcional al flujo de corriente y cambia de signo cuando se invierte la corriente. Así, el calor peltier absorbido o liberado es

$$Q_{Peltier} = \pi_{AB} I \Delta T \quad (3)$$

Donde π_{AB} es el coeficiente de Peltier y el signo de π_{AB} es positivo si la unión por la que entra la corriente del cable A se calienta y la unión por la que la corriente sale del cable A se enfriá. El calentamiento o enfriamiento peltier es reversible entre calor y electricidad. Esto significa que el calentamiento (o enfriamiento) producirá electricidad y electricidad producirá calefacción (o refrigeración) sin pérdida de energía.

2.4.3 EFECTO THOMSON

Cuando la corriente fluye en un cable con gradiente de temperatura, el calor se absorbe o se libra a través del cable según los materiales y la dirección de la corriente. El calor de Thomson es proporcional tanto a la corriente eléctrica como al gradiente de temperatura, que se ilustra en la figura*. Por lo tanto, el calor de Thomson absorbido o librado a través de un cable es

$$Q_{Thomson} = \tau I \Delta T \quad (4)$$

donde τ es el coeficiente de Thomson y el signo de τ es positivo si el calor se absorbe como se muestra en el cable A . El signo de τ es negativo si el calor se libra como se muestra en el cable B . El coeficiente de Thomson es único entre los tres coeficientes termoeléctricos porque es el único coeficiente termoeléctrico medible directamente para materiales individuales. Hay otra forma de calor, llamada calentamiento por joule, que es irreversible y siempre se genera a medida que la corriente fluye en un cable. El calor de thomson es reversible entre calor y electricidad. Este calor no es lo mismo que el calentamiento por joule, o I^2R .

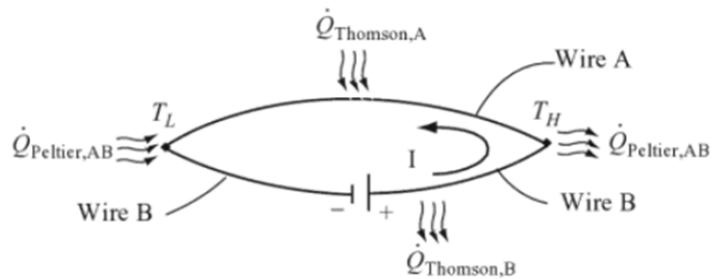


Ilustración 8. Se muestra el efecto peltier y el efecto Thomson.

Estos tres efectos termoeléctricos (Seebeck, Peltier y Thomson) trabajan en conjunto para permitir la conversión de energía térmica en electricidad y son fundamentales en el desarrollo de sistemas de recolección de energía termoeléctrico.

2.5 SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA

Los sistemas de recolección mecánica o cinética para dispositivos de rastreo utilizan el movimiento o la energía cinética para generar electricidad. Estos sistemas suelen incluir un generador eléctrico que convierte la energía mecánica en electricidad. Los nano-generadores triboeléctricos (TENG) son una nueva fuente de tecnología de recolección de energía, con alta eficiencia, mecanismo de trabajo fácil y capaz de la recolección de energía de diferentes fuentes en diferentes condiciones. (Rathore et al., 2018)

La energía producida por los esfuerzos mecánicos puede ser convertida en energía eléctrica usando tres tipos de métodos diferentes que son los más populares y ampliamente estudiados, estos son los transductores piezoeléctricos, electromagnéticos y electrostáticos. (Wei & Jing, 2017) Los investigadores han tenido éxito en probar generadores, sensores y actuadores para convertir energía mecánica en energía eléctrica.

2.5.1 EFECTO PIEZOELÉCTRICO

La palabra "piezo" proviene del término griego que significa "presión". Se describe como el desplazamiento asimétrico de cargas o iones de materiales piezoeléctricos cuando se someten a tensión mecánica. Ciertos materiales cristalinos como el cuarzo, titanato de bario, topacio, sal de Rochelle (tartrato de potasio y sodio tetrahidratado $[(\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O})]$), turmalina, así como materiales orgánicos naturales como el azúcar de caña, exhiben piezoelectricidad que genera electricidad bajo el efecto de la presión aplicada. Como tal, se logra un efecto piezoeléctrico directo. (Sezer & Koç, 2021)

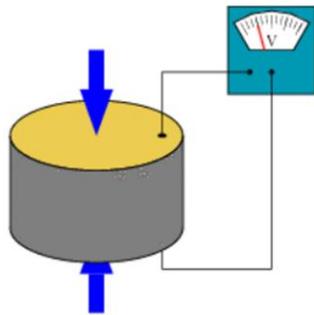


Ilustración 9. Generación de voltaje a través de un piezoelectrico

2.5.2 ESTRUCTURAS DE DISPOSITIVOS DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA.

La conversión de energía mecánica a eléctrica en la frecuencia de resonancia tiene el valor más alto, aunque la frecuencia de resonancia suele ser más alta que la fuente de vibración. El elemento piezoelectrico funciona a diferentes frecuencias para la mayoría de las condiciones de vibración. Según la frecuencia de excitación, pueden mostrarse dos modos en sistemas basados en piezoelectricos: en resonancia y fuera de resonancia. La ilustración 10, muestra configuraciones estándar utilizadas para recolectar energía usando piezoelectricos, y cada modo presenta dos diseños diferentes. (Morales Almanza et al., 2025)

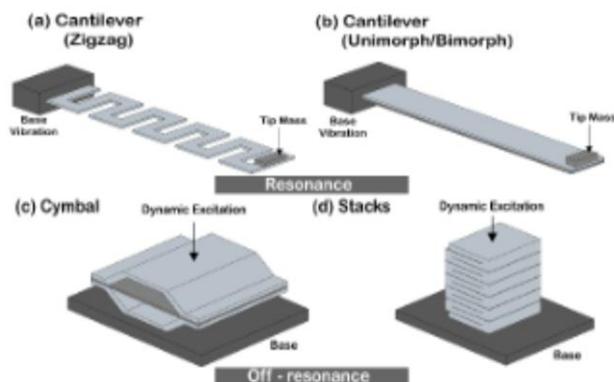


Ilustración 10. Configuraciones comunes de piezoelectricos para la recolección de energía, (a), (b) configuraciones de modo de resonancia, (c), (d) configuraciones fuera de resonancia.

La viga cantiléver con una o dos capas de material piezoeléctrico, es la estructura de dispositivo más ampliamente utilizada para generadores de energía piezoeléctricos, ya que puede producir una gran deformación mecánica durante la vibración. Una masa sísmica generalmente se adjunta en la punta del cantiléver para ajustar la frecuencia de resonancia a la frecuencia del entorno disponible, que generalmente está por debajo de 100 Hz. La viga se coloca sobre una fuente de vibración que induce deformación dinámica en las capas piezoeléctricas. Como tal, se genera un voltaje alterno a través de los electrodos que cubren las capas de material piezoeléctrico. (Sezer & Koç, 2021)

Tabla 3

Generación de energía en técnicas de construcción de pisos para la recolección de energía.

Material piezoeléctrico.	Potencia generada	Tecnología de la empresa.
Barium titanate ($BaTiO_3$)	7 mW/cm^3	$BaTiO_3$ technology
Zinc oxide (ZnO)	$5 \text{ pW}, 11, 2.7 \text{ mW/cm}^3$	ZnO nanowire
Lead zirconate titanate (PZT)	8.4 mW	PZT ceramic

(Ogbonna et al., 2022)

Debido a su alta sensibilidad, capacidad de ajuste de propiedades, durabilidad y capacidad para funcionar en un rango de temperaturas, el PZT ha sido un material piezoeléctrico dominante durante décadas en muchas aplicaciones tecnológicas. Las cerámicas con las propiedades piezoeléctricas más altas son aquellas con estructura de perovskita, como el niobato de magnesio y plomo (PMN), el titanato de plomo (PT), el zirconato de plomo (PZT) y el titanato de plomo zirconato (PLZT).

Investigaciones recientes han estado enfocadas en la exploración de nuevos materiales, tales como el perovskita, con propiedades piezoeléctricas prometedoras. El material perovskita, es un mineral de estructura cristalina única, ha despertado un gran interés en la comunidad científica debido a su capacidad para convertir la energía mecánica en energía eléctrica de manera eficiente. Aunque aún se encuentran en las etapas tempranas de investigación, se espera que las perovskitas y otros materiales emergentes desempeñen un papel crucial en el desarrollo de tecnologías piezoeléctricas más avanzadas y respetuosas con el medio ambiente.

Tabla 4

Modos de vibración para formas cerámicas piezoeléctricas comunes.

Dirección de polarización	Campo Aplicado: Voltaje de salida	Modo de vibración: Desplazamiento.	Frecuencia Constante	Capacitancia
			$N_L = f_r 1$ $N_L = f_r w$ $N_T = f_r h$	$C_s = \frac{K^T_{33} \epsilon_0 1 w}{h}$
			$N_p = 2 f_r r$ $N_T = f_r h$	$C_s = \frac{K_3 \epsilon_0 \pi r^2}{h}$
			$N_{ring} = f_r (OD - ID)$ $N_T = f_r h$	$C_s = \frac{K^T_{33} \epsilon_0 \pi (OD^2 - ID^2)}{4h}$
			$N_{axial} = f_r 1$	$C_s = \frac{K^T_{33} \epsilon_0 w h}{1}$
			$N_{axial} = f_r 1$	$C_s = \frac{K^T_{33} \epsilon_0 \pi r^2}{41}$

Nota: (APC International, Ltd, 2011)

2.5.3 MODELADO DE UN PIEZOELECTRICO

Para modelar un recolector de energía piezoeléctrico, necesitamos comprender el efecto piezoeléctrico y las relaciones de tensión-carga usando las ecuaciones derivadas ()

$$S = s^E T + [d^t E] \quad (5)$$

$$D = [d]T + [\mathcal{E}^T]E \quad (6)$$

Donde D es el desplazamiento eléctrico de la carga, E es la intensidad del campo eléctrico, S es la deformación mecánica, T es la tensión mecánica, s es la permitividad del material bajo tensión

constante y se es el cumplimiento bajo un campo eléctrico constante, d es la matriz para efecto piezoelectrónico directo, dt es la matriz para el efecto piezoelectrónico inverso y t degrada la transposición de la matriz. Por lo tanto, las ecuaciones 1 y 2 representan el efecto piezoelectrónico directo e inverso, respectivamente. E y D se definen como magnitudes eléctricas de naturaleza vectorial, mientras que T y S son magnitudes mecánicas de naturaleza tensorial de seis componentes. Las constantes en un material piezoelectrónico denominadas d , \mathcal{E} y e dependen de las direcciones del campo eléctrico, el desplazamiento y la tensión y la deformación, respectivamente.

En tres dimensiones, el efecto piezoelectrónico viene dado por

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{32} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{E}_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \mathcal{E}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \mathcal{E}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para el efecto piezoelectrónico directo, se ocupa la ecuación (1) para deducir el siguiente coeficiente:

$$d_{ij} = \left[\frac{\partial D_i}{\partial T_j} \right] E = \left[\frac{\partial S_i}{\partial E_j} \right] T \quad (8)$$

$$d_{ij} = \left[\frac{\partial D_i}{\partial S_j} \right] E = \left[\frac{\partial T_i}{\partial E_j} \right] T \quad (9)$$

La energía almacenada en un material piezoelectrónico se modela como energía almacenada en un condensador. Por lo tanto, se deriva la siguiente ecuación:

$$W_{33} = \frac{1}{2} Q_{33} V_{33} \quad (10)$$

Donde Q_{33} y V_{33} se describen como:

$$Q_{33} = d_{33} F_{33} \quad (11)$$

$$V_{33} = \frac{T}{WL} F_3 g_{33} \quad (12)$$

donde T es el espesor, W es el ancho, L es la longitud, F es la fuerza aplicada, y g_{33} y d_{33} son constantes relacionadas con el material piezoelectrónico usado.

Tabla 5

Ventajas y desventajas de los mecanismos de conversión.

Tipo	Ventajas	Desventajas
Electromagnético	<ul style="list-style-type: none"> -No requiere fuentes externas. -No se necesitan restricciones mecánicas. -Alta corriente de salida. 	<ul style="list-style-type: none"> -Difícil de integrar con el proceso de fabricación MEMS - Rendimiento escaso en microescala.
Piezoelectrónico	<ul style="list-style-type: none"> -Estructura simple -No requiere fuentes de voltaje externas. -Compatible con MEMS. -Alta tensión de salida. -No se necesitan restricciones mecánicas. -Amplio rango de frecuencia. 	<ul style="list-style-type: none"> -Las películas delgadas tienen un acoplamiento escaso. - Alta impedancia de salida. -Fuga de carga. -Baja corriente de salida.
Electroestático	<ul style="list-style-type: none"> -Fácil de integrar con los procesos de fabricación de MEMS. -Alta tensión de salida. 	<ul style="list-style-type: none"> -Se requieren restricciones mecánicas. -Se necesita una fuente de voltaje externa o recarga eléctrica. -Alta impedancia de salida. -Baja corriente de salida.

Nota Diversas técnicas como la electrostática, electromagnética, etc., pueden ser utilizadas para recolectar energía de fuentes renovables, pero a medida que el tamaño del dispositivo disminuye, la cantidad de energía que se puede recolectar se vuelve mínima. En estas escalas tan pequeñas, la energía de vibración puede ser vital.

2.6 CONVERTIDORES DE ENERGÍA DE CD-CD TIPO ELEVADOR

Los convertidores de CD-CD elevadores son un tipo de convertidor de energía eléctrica que se utiliza para aumentar la tensión de una fuente de alimentación de corriente continua, obteniendo una mayor tensión de salida que la entrada.

En el análisis del estado del arte, se han examinado diversos artículos de investigación relacionados con este campo, y se ha observado que la gran mayoría de ellos hacen uso de manera extensiva de los convertidores elevadores (CD/CD boost) en combinación con los Circuitos Integrados de Gestión de Energía (PMIC), con el propósito de maximizar la energía obtenida de dichas fuentes, incluso en condiciones de μW , nW y mW .

Los rangos de generación de potencia en energy harvesting normalmente son de μW , nW y mW , las cuales son escalas en las que su uso representa una opción viable como reemplazo de fuentes de alimentación convencionales en aparatos electrónicos de bajo consumo como los sensores autónomos, sensores vestibles, transductores y en ciertos dispositivos de la electrónica en general

En el libro de Electrónica de potencia de Muhammad H. Rashid, (2004) explica el principio de operación de subida, esto sucede cuando se cierra el interruptor durante el tiempo la corriente por el inductor aumenta y almacena energía. Si se abre el interruptor durante el tiempo, la energía almacenada en el inductor se transfiere a la carga pasando por el diodo y la corriente por el inductor cae. [14] En la ilustración 11, se muestra el circuito elevador. [17]

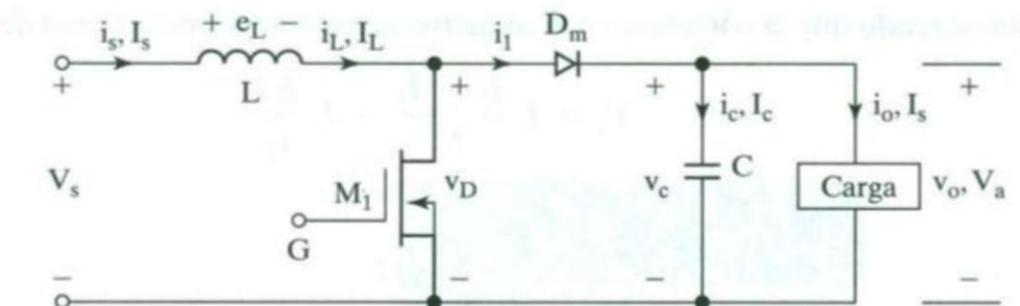


Ilustración 11 . Diagrama circuito elevador.

Los convertidores elevadores (CD/CD boost) desempeñan un papel fundamental en el proceso de extracción y aprovechamiento de energía de fuentes de baja potencia. La literatura científica

revisada en el estado del arte ha revelado que la gran mayoría de las investigaciones en este campo hacen uso de estos dispositivos electrónicos, diseñados para incrementar la tensión de entrada a un nivel adecuado para el funcionamiento de los circuitos. Esta característica resulta esencial al trabajar con fuentes de energía con tensiones iniciales extremadamente bajas, como aquellas provenientes de paneles solares de baja intensidad o señales termoeléctricas.

2.6.1 IC DE ADMINISTRACIÓN DE ENERGÍA (PMIC)

Estos tipos de integrados ayudan a maximizar la cantidad de energía utilizable que se extrae de las fuentes de renovables, asegurándose de que la energía se entregue a los dispositivos conectados de manera segura y eficiente.

El consumo de energía para los dispositivos IoT se puede reducir si se utiliza un circuito integrado de administración de energía adecuado y eficiente (la selección puede depender de los parámetros necesarios del diseñador). Selección del transductor de energía, cálculo de potencia estimada en relación con los valores de generación y consumo de energía, estas restricciones deben cumplirse para el PMIC. Ya se han desarrollado muchos PMIC que pueden proporcionar una solución completa para la recolección de energía en la aplicación IoT. Algunos de ellos se analizarán a continuación; (Elahi et al., 2020)

Los Circuitos Integrados de Gestión de Energía (PMIC) han sido ampliamente utilizados en las investigaciones revisadas en el estado del arte. Estos dispositivos ofrecen la capacidad de supervisar la eficiencia de la conversión, regular el voltaje y corriente de salida, y gestionar la carga y descarga de las baterías. Los PMIC desempeñan un papel crucial para lograr un rendimiento óptimo al adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes de las fuentes de energía, como las generadas por paneles solares o fuentes mecánicas.

Tabla 6

Módulos PMIC más utilizados en aplicaciones IoT.

Módulos PMIC	Características	País	Aplicaciones
--------------	-----------------	------	--------------

E-PEAS (AEM10940)	Utiliza celdas fotovoltaicas para recolectar energía hasta 50 mW	Bélgica	Automatización del hogar, geolocalización, dispositivos portátiles
Cypress (S6AE10xA)	Recolecta energía usando celdas fotovoltaicas tan pequeñas como 1 cm ²	Estados Unidos	Edificios automatizados y monitoreo de hogares inteligentes, agricultura y sectores industriales
Texas Instruments (Bq251120)	Alta integración, apaga automáticamente los interruptores para reducir el drenaje de la batería.	Estados Unidos	Dispositivos portátiles
Maxim Integrated (MAX14720)	eficiente energéticamente	Estados Unidos	Dispositivos médicos
STMicroelectronics (SPV1050)	Altamente eficiente para la gestión de energía, ya que puede operar hasta 400 mW	Suecia	Casas inteligentes, dispositivos portátiles, fitness.

Nota. Tomado de (Aggarwal, 2021)

2.7 COMUNICACIÓN POR LPWAN Y GSM.

La evolución tecnológica ha permitido el desarrollo de dispositivos de localización que desempeñan un papel importante en diversas aplicaciones, desde la gestión de logística de

productos hasta la seguridad personal. Dos de las tecnologías más destacadas en este ámbito son la comunicación por Red de área amplia de bajo consumo (LPWAN) y el Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM).

La comunicación por LPWAN es una tecnología inalámbrica que ha ganado prominencia en dispositivos de localización debido a su versatilidad y eficiencia. En el ámbito de dispositivos de localización existen dos sistemas de comunicación más utilizados que son LoraWan y Sigfox.

2.7.1 SIGFOX

Sigfox es un tipo de red de área amplia de bajo consumo (LPWAN) que es operada por una empresa francesa del mismo nombre. Las radios de Sigfox tienen un alcance de aproximadamente 10-30 km, y el operador de la red restringe el número total de transmisiones a 140 mensajes por día, con cada mensaje restringido a 12 bytes. Este tipo de red es adecuado para nodos inalámbricos alimentados por batería desplegados a gran escala. (Yamanoor & Yamanoor, 2022)

Según (Liu et al., 2019) en su artículo narra que SigFox emplea una configuración en estrella y utiliza Aloha como su protocolo de acceso al medio. Aloha es un protocolo de control de acceso al medio de tipo aleatorio en la capa de enlace de datos. Adicionalmente, la red se beneficia de la selección aleatoria de canales. Según SigFox, a diferencia de las redes móviles, no se requiere establecer una asociación explícita entre los dispositivos de IoT y la estación base. Esto implica que no es necesario implementar ningún mecanismo de sincronización, lo que puede resultar en una disminución del consumo de energía y costos asociados

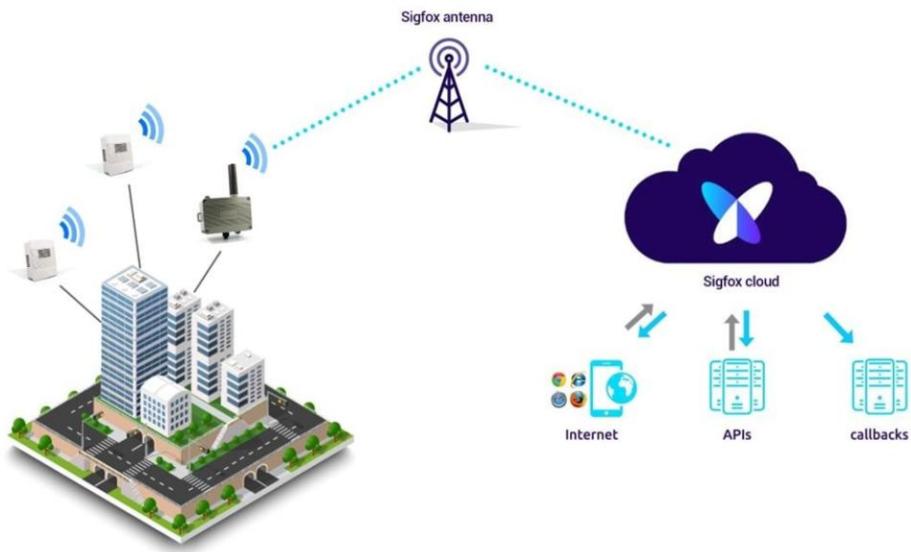


Ilustración 12. Configuración del funcionamiento de Sigfox

2.8.2 LORAWAN

Según la LoRa Alliance, (2024), LoRAWAN es una tecnología LPWAN que aborda la solución de problemas de consumo de energía y rango de comunicación para aplicaciones de IoT. La tecnología se ha diseñado para proporcionar un mecanismo de seguridad y localización de forma predeterminada. Puede implementarse como redes públicas o privadas para diferentes casos de uso. Según lo inspeccionado, las redes LoRaWAN constan de nodos finales, puertas de enlace (GW) y redes de datos. LoRAWAN es una topología de estrella de estrellas y GW son los enlaces entre los nodos y las redes de datos. La comunicación nodo GW se realiza con modulación FSK o LoRa con diferentes velocidades de datos y canales. La comunicación de la red de datos a GW se maneja a través del Protocolo de Internet (IP) (Ertürk, 2017)

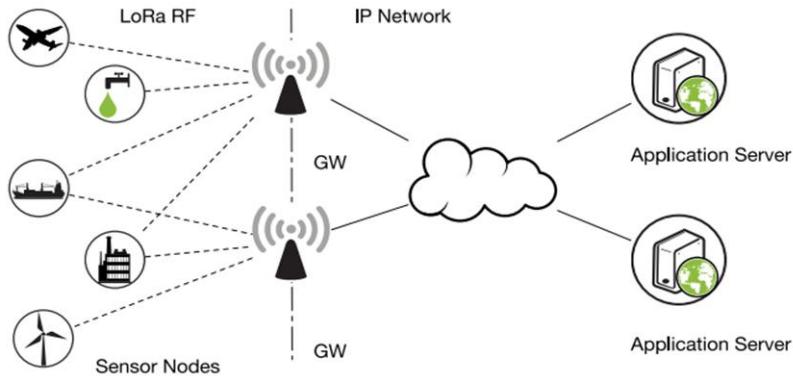


Ilustración 13. LoraWan Arquitectura

SigFox y LoRaWAN, son tecnologías de comunicación de bajo consumo que han sido objeto de análisis en términos de rendimiento y consumo de energía. Ambas tecnologías están diseñadas para satisfacer las demandas del Internet de las Cosas (IoT). En el artículo de Pérez et al. (2022) según los resultados obtenidos, SigFox demostró ser una opción más eficiente desde el punto de vista energético en comparación con LoRaWAN. La capacidad de enviar un mayor número de mensajes con una descarga de batería completa se destaca SigFox. Sin embargo, se resalta que la elección entre SigFox y LoRaWAN dependerá en última instancia de las necesidades y aplicación del usuario. Factores como el consumo de energía, la capacidad de transmisión y otros requisitos específicos deben considerarse al seleccionar la tecnología más adecuada para una implementación exitosa.

Tabla 7

Principales características las tecnologías Sigfox y Lora

	SIGFOX	LORA
Frecuencia	868/902 MHz (ISM)	433/868/780/915 MHz (ISM)
Alcance urbano	3-10km	2-3km
Alcance en campo	30-50km	15-20km
Tamaño de paquete	12 bytes	Definido por el usuario
Nodos por punto	1M	100000
Topología	Estrella	Estrella

Nota: Tomado de (Rodríguez, 2024)

2.8.3 Comunicación por GSM/LTE

GSM es un estándar ampliamente reconocido para la comunicación celular computarizada. GSM utiliza acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) de banda estrecha para brindar administraciones basadas en voz y contenido a través de sistemas de telefonía celular. Es una tecnología móvil avanzada que se utiliza para transmitir servicios versátiles de voz e información. La idea de GSM surgió a partir de un sistema de radio portátil basado en células en los Laboratorios Bell a mediados de los años 1970. (Haq et al., 2017)

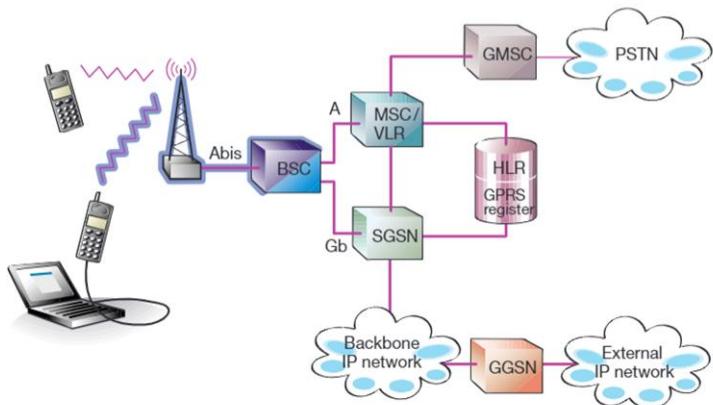


Ilustración 14. Estructura comunicación GSM

CAPÍTULO 4. DESARROLLO

Se han desarrollado dos dispositivos de localización uno con comunicación GSM y otro con comunicación SIGFOX de modo de ejemplo, utilizando el módulo A9G y la placa de desarrollo XIAO C3, y el módulo WSSFM10R2 junto con un módulo GPS SIM33ELA utilizando como microcontrolador el ATMEGA328 MMH con el propósito de servir como una herramienta práctica. Durante el proceso de desarrollo y evaluación de este dispositivo, se empleó el aparato NORDIC SEMICONDUCTOR NRF-PPK2. Este dispositivo permitió llevar a cabo mediciones del consumo de energía de nuestros dos dispositivos en diferentes estados operativos.

Se realizó una prueba de consumo de energía de los dos dispositivos de rastreo, se utilizó una batería Lipo de 3.7V de 650mAh, se programó para que los dos dispositivos hicieran el mismo proceso, el cual consistió que a la hora de mandar su ubicación los dos pasaran a su estado de en modo dormido. En la ilustración 15, se presenta una representación gráfica del consumo de energía en modo dormido del dispositivo de comunicación GSM.

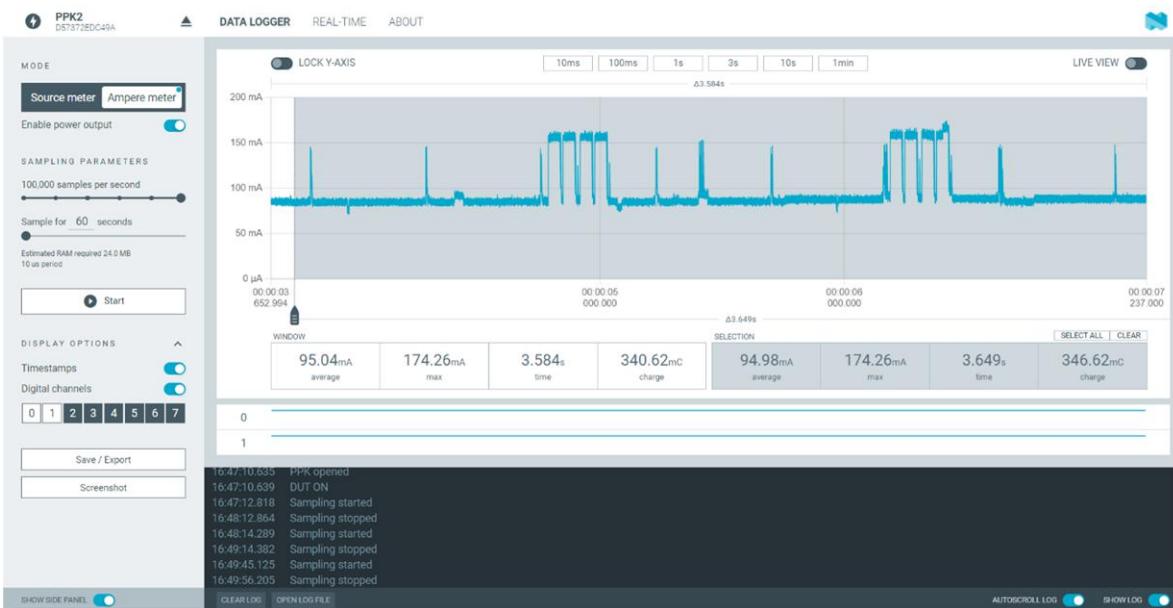


Ilustración 15. Consumo de energía cuando el dispositivo se encuentra en modo dormido.

Se llevaron a cabo mediciones en cada instancia en la que se solicitó la ubicación mediante mensajes de texto (SMS). Estas mediciones tuvieron como objetivo principal evaluar el consumo de energía asociado a cada solicitud de ubicación, proporcionando así datos para un análisis más detallado. La representación gráfica de estos datos se presenta de manera clara en la ilustración 2, donde se detallan los niveles de energía correspondientes a cada solicitud de ubicación.

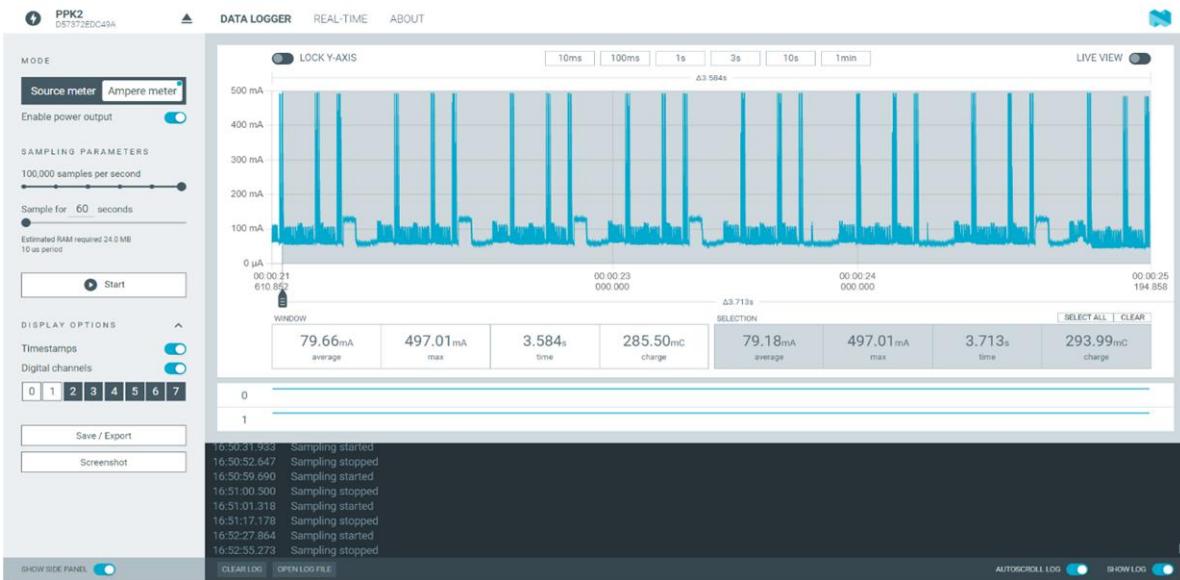


Ilustración 16. Consumo de energía cuando el dispositivo se le solicita su ubicación.

El dispositivo de localización inicialmente desarrollado presentaba un inconveniente en términos de consumo de energía. Este problema estaba relacionado con los módulos de comunicación, que operan a través de mensajes de texto (SMS), generando picos de hasta 850mA. Esta alta demanda de energía resultaba en una duración limitada de la batería con un promedio de 100mA en su ciclo, limitando la utilidad del dispositivo a aproximadamente 5 horas de uso continuo.

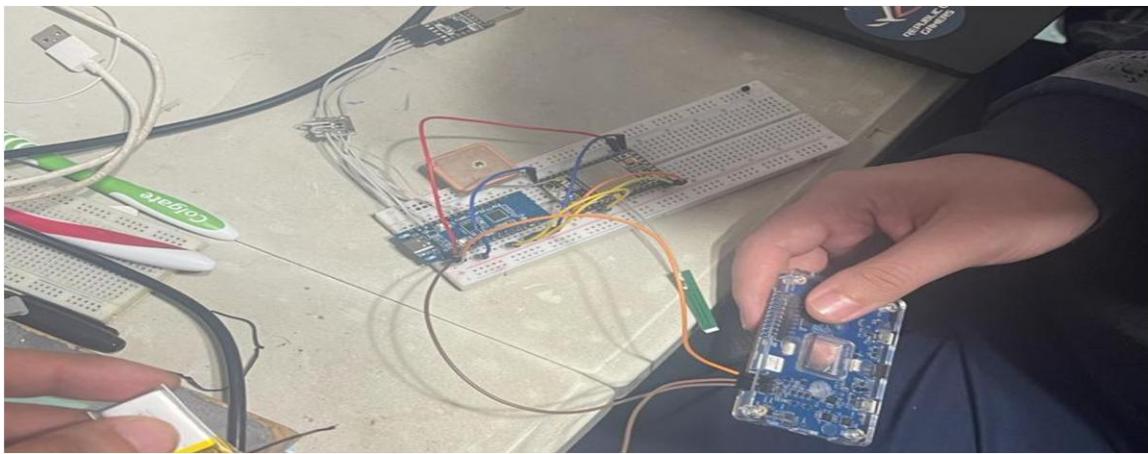


Ilustración 17. Prueba de consumo de energía con comunicación celular.

Se tomó la decisión de rediseñar el dispositivo de localización, centrándose en el consumo energético. Se optó por implementar una solución basada en la tecnología Sigfox, que utiliza comunicación de red de área amplia de bajo consumo. La elección de Sigfox se fundamenta en su bajo consumo energético, en comparación con la comunicación GSM. La tecnología Sigfox permite una transmisión de datos más competente, reduciendo la carga sobre la batería del dispositivo. La implementación busca aumentar la duración de la batería, asegurando un rendimiento más prolongado del dispositivo de localización.

4.1 ELECCIÓN DE SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA.

Se evaluó la viabilidad de utilizar un piezoelectrónico para la parte de recolección de energía encargada de recargar la batería del dispositivo, debido a su capacidad para convertir energía mecánica en señales eléctricas. Se analizaron varios artículos científicos para la identificación de la frecuencia dominante en el entorno automovilístico donde se tenía previsto ubicar el piezoelectrónico. Los resultados recopilados revelaron que las vibraciones en esta zona específica del automóvil generalmente oscilan en un rango que va desde los 20 hasta los 250 Hz.



Ilustración 18. Modelo de piezoeléctrico utilizado.

La elección del piezoeléctrico se basó en la disponibilidad de recursos y por sus dimensiones. Para caracterizar el comportamiento del piezoeléctrico, se empleó un analizador de impedancias modelo E4990A de Keysight Technologies, permitió evaluar su rendimiento y determinar su adecuación para la aplicación específica en el proyecto.

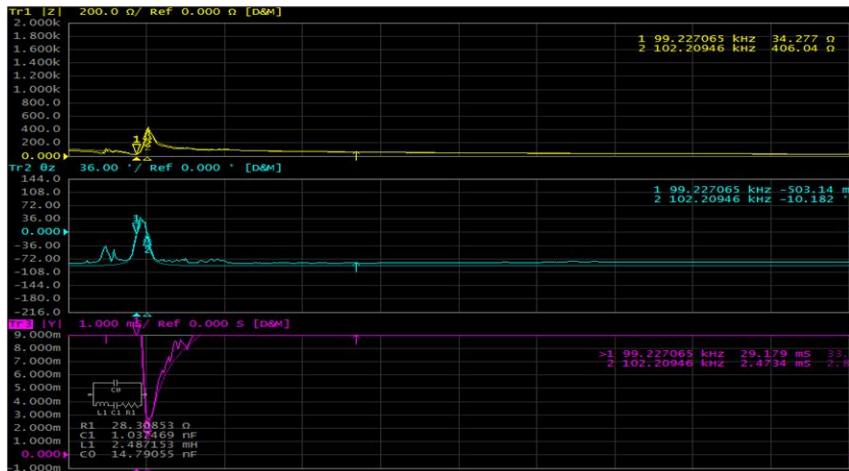


Ilustración 19. Datos del comportamiento del piezoeléctrico.

Después de identificar la frecuencia dominante del chasis del automóvil, se tomó la decisión de no utilizar el piezoeléctrico como componente principal. En su lugar, se exploró la viabilidad del uso de celdas solares para la aplicación prevista. Esta decisión se basó en una serie de consideraciones, entre las que se incluyen:

1. Debido al rango de frecuencias predominantes en donde se pensaba a ocupar, el piezoeléctrico podría no ser la opción más eficiente para la generación de energía.

Además, se tuvo en cuenta el valor alto de su impedancia, lo que resulta en una corriente muy baja.

2. Se reconoció que las celdas solares podrían aprovechar de manera más efectiva la luz solar disponible para recargar la batería.

SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA SOLAR

El sistema de recolección de energía solar se centra en el uso de las celdas solares, las cuales se combinaron con un elevador de baja potencia que tiene una característica de voltaje de entrada de 50mV y es capaz de elevar el voltaje a 4.5V. Después de probar el circuito, confirmamos que es viable utilizar esta fuente de energía para recargar el dispositivo. Al alcanzar el punto máximo de exposición solar, estimamos que se puede obtener una potencia de alrededor de 100mW, lo que será suficiente para cargar la batería de nuestro dispositivo. En la siguiente ilustración se muestra el circuito realizado con las celdas solares.

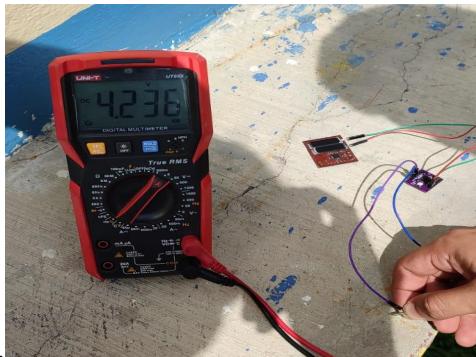


Ilustración 20 Prueba del sistema de recolección de energía solar.

4.2 COMPONENTES UTILIZADOS

Como microcontrolador utilizado fue el ATMEGA328P-MMHR, encapsulado en QFN de 32 pines, parte de la familia AVR de Atmel. Con una arquitectura RISC de 8 bits, velocidad de reloj de hasta 20 MHz y 32 KB de memoria flash, ofrece interfaces de comunicación UART, SPI e I2C, junto con periféricos como temporizadores y ADC. Para el modo de ahorro de energía, se emplearon transistores MOSFET NTS2101PT1G, con encapsulado SOT323, destacados en la parte de conmutación de potencia, lo que ayuda a mejorar el consumo de energía en el sistema.



Ilustración 21. Microcontrolador ATMEGA328P-MMHR.

En la parte de comunicación se utilizó el módulo Sigfox WSSFM10R2, es un dispositivo compacto y eficiente diseñado para comunicaciones de bajo consumo de energía en la red de radiofrecuencia de Sigfox. Con un diseño robusto y un encapsulado SMD de tamaño reducido, este módulo ofrece una solución confiable para la transmisión de datos en aplicaciones IoT y M2M. Su capacidad para operar en múltiples regiones geográficas y su bajo consumo de energía lo convierten en una opción ideal para sistemas que requieren una larga vida útil de la batería. Su interfaz UART simplifica la integración con microcontroladores y otros dispositivos, lo que facilita su implementación en una variedad de proyectos de comunicación inalámbrica.



Ilustración 22. Módulo WSSFM10R2

En el contexto de recepción GPS se utilizó el SIM33ELA, este módulo es ideal para aplicaciones que requieren un seguimiento preciso de la posición, como dispositivos de navegación, seguimiento de vehículos y aplicaciones de IoT. Su capacidad para recibir señales de múltiples constelaciones GNSS, incluyendo GPS, GLONASS y BeiDou, garantiza una cobertura global y una alta precisión en una variedad de entornos. Contiene una interfaz serial que simplifica la integración con sistemas embebidos, permitiendo una rápida implementación para diversas aplicaciones.



Ilustración 23 . Módulo GPS SIM33ELA.

Como convertidor de CD-CD elevador de baja potencia se utilizó el AEM10941, es un circuito integrado de recolección de energía diseñado para extraer energía de celdas solares para poder ser almacenadas en una batería recargable. Proporciona dos voltajes regulados independientes para alimentar dispositivos inalámbricos en aplicaciones como monitoreo industrial, geolocalización y sensores inalámbricos. Su convertidor elevador ultra eficiente permite cargar baterías de iones de litio, películas delgadas, supercondensadores o capacitores convencionales con corrientes de entrada de hasta 110 mA y voltajes desde 50 mV hasta 5V.



Ilustración 24 Circuito integrado de recolección de energía.

El modelo de celdas utilizadas fue el KXOB25-14X1F de la compañía ANYSOLAR Ltd, estas celdas solares son ideales para cargar una variedad de dispositivos alimentados por batería, con una eficiencia celular típica del 25% y una respuesta fotónica excelente en un amplio rango de longitudes de onda, pueden utilizarse tanto en interiores como en exteriores. Con dimensiones compactas de 23 x 8 x 1.8 mm y un peso de 0.6gr. Se utilizaron dos celdas conectadas en serie para aumentar su voltaje a 1.2V, adaptándose al circuito integrado AEM10941.



Ilustración 25. Celdas solares KXOB25-14X1F

El dispositivo cuenta con un puerto MICRO USB que facilita la programación del mismo, permitiendo una conexión directa a una computadora para cargar programas y actualizarlos de manera más sencilla. Se utilizaron resistencias, capacitores e inductores SMD, con encapsulado principalmente de tamaño 0402 logrando un dispositivo más reducido.

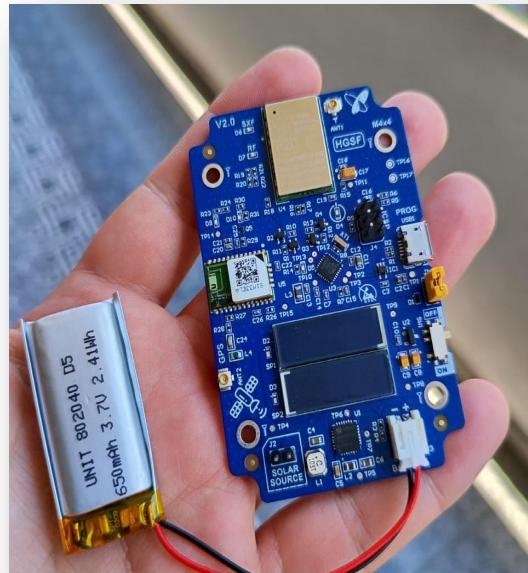


Ilustración 26. PCB FINAL

PRUEBAS DE CONSUMO DE ENERGÍA DEL DISPOSITIVO CON COMUNICACIÓN SIGFOX

Se tuvo como resultado una diferencia de consumo de energía a comparación con la tecnología GSM, en modo dormido se tuvo alrededor un promedio de 170uA. En la siguiente ilustración se muestra los resultados en modo dormido.



Ilustración 27. Consumo de energía en modo dormido con Sigfox.

Por último, el dispositivo power profiler kit II tiene la opción de obtener el promedio de todo el ciclo del proceso del dispositivo. El proceso en esta ocasión duró 55:00 min, esto fue por la rápida obtención de la trama GPS. Se tuvo un promedio de 673.47uA como se ve en la ilustración 28.

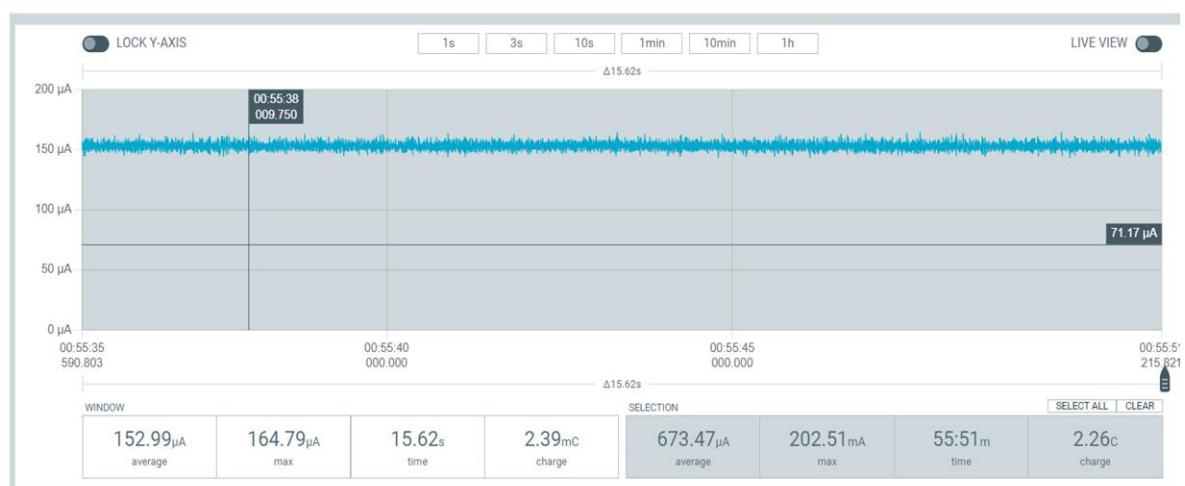


Ilustración 28. Promedio de todo el ciclo de SIGFOX.

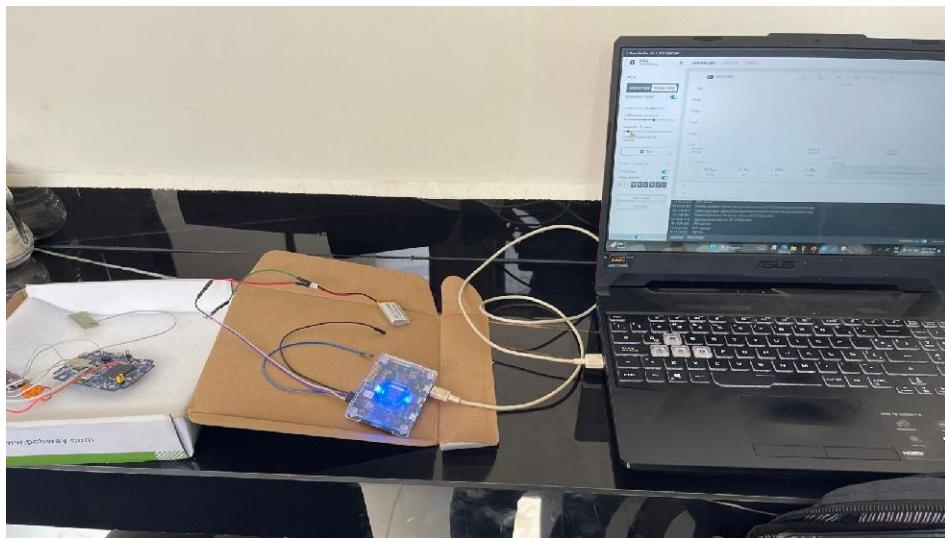


Ilustración 29. Pruebas de consumo de energía con comunicación Sigfox.

Tabla 8

Comparativa de consumos de energía

Comunicación	GSM	SIGFOX
Modo dormido (Max)	90mA	963.21uA
Trama GPS (Max)	220mA	80mA
Envío de datos (Max)	950mA	202.51mA
Promedio del ciclo	100mAh	1mAh

Prueba del dispositivo

Se llevó a cabo una prueba del dispositivo con el sistema de recolección de energía solar. La prueba consistió en el tramo de Veracruz a Puebla, comenzando a las 12:00 p. m. El dispositivo funcionó con el sistema de recolección de energía solar durante 4 horas, recargando eficientemente la batería. A partir de las 16:00 p. m., el dispositivo continuó operando únicamente con la batería hasta las 22:00 p. m. del día siguiente, consumiendo alrededor de 30mAh. En la siguiente imagen se muestra el mapa de la cobertura en Veracruz y Puebla.

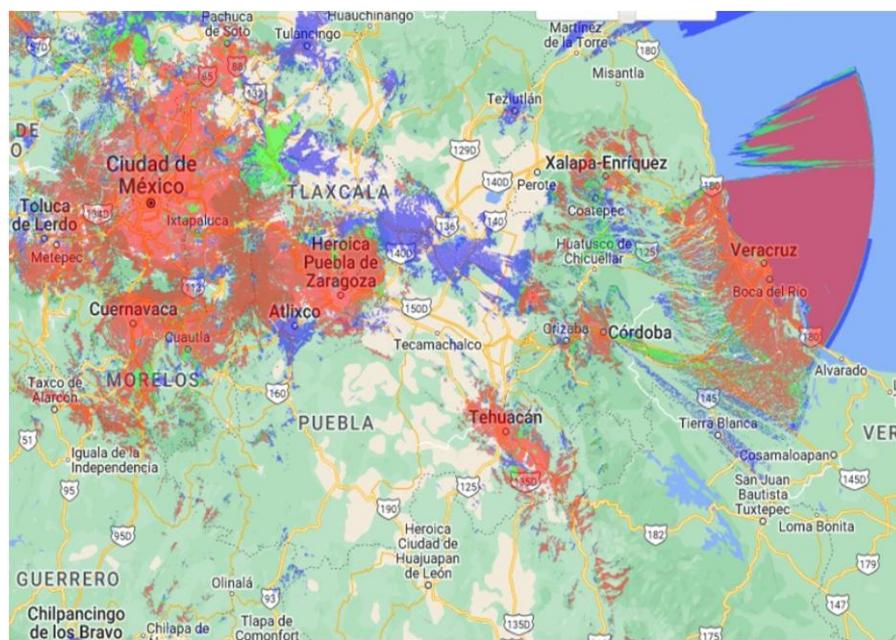


Ilustración 30. Cobertura Sigfox.

Se esperaban alrededor de 34 mensajes durante el trayecto, pero solo se recibieron 26 mensajes. Esto representa aproximadamente el 76% del total esperado. La señal fluctúa entre el 30% y el 90% durante todo el trayecto, sin embargo, se observa una falta de cobertura significativa en el tramo de Veracruz a Córdoba y de Córdoba a Veracruz, lo que puede haber contribuido a la discrepancia en el número de mensajes recibidos.

2024-04-24 20:24:42	321	e3e297414e7cc4c2 lat: 18.985785 lng: -98.24278	
2024-04-24 19:23:48	320	e5e29741577cc4c2 lat: 18.985788 lng: -98.24285	
2024-04-24 18:23:12	319	97f79741f97bc4c2 lat: 18.995893 lng: -98.242134	
2024-04-24 14:18:44	316	044397417efdc1c2 lat: 18.907722 lng: -96.9951	
2024-04-24 12:18:18	314	529d9841732fc0c2 lat: 19.076817 lng: -96.092674	

Ilustración 31. Mensajes recibidos.

CONCLUSIÓN

Queda demostrado en este estudio que los sistemas de recolección de energía solar, específicamente mediante la utilización de celdas solares y un convertidor elevador de baja potencia, son capaces de recolectar energía suficiente para dispositivos de rastreo y obtener un mayor monitoreo en entornos remotos donde el acceso a la alimentación externa es limitado. La obtención de una potencia de energía de 80mW proporciona la energía necesaria para mantener en funcionamiento continuo el dispositivo y garantizar su recarga constante.

La utilización de la tecnología de comunicación Sigfox se observó un nivel de monitoreo considerablemente superior en comparación con dispositivos equipados con comunicación GSM. Esto se debe a varios factores. Sigfox es una tecnología de comunicación unidireccional, lo que significa que los dispositivos solo transmiten datos y no reciben ninguna confirmación de recepción. Esto reduce la cantidad de energía necesaria para la transmisión de datos, ya que no se necesita una conexión bidireccional constante como en el caso de GSM. Sigfox utiliza una frecuencia de 900MHz, una transmisión más baja que la de la tecnología celular. La transmisión en una frecuencia más baja permite una mayor penetración a través de obstáculos y una mejor cobertura en áreas remotas, lo que significa que los dispositivos pueden transmitir datos con menos potencia. Además, Sigfox tiene un tamaño de mensaje limitado de 12 bytes, lo que reduce la cantidad de energía necesaria para la transmisión de datos en comparación con tecnologías celulares que pueden manejar mensajes más grandes.

Por último, la implementación de un sistema de recolección de energía en dispositivos de rastreo que utilizan tecnología Sigfox no solo garantizan una mayor autonomía, sino que también conduce a un aumento significativo en el monitoreo del dispositivo. Al integrar un sistema de recolección de energía que recarga la batería de manera continua, se elimina la preocupación por la pérdida de energía y las interrupciones en la transmisión de datos. Esto permite un seguimiento ininterrumpido y confiable de los dispositivos en una variedad de entornos, desde áreas urbanas hasta regiones remotas.

REFERENCIAS

- Bodkhe, H., Bilade, C., Naik, D. S., Deshmukh, O., Bulakh, A., Potdar, P. R., Shirbavikar, K., & Komble, S. (2024). Track-Me-Down Emergency Location Service Provider. *Engineering Proceedings*. <https://doi.org/10.3390/engproc2023059235>
- Zhu, D. (2022). Advance energy harvesting technologies. *Energies*, 15(7), 2366. <https://doi.org/10.3390/en15072366> [1]
- Bäumker, E., Conrad, L., Comella, L. M., & Woias, P. (2021). A fully featured thermal energy harvesting tracker for wildlife. *Energies*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/en14196363> [2]
- Salazar Cardona, M. M. (2021). Design of a solar energy harvesting system for supplying energy to an autonomous wireless sensor node. *Ingeniería Solidaria*, 17(2), 1–18. <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2021.02.02> [3]
- Hossain, M. F. T., Dessouky, S., Biten, A. B., Montoya, A., & Fernández, D. (2021). Harvesting solar energy from asphalt pavement. *Sustainability* (Switzerland), 13(22). <https://doi.org/10.3390/su132212807> [4]
- Akay, H., Xu, R., Han, D. C. X., Teo, T. H., & Kim, S. G. (2018). Energy harvesting combat boot for satellite positioning. *Micromachines*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/mi9050244> [5]
- Brada, S., Naifar, S., Viehweger, C., & Kanoun, O. (2018). Electromagnetic vibration energy harvesting for railway applications. *MATEC Web of Conferences*, 148. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201814812004> [6]
- Xie, F., Qian, X., Li, N., Cui, D., Zhang, H., & Xu, Z. (2021). An experimental study on a piezoelectric vibration energy harvester for self-powered cardiac pacemakers. *Annals of Translational Medicine*, 9(10), 880–880. <https://doi.org/10.21037/atm-21-2073> [7]
- Bäumker, E., Conrad, L., Comella, L. M., & Woias, P. (2021). A fully featured thermal energy harvesting tracker for wildlife. *Energies*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/en14196363> [8]
- Tabbai, Y., Belhora, F., Machine, R. el, Bajaj, A., & Ballouti, A. el. (2019). Pyroelectric effect in lead zirconate titanate/polyurethane composite for thermal energy harvesting. *EPJ Applied Physics*, 86(1). <https://doi.org/10.1051/epjap/2019190086> [9]

Nguyen, C. v., Nguyen, M. T., Quyen, T. v., Le, A. M., Masaracchia, A., Nguyen, H. T., Nguyen, H. P., Nguyen, L. D., Nguyen, H. T., & Nguyen, V. Q. (2020). Hybrid solar-RF energy harvesting systems for electric operated wheelchairs. *Electronics* (Switzerland), 9(5). <https://doi.org/10.3390/electronics9050752> [10]

Sangaran, M., Ramasamy, A., & Din, N. M. (2020). Advanced Radio Frequency Energy Harvesting with Power Management from Multiple Sources for Low Power Sensors and Mobile Charging Applications. In *Progress In Electromagnetics Research B* (Vol. 89). [11]

Md Yusop, A., Ahmad Yusry, S. arshad, Sulaiman, N. A., Khamil, K. N., & Mohd Isira, A. S. (2022). Solar Energy Harvester For Pet GPS Collar. *Przeglad Elektrotechniczny*, 98(8), 47–51. <https://doi.org/10.15199/48.2022.08.09> [12]

Saraereh, O. A., Alsaraira, A., Khan, I., & Choi, B. J. (2020). A hybrid energy harvesting design for on-body internet-of-things (IoT) networks. *Sensors* (Switzerland), 20(2). <https://doi.org/10.3390/s20020407> [13]

Gregersen, T., Wild, T. A., Havmøller, L. W., Møller, P. R., Lenau, T. A., Wikelski, M., & Havmøller, R. W. (2023). A novel kinetic energy harvesting system for lifetime deployments of wildlife trackers. *PLoS One*, 18(5), e0285930. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285930> [14]

Wild, T. A., van Schalkwyk, L., Viljoen, P., Heine, G., Richter, N., Vorneweg, B., Koblitz, J. C., Dechmann, D. K. N., Rogers, W., Partecke, J., Linek, N., Volkmer, T., Gregersen, T., Havmøller, R. W., Morelle, K., Daim, A., Wiesner, M., Wolter, K., Fiedler, W., ... Wikelski, M. (2023). A multi-species evaluation of digital wildlife monitoring using the Sigfox IoT network. *Animal Biotelemetry*, 11(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s40317-023-00326-1> [15]

Sutrave, A. (2020). WORLD's FIRST GRAPHIC HISTORY OF ELECTRONICS (1.a ed.) [Google Books]. https://books.google.com.mx/books?id=XEThDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=o_nepage&q&f=false [16]

Xu, Y. L., & He, J. (2017). Smart civil structures. En CRC Press eBooks. <https://doi.org/10.1201/9781315368917> [17]

Curie, J. and Curie. P. (1880). Development by pressure of polar electricity in hemihedral crystals with faces. *Bulletin de la société Botanique de France*. [18]

Urbano, J.B., González, F. H.T., Perilla, P.E.V., & Contreras, J.U.C. (2010). Estudio para el uso de la tecnología solar fotovoltaica. <https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/9316>

Kobashi, K., & Laszczyk, K. (2021). Microsupercapacitors. Woodhead Publishing. [20]

Calise, F., D'Accadia, M. D., Santarelli, M., Lanzini, A., & Ferrero, D. (2019). Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies. Academic Press. [21]

Montoya Rasero, C. (2011). Energía Solar Fotovoltaica Master profesional en Ingeniería y Gestión Medioambiental 2011. Recuperado 6 de marzo de 2024, de <https://static.eoi.es> [22]

Solar Energy International. (2004). Photovoltaics: Design and Installation Manual: Renewable Energy Education for a Sustainable Future (reimpresa). New Society Publishers, 2007.

Sugianto, S. (2020). Comparative Analysis of Solar Cell Efficiency between Monocrystalline and Polycrystalline. INTEK: Jurnal Penelitian, 7(2), 92. <https://doi.org/10.31963/intek.v7i2.2625>

Solanki, C. (2015). Solar Photovoltaics: fundamentals, technologies, and applications (3.a ed.). Eastern Economy.

Li, M., Xu, S., Chen, Q., & Zheng, L. R. (2011). Thermoelectric-generator-based DC-DC conversion networks for automotive applications. *Journal of Electronic Materials*, 40(5), 1136–1143. <https://doi.org/10.1007/s11664-011-1557-5>

Lee, H. (2015). Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers and solar cells. <https://scholarworks.wmich.edu/books/100/>

Wei, C., & Jing, X. (2017). A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 74). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.073>

Ogbonna, V. E., Popoola, A. P. I., & Popoola, O. M. (2022). Piezoelectric ceramic materials on transducer technology for energy harvesting: A review. *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1051081>

Rathore, S. S., Sharma, S., Swain, B. P., & Ghadai, R. K. (2018). A Critical Review on Triboelectric Nanogenerator. *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 377, 012186. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/377/1/012186>

Sezer, N., & Koç, M. (2021). A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. *Nano Energy*, 80, 105567. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105567>

APC International, Ltd. (2011). Piezoelectric Ceramics: Principles and applications (2.a ed.).

Aggarwal, P. (2021, 29 diciembre). ENERGY HARVESTING: PMIC, INDOOR SOLAR CELLS. Pallavaggarwal. Recuperado 12 de agosto de 2023, de https://pallavaggarwal.in/2021/12/29/energy-harvesting/#google_vignette

LoRa Alliance. (2024, 7 marzo). *LORA Alliance - Homepage - LORA Alliance®*. LoRa Alliance®. <https://lora-alliance.org/>

Ertürk, M. A. (2017). LoRaWAN Indoor Performance Analysis. *International Research Journal Of Computer Science*. <https://avesis.istanbul.edu.tr/yayin/ec829f9c-9d28-4307-a2df-d262126bc4ed/lorawan-indoor-performance-analysis>

Pérez, M. E. B., Sierra, F., Chaparro, W., Méndez, D., Páez, C. I., Perilla, G., & Fajardo, A. (2022). Coverage and Energy-Efficiency Experimental Test Performance for a Comparative Evaluation of Unlicensed LPWAN: LoRaWAN and SigFox. *IEEE Access*, 10, 97183-97196. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3206030>

Haq, I. U., Rahman, Z. U., Ali, S., & Faisal, M. (2017). GSM Technology: Architecture, Security and Future Challenges. *IJSEAT*, 5(1), 070-074. <http://www.ijseat.com/index.php/ijseat/article/view/789>

Liu, Y., Tong, K., & Wong, K. (2019). Reinforcement learning based routing for energy sensitive wireless mesh IoT networks. *Electronics Letters*, 55(17), 966-968. <https://doi.org/10.1049/el.2019.1864>

Kielar, H. (2023, 23 noviembre). Peak sun hours & solar energy. GreenLancer. Recuperado 14 de marzo de 2024, de <https://www.greenlancer.com/post/peak-sun-hours#:~:text=A%20peak%20sun%20hour%20is,receive%20the%20most%20direct%20sunlight>.

Page, J. (2012). The Role of Solar-Radiation Climatology in the Design of Photovoltaic Systems. En Elsevier eBooks (pp. 573-643). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385934-1.00017-9>

Dutta, D. (2023). DIY Off-Grid Solar Power for Everyone: Step by Step Guide to Design, Install, and Maintain Solar Systems for Homes, RVs, Vans, and Boats. Notion Press.

Rodríguez, M. (2024, 25 enero). Comparativa entre Sigfox y LoraWan. Botrue Activities.
<https://botrueactivities.com/comparativa-entre-sigfox-y-lorawan>

ANEXOS

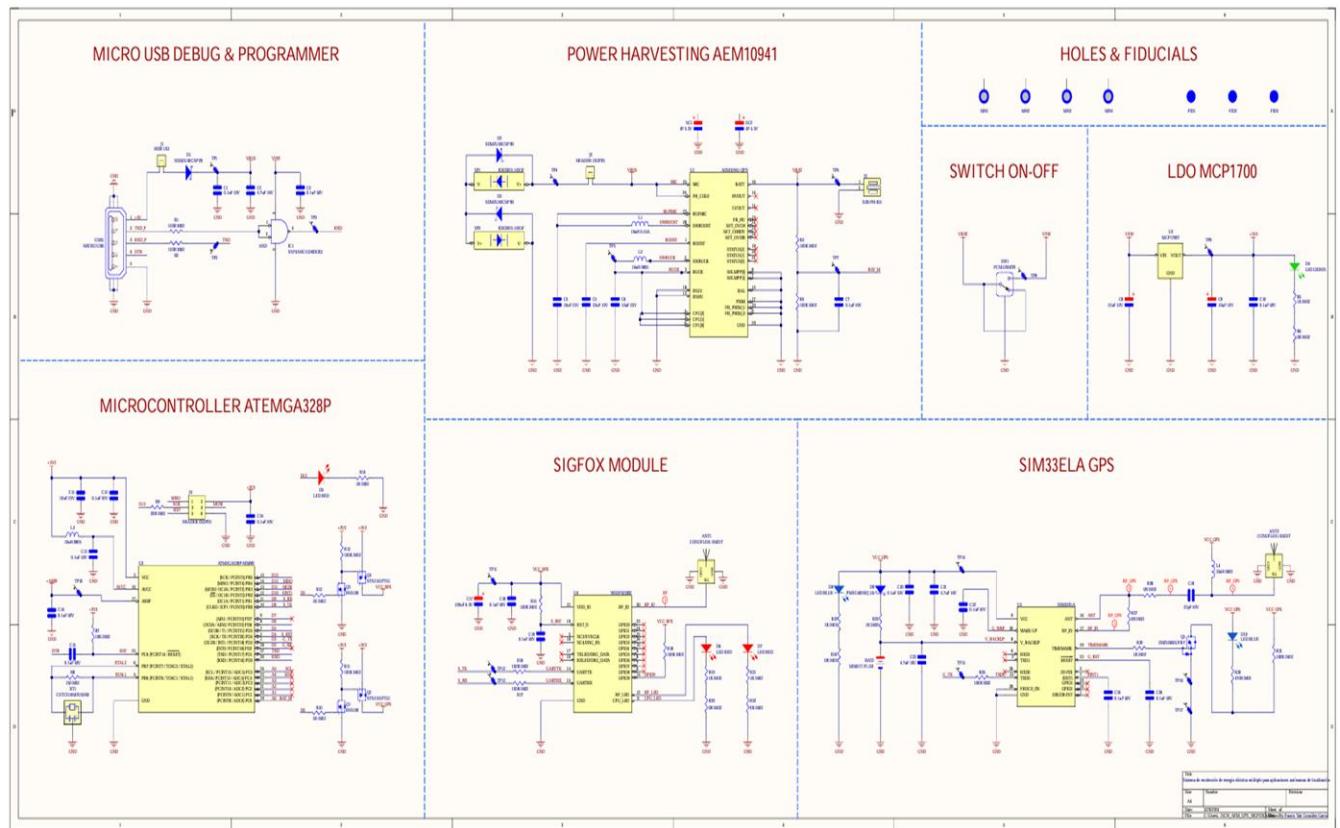


Ilustración 32. Esquemático del dispositivo

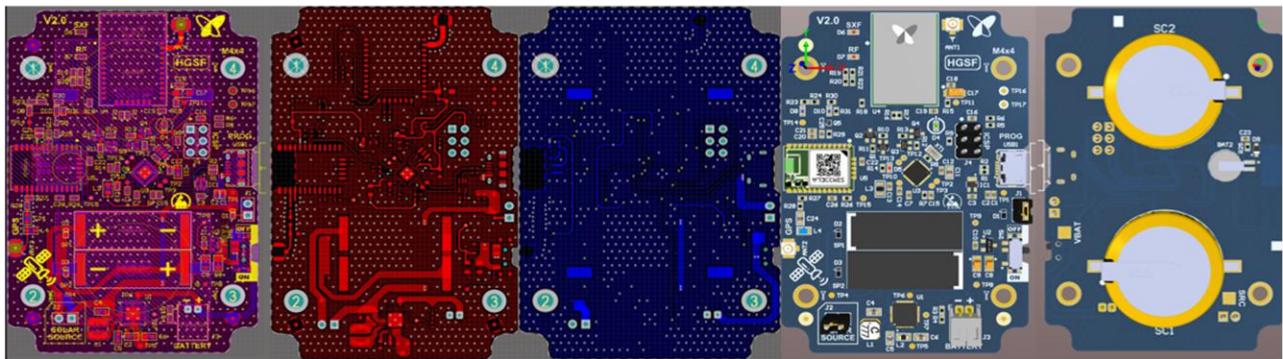


Ilustración 33. Diseño de PCB

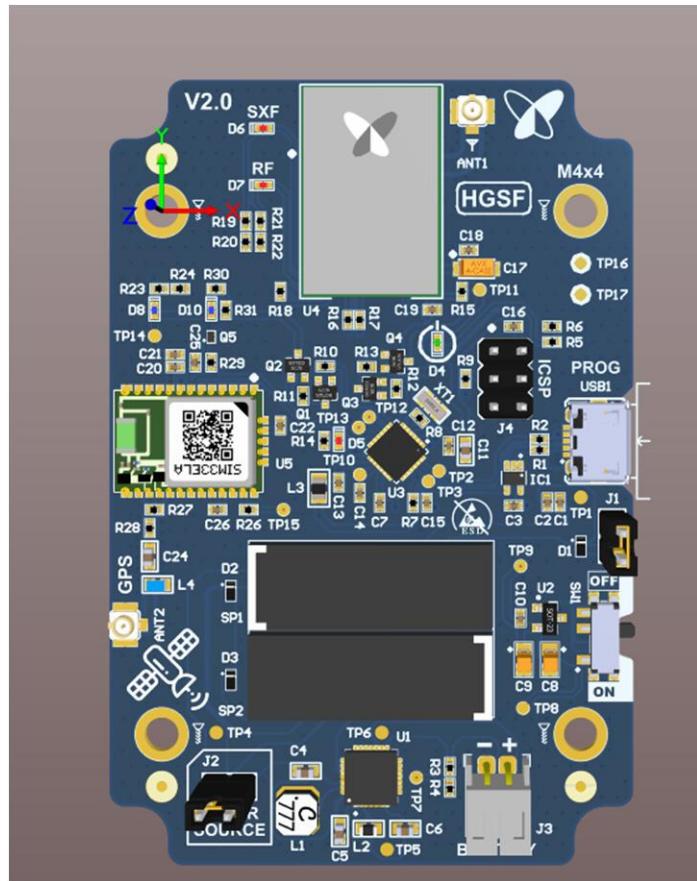


Ilustración 34. Modelo 3D del dispositivo

