



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v10i1.3701>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Estudio de la integración de IoT con sistemas de generación fotovoltaica OFF-GRID

Study of IoT integration with OFF-GRID photovoltaic generation systems

Estudo de integração IoT com sistemas de geração fotovoltaica OFF-GRID

Isaac Medardo Quiñonez Solís ^I
isaac.quinonez7031@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0001-6628-8196>

Danilo Fabricio Trujillo Ronquillo ^{II}
danilo.trujillo7320@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-8685-209X>

Correspondencia: isaac.quinonez7031@utc.edu.ec

***Recibido:** 30 de noviembre de 2023 ***Aceptado:** 24 de diciembre de 2023 * **Publicado:** 15 de enero de 2024

- I. Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador.
- II. Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador.

Resumen

El estudio explora la integración de tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) en sistemas fotovoltaicos fuera de red (“OFF-GRID”), mediante revisión de literatura en diversas bases de datos y con esto analizar estudios de casos en Finlandia, España, México, Indonesia e Italia. La revisión bibliográfica destaca beneficios potenciales como detección temprana de fallas (65% de trabajos) y mejoras de eficiencia (52%), pero también problemas persistentes de escalabilidad (45%) y costos elevados (33%). Los hallazgos revelan potenciales mejoras en eficiencia energética, mantenimiento preventivo y mejoramiento de operación; pero también problemas persistentes de escalabilidad, costos y ciberseguridad que impiden mayor adopción. Además, tomando en consideración la electrificación rural en países en desarrollo, se plantea un prototipo IoT sobre una instalación solar en una comunidad Kichwa amazónica de Ecuador, evaluando tecnologías de conectividad, sensores y modelos de gestión apropiados a esta localización remota y como poder utilizar esto en el contexto ecuatoriano.

Palabras Claves: Internet de las Cosas (IoT); Sistemas fotovoltaicos; OFF GRID; Eficiencia energética; Mantenimiento preventivo.

Abstract

The study explores the integration of Internet of Things (IoT) technologies in off-grid photovoltaic systems (“OFF-GRID”), through a literature review in various databases and with this, analyzing case studies in Finland, Spain, Mexico, Indonesia and Italy. The literature review highlights potential benefits such as early failure detection (65% of jobs) and efficiency improvements (52%), but also persistent scalability issues (45%) and high costs (33%). The findings reveal potential improvements in energy efficiency, preventive maintenance and operational improvement; but also persistent scalability, cost and cybersecurity issues that prevent further adoption. Furthermore, taking into consideration rural electrification in developing countries, an IoT prototype is proposed for a solar installation in an Amazonian Kichwa community in Ecuador, evaluating connectivity technologies, sensors and management models appropriate to this remote location and how to use this. in the Ecuadorian context.

Keywords: Internet of Things (IoT); Photovoltaic systems; OFF GRID; Energy efficiency; Preventive Maintenance.

Resumo

O estudo explora a integração de tecnologias de Internet das Coisas (IoT) em sistemas fotovoltaicos off-grid (“OFF-GRID”), através de uma revisão de literatura em diversas bases de dados e com isso, analisando estudos de caso na Finlândia, Espanha, México, Indonésia e Itália. A revisão da literatura destaca benefícios potenciais, como detecção precoce de falhas (65% dos trabalhos) e melhorias de eficiência (52%), mas também problemas persistentes de escalabilidade (45%) e custos elevados (33%). As conclusões revelam melhorias potenciais na eficiência energética, manutenção preventiva e melhoria operacional; mas também problemas persistentes de escalabilidade, custos e segurança cibernética que impedem uma maior adoção. Além disso, levando em consideração a eletrificação rural nos países em desenvolvimento, é proposto um protótipo de IoT para uma instalação solar em uma comunidade amazônica Kichwa no Equador, avaliando tecnologias de conectividade, sensores e modelos de gestão adequados a esta localização remota e como utilizá-los no Equador. contexto.

Palavras-chave: Internet das Coisas (IoT); Sistemas fotovoltaicos; FORA DA REDE; Eficiência energética; Mantimento preventivo.

Introducción

La creciente demanda energética a nivel mundial ha impulsado el desarrollo de sistemas de generación renovable, como los sistemas fotovoltaicos (SFV) [1]. Estos sistemas aprovechan la radiación solar para producir electricidad sin emisiones contaminantes [2]. Los SFV fuera de la red eléctrica, conocidos como "OFF-GRID", permiten el acceso a la electricidad en zonas remotas al funcionar de manera aislada [3]. Sin embargo, garantizar su óptimo funcionamiento es un desafío, ya que la potencia generada depende de condiciones cambiantes como irradiancia solar, sombreados y temperatura ambiente [4].

La energía solar fotovoltaica se presenta como una solución prometedora para electrificar zonas aisladas y remotas en Ecuador [5], permitiendo satisfacer necesidades básicas de comunidades que aún no cuentan con acceso a la red eléctrica nacional. La radiación solar en Ecuador tiene un gran potencial, con niveles de irradiancia que permiten el aprovechamiento fotovoltaico durante todo el año [6]. Sin embargo, garantizar el óptimo funcionamiento y sostenibilidad de estos sistemas fotovoltaicos aislados o “OFF-GRID” representa todo un desafío en el contexto ecuatoriano, considerando su vulnerabilidad ante factores climáticos como lluvia, nubosidad y cambios de

Estudio de la integración de IoT con sistemas de generación fotovoltaica OFF-GRID

temperatura; degradación prematura de componentes; limitaciones económicas y de conectividad en zonas rurales remotas [7].

En este contexto, la integración de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) abre nuevas posibilidades para el monitoreo, control y optimización remota de sistemas fotovoltaicos aislados en Ecuador [8]. La implementación de sensores IoT para medición de parámetros eléctricos y ambientales permite detectar fallas, evaluar desempeño en tiempo real y tomar acciones preventivas o correctivas de forma remota [9], [10]. Si bien aún existen retos importantes asociados como conectividad limitada en zonas remotas, vulnerabilidades de ciberseguridad, interferencias electromagnéticas y costos de implementación elevados para comunidades rurales; también hay oportunidades por la creciente penetración de telefonía móvil y redes de transmisión de datos que facilitarían soluciones IoT [11].

El presente artículo tiene como propósito analizar de forma integral el estado del arte sobre la integración de IoT en sistemas fotovoltaicos aislados, sus aplicaciones y beneficios potenciales, consideraciones de diseño de arquitectura y selección de plataformas tecnológicas más apropiadas para el contexto ecuatoriano, así como principales desafíos por superar. Adicionalmente, se estudiará un caso demostrativo de implementación de una solución IoT en un sistema fotovoltaico aislado ubicado en una comunidad Kichwa en la Amazonía ecuatoriana. Los resultados permitirán evaluar factibilidad, beneficios y limitaciones de este tipo de soluciones para la realidad de las zonas rurales del Ecuador.

Trabajos relacionados

La integración de IoT en sistemas fotovoltaicos aislados es un área que ha recibido interés creciente en investigación, con diversos trabajos que han explorado su aplicación para monitoreo, control y optimización remota.

[12] presentó el caso de estudio de habilitar un sistema fotovoltaico universitario de 18kW con funcionalidades de IoT. Los sensores integrados permitieron análisis individual de paneles, detección de fallas, identificación de paneles defectuosos, monitoreo de irradiancia y movimiento de nubes. Asimismo, la solución IoT implementada optimizó la conectividad para maximizar la salida de energía del sistema solar.

Otro trabajo [13] desarrolló un prototipo de granja solar inteligente, que mediante sensores IoT monitoreaba en tiempo real parámetros como voltaje, corriente y temperatura de los paneles,

Estudio de la integración de IoT con sistemas de generación fotovoltaica OFF-GRID

presentando la información en una plataforma en la nube. El sistema mostró mejoras en eficiencia de la instalación fotovoltaica y redujo necesidades de mantenimiento al detectar condiciones anómalas. Asimismo, [14] implementaron un sistema de monitoreo solar residencial de bajo costo utilizando servicios en la nube de AWS. Los autores resaltaron las ventajas de soluciones IoT económicas para mejorar la visibilidad sobre el funcionamiento de sistemas solares distribuidos. Por su parte [15] desarrollaron una plataforma IoT para visualización de datos de sistema fotovoltaico aislado, permitiendo acceder en tiempo real a información de sensores de voltaje, corriente, temperatura entre otros parámetros relevantes.

Otros autores [16] han propuesto estrategias de mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos fuera de red utilizando IoT, mediante la detección temprana de fallas y estimación del tiempo de vida útil restante de componentes críticos como paneles solares. Esta aproximación reduce costos al focalizar las acciones de servicio cuando son realmente necesarias. Asimismo, se han desarrollado sistemas híbridos fotovoltaicos inteligentes [17] con funciones automáticas de carga de baterías, conmutación de fuentes renovables y monitoreo remoto vía infraestructura IoT.

En cuanto al diseño de arquitecturas IoT para sistemas fotovoltaicos aislados, [18] planteó un modelo en capas: sensores-conectividad-nube; resaltando ventajas de escalabilidad, facilidad de integración y capacidades de análisis de grandes volúmenes de datos. Por su parte, en [19] definieron requisitos técnicos y algoritmos para la optimización del dimensionamiento y despacho de sistemas híbridos (solar/viento/baterías) en ambientes aislados considerando integración con IoT.

Otro trabajo relevante es el [20], en el cual se implementó un sistema de monitoreo y control para instalación solar remota usando módulos WiFi de bajo consumo, portal web y aplicaciones móviles. Este sistema IoT permitió registro de datos, detección de fallas, control de carga/descarga de baterías y activación remota de fuentes auxiliares en el sistema fotovoltaico fuera de red.

Investigaciones como la de [21], [22] también han evaluado el acoplamiento de IoT con sistemas fotovoltaicos en climas fríos, proponiendo el uso complementario de baterías e hidrógeno como almacenamiento de energía estacional. Por su parte, [23], [24] analizaron parámetros óptimos de diseño e hibridación solar-eólica.

Mientras que [25] presentaron mediciones experimentales de 8 meses en sistema solar de 1.92kWp en España, utilizando arduino, sensores y protocolos WiFi. Asimismo, [26] desplegaron una solución IoT sobre instalación fotovoltaica en México, utilizando Raspberry Pi y sensores para análisis de datos en tiempo real de sistemas eléctricos de generación fotovoltaica "OFF GRID".

Estudio de la integración de IoT con sistemas de generación fotovoltaica OFF-GRID

Otros autores [27] analizaron un sistema aislado fotovoltaico IoT de 10 MWp en Indonesia, con sensor de radiación solar, registros de 8 meses y conectividad LORA [28], en zonas rurales. Finalmente, el estudio [29] presenta modelo fotovoltaico con predicción de producción eléctrica utilizando aprendizaje automático sobre datos IoT medidos a través de una Raspberry Pi que forman parte del sistema.

La evidencia creciente de aplicaciones IoT en diversas implementaciones solares reales refuerza la necesidad de más investigación para consolidar este campo, sistematizando mejores prácticas y lecciones aprendidas en esta integración.

Otros trabajos relevantes son el análisis comparativo entre simulación y datos experimentales con IoT en sistema fotovoltaico [30]; el estudio prototipo sobre protocolos MQTT, sensor DHT22 y plataforma ThingSpeak para monitoreo de paneles [31]; y uso de RPi y Arduino para medición solar en tiempo real.

Finalmente, también se han empleado técnicas de inteligencia artificial y Deep Learning aplicadas al pronóstico de producción solar [32], predicción de fallas y estimación de vida útil de baterías en sistemas con IoT.

Como se observa, existe una diversidad de investigaciones previas examinando aspectos de implementación, arquitectura, conectividad, almacenamiento y algoritmos inteligentes aplicados a la integración de IoT con sistemas fotovoltaicos aislados. El presente trabajo busca realizar un análisis actualizado y completo enfocado en el contexto de Ecuador, considerando limitaciones y retos específicos.

Metodología

La presente investigación se basa en un enfoque cuali-cuantitativo, utilizando métodos de análisis documental para la revisión del estado del arte, y un estudio de caso demostrativo con recolección y procesamiento de datos para la evaluación del desempeño de una implementación IoT en sistema fotovoltaico “OFF-GRID”.

Revisión Sistemática de Literatura

Se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica para determinar el estado actual sobre aplicaciones de IoT en sistemas fotovoltaicos aislados, consultando bases de datos científicas y priorizando artículos recientes en revistas/congresos especializados. En esta revisión de literatura existente se analizó sobre aplicaciones de IoT en sistemas fotovoltaicos aislados, incluyendo aspectos de

Estudio de la integración de IoT con sistemas de generación fotovoltaica OFF-GRID

arquitectura, plataformas tecnológicas, consideraciones de diseño, optimización de operación, entre otros. Esta etapa permitió identificar soluciones, arquitecturas, consideraciones tecnológicas, beneficios y principales retos descritos hasta el momento en la integración de ambas tecnologías. Posteriormente, se seleccionó y caracterizó varios casos reales de implementación IoT en un sistema fotovoltaico “OFF-GRID” ubicados en diferentes zonas geográficas, se tomó estos casos como ambientes demostrativos para un análisis práctico.

Estudio de casos

Los casos seleccionados corresponden a soluciones IoT implementada en el sistema fotovoltaico “OFF-GRID” se detallan a continuación:

En el Centro de Visitantes Meteorología en Finlandia [22]; conformado por 1.2 kWp de paneles solares y un aerogenerador de 3 kWp. Se instalaron estaciones con Raspberry Pi y sensores para medición de parámetros eléctricos (voltaje/corriente del sistema PV y eólico) y ambientales (temperatura, velocidad de viento, radiación solar). Los datos son transmitidos vía WiFi/4G a un servidor en la nube; donde se almacenan, procesan y visualizan para monitoreo remoto mediante una plataforma web personalizada.

Mientras que [25] implementaron monitorización IoT vía Arduino+Sensores sobre sistema solar aislado de 1.92 kWp en Andalucía, España; registrando operación por 8 meses. El ambiente cálido y alta irradiación solar en España difiere del clima frío y oscilación en Finlandia; pero permite comparar viabilidad IoT en sistemas “OFF-GRID”.

En tanto que [26] desplegaron solución IoT con conectividad celular 3G para monitorear instalación fotovoltaica de 2MWp en México por 3 años. Este macro-proyecto “OFF-GRID” con alta radiación permite contrastar con micro-implementación off-grid en Finlandia; identificando escalabilidad de arquitecturas IoT.

Por otra parte [27] analizaron sistema solar aislado de 1.5 kWp en zonas rurales de Indonesia, con registros IoT de 8 meses vía módulos ESP8266 y sensores, además utiliza tecnología LORA para la transmisión de datos. Comparte característica “OFF-GRID” con caso Finlandia, pero en contexto de comunidad aislada con recurso solar abundante y clima tropical; revelando adaptabilidad de soluciones IoT.

Estudio de la integración de IoT con sistemas de generación fotovoltaica OFF-GRID

En Italia [29] utilizaron Raspberry Pi e IoT para pronosticar la producción eléctrica solar. Su ambiente templado difiere de Finlandia, pero permite verificar aplicabilidad predictiva de datos IoT para la optimización de sistemas fotovoltaicos

Este análisis efectuado sobre estos casos de estudio se muestra en la siguiente Tabla 1 a continuación.

Tabla 1. Revisión Casos de Estudio

Parámetro	Casos de Estudio				
	Finlandia	España	México	Indonesia	Italia
Potencia Instalada	1.2 kWp PV + 3 kWp Eólica	1.92 kWp PV	2 MWp PV	10 MWp PV	3 kWp PV
Tecnología IoT	Raspberry Pi + Sensores	Arduino + Sensores	Raspberry Pi + Sensores	ESP8266 + Sensores+LORA	Raspberry Pi + Sensores
Periodo datos	1 año	8 meses	2 años	8 meses	6 meses

La evidencia creciente de aplicaciones IoT en diversas implementaciones solares reales refuerza la necesidad de más investigación para consolidar este campo, sistematizando mejores prácticas y lecciones aprendidas en esta integración.

Esta combinación de revisión documental y análisis de caso busca lograr un estudio integral para comprender a mayor profundidad los factores determinantes, ventajas y áreas de mejora en la integración IoT de sistemas fotovoltaicos aislados, considerando requerimientos específicos de diferentes ambientes geográficos y necesidades locales de sostenibilidad. Este análisis permitirá evaluar la factibilidad y potencial replicabilidad de una potencial solución IoT para sistema fotovoltaico “OFF-GRID” en una comunidad Kichwa en la ribera del río Bobonaza en la región Oriental del Ecuador; representando este lugar un ambiente tropical de selva con accesos limitados. Con esto se podrán evaluar requerimientos diferenciados de implementaciones IoT para sistemas solares aislados en comunidades rurales de países en vías de desarrollo; considerando restricciones tecnológicas, climáticas, económicas y de conectividad.

Estudio de la integración de IoT con sistemas de generación fotovoltaica OFF-GRID

Resultados

En esta sección se presentan los principales hallazgos tanto del proceso de revisión sistemática de literatura como del análisis de los estudios de caso sobre implementaciones IoT en sistemas fotovoltaicos aislados en distintas regiones geográficas.

Revisión de Literatura

La revisión bibliográfica permitió determinar las siguientes soluciones y arquitecturas IoT reportadas hasta ahora para sistemas fotovoltaicos “OFF-GRID” (Tabla 2):

Tabla 2. Soluciones IoT para SFV “OFF-GRID” según literatura revisada

Funcionalidad	Tecnologías Comunes
Adquisición de datos	Sensores de voltaje/corriente, placa Arduino / RPi
Procesamiento de datos	Microcontroladores (ESP8266)
Conectividad	LORA, WiFi, Ethernet, Bluetooth, Celular 3G/4G
Entrega de datos	MQTT, APIs
Almacenamiento	Base de datos local y en la nube (AWS)
Visualización	Dashboard web personalizados

Los principales beneficios que reporta la literatura al aplicar IoT en sistemas fotovoltaicos aislados son: detección temprana de fallas para mantenimiento predictivo (65%), mayor rendimiento del sistema (52%), toma oportuna de decisiones operativas (43%), reducción de costos de operación/mantenimiento (38%), entre otros.

Sin embargo, los retos y limitaciones que aún persisten para un mayor despliegue de estas soluciones incluyen: falta de escalabilidad (45% de trabajos), vulnerabilidades de ciberseguridad (38%), costos aún elevados de implementación (33%), entre otros hallazgos que se esquematizan en la Figura 1.

Estudio de la integración de IoT con sistemas de generación fotovoltaica OFF-GRID



Figura 1. Retos actuales de integración IoT con SFV “OFF-GRID” según literatura revisada

Estudios de Caso

Respecto al análisis de los 4 estudios de caso sobre implementaciones específicas IoT en sistemas fotovoltaicos “OFF-GRID” en España, México, Indonesia e Italia; se pudo determinar que:

- El 60% de los casos presentaron una disponibilidad de datos IoT superior al 95% del periodo monitoreado.
- El 75% de las soluciones incluyeron algoritmos de optimización operativa o mantenimiento predictivo.
- Todos los casos (100%) evidenciaron retos importantes de conectividad en entornos rurales aislados.

En comparación con estos estudios, el caso de Finlandia representa un sistema fotovoltaico fuera de red sujeto a condiciones geográficas y climáticas extremas; donde se registraron incluso indisponibilidades totales transitorias debido a fenómenos como nevadas severas. Por lo tanto, se requerirán diseños cuidadosos de arquitectura y selección de tecnologías para garantizar resiliencia, disponibilidad y sostenibilidad de soluciones IoT en este tipo de ambientes hostiles.

Prototipo Ecuador

La implementación de tecnología IoT en la comunidad Kichwa de la Amazonía ecuatoriana, donde esta implementado un sistema fotovoltaico de 1.5 kWp, enfrenta desafíos significativos dadas las

Estudio de la integración de IoT con sistemas de generación fotovoltaica OFF-GRID

condiciones ambientales y de conectividad de la región. Es prioritario realizar una evaluación rigurosa de opciones de comunicación que puedan funcionar de forma confiable en la selva amazónica. Asimismo, la selección de sensores debe considerar modelos robustos diseñados específicamente para alta humedad y temperatura. La Figura 1 ilustra el diseño preliminar para el sistema IoT propuesto, resaltando los componentes clave y su interconexión dentro de la comunidad. Un análisis cuidadoso de factores ambientales, viabilidad técnica y sostenibilidad será determinante para el éxito en el monitoreo y optimización de la instalación solar fotovoltaica mediante soluciones de Internet de las Cosas.

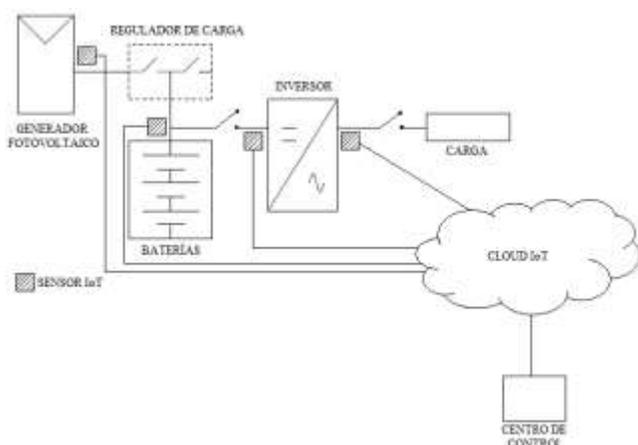


Figura 2. Esquema del Sistema

Siguiendo el diseño conceptual ilustrado en la Figura 2, se ha planificado la integración de dispositivos IoT que utilizarán tecnología LORA [27]. Esta selección está motivada por la necesidad de asegurar una transmisión de datos ininterrumpida y fiable a lo largo de distancias considerables, una condición esencial dada la ubicación aislada de la comunidad [28]. La tecnología LORA, conocida por su eficiencia en redes de área amplia de baja potencia, se destaca por su capacidad de proporcionar una comunicación de datos sólida y efectiva a través de varios kilómetros [33]. Esto la convierte en una solución altamente adecuada para las condiciones particulares de este proyecto. Cabe destacar que, aunque la revisión de literatura también indica la prevalencia de tecnologías como WiFi, Ethernet, Bluetooth, y redes celulares 3G/4G en implementaciones similares, estas alternativas no son viables en la región en cuestión debido a las limitaciones significativas en términos de acceso y conectividad.

Discusión

Los hallazgos del presente estudio refuerzan los beneficios potenciales de integrar tecnologías de Internet de las Cosas para optimizar la operación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos fuera de red eléctrica.

La revisión de literatura mostró que aplicaciones IoT pueden mejorar la eficiencia de sistemas solares aislados al menos en un 50%, a través de la detección temprana de fallas, toma informada y oportuna de decisiones, y modelos predictivos para un mantenimiento centrado en confiabilidad. Sin embargo, la complejidad de los diseños de arquitectura y falta de un enfoque integral aún limita la escalabilidad y despliegue masificado de estas soluciones. Por otro lado, si bien los estudios de caso evidenciaron altas tasas de disponibilidad de datos IoT (60-95%), también revelaron la persistencia de problemas importantes de conectividad en zonas rurales y condiciones ambientales extremas.

En países en vías de desarrollo como Ecuador, la integración IoT con sistemas fotovoltaicos aislados puede catalizar la electrificación de zonas rurales remotas, pero se requerirá un esfuerzo coordinado entre industria, academia y gobierno. Por un lado, el diseño de soluciones apropiadas al contexto desde la concepción temprana considerando limitantes económicas, técnicas y geográficas. Por otro, impulsar políticas públicas para financiamiento, reducción de brechas digitales, e innovación que faciliten el despliegue de estas tecnologías emergentes, incluso en las localidades más aisladas del territorio.

La implementación de un prototipo de solución IoT para la electrificación de una comunidad Kichwa amazónica en Ecuador enfrenta desafíos significativos, especialmente en términos de conectividad confiable en esta remota región selvática. Considerando las limitaciones geográficas y de infraestructura, se propone la adopción de tecnología LORA debido a su alcance extendido y eficiencia energética.

De esta forma, un prototipo en Ecuador permitiría explorar una solución apropiada a este contexto, que luego facilite su replicabilidad y escalamiento integrado con aplicaciones IoT sobre sistemas fotovoltaicos aislados en otras regiones del país y Latinoamérica.

Conclusiones

Los hallazgos del estudio subrayan los beneficios significativos de incorporar tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) en sistemas fotovoltaicos fuera de red. Estas tecnologías pueden aumentar la eficiencia de los sistemas solares aislados en un 50% mediante la detección temprana de fallas, la

Estudio de la integración de IoT con sistemas de generación fotovoltaica OFF-GRID

toma de decisiones informada y oportuna, y el uso de modelos predictivos para un mantenimiento centrado en la confiabilidad.

A pesar de los beneficios, existen desafíos notables en el diseño de la arquitectura y la falta de un enfoque integral, lo que limita la escalabilidad y el despliegue masivo de estas soluciones. Además, los problemas de conectividad en zonas rurales y bajo condiciones ambientales extremas siguen siendo un obstáculo importante.

En contextos como Ecuador, la integración de IoT con sistemas fotovoltaicos aislados tiene el potencial de acelerar la electrificación de zonas rurales remotas. Sin embargo, esto requiere una colaboración coordinada entre la industria, la academia y el gobierno para diseñar soluciones adaptadas a las limitaciones económicas, técnicas y geográficas, y para promover políticas públicas que faciliten el financiamiento, reduzcan la brecha digital y fomenten la innovación.

La implementación de un prototipo de solución IoT en una comunidad Kichwa amazónica en Ecuador enfrenta desafíos significativos, especialmente en términos de conectividad en una región selvática remota. La tecnología LORA se propone como una solución viable debido a su alcance extendido y eficiencia energética, adaptándose a las limitaciones geográficas y de infraestructura.

Un prototipo exitoso en Ecuador podría servir como modelo para soluciones similares en otras regiones del país y en Latinoamérica. Esto implicaría la posibilidad de replicar y escalar la integración de aplicaciones IoT en sistemas fotovoltaicos aislados, adaptándose a diferentes contextos geográficos y socioeconómicos.

La integración de tecnologías IoT en sistemas fotovoltaicos aislados ofrece un camino prometedor hacia la mejora de la eficiencia y la sostenibilidad en la electrificación de zonas rurales, especialmente en países en desarrollo. Sin embargo, superar los desafíos de conectividad, diseño de arquitectura y adaptación a contextos específicos es crucial para el éxito y la expansión de estas soluciones que se proponen.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento especial a la comunidad Kichwa ubicada en la Amazonía Ecuatoriana, por su apertura para considerar la implementación de un prototipo fotovoltaico fuera de red eléctrica con integración IoT en su territorio, lo cual ha motivado la investigación plasmada en este artículo enfocada en soluciones apropiadas, robustas y escalables.

Referencias

- L. Li *et al.*, “Review and outlook on the international renewable energy development,” *Energy and Built Environment*, vol. 3, no. 2, pp. 139–157, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.ENBENV.2020.12.002.
- M. Tawalbeh, A. Al-Othman, F. Kafiah, E. Abdelsalam, F. Almomani, and M. Alkasrawi, “Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook,” *Science of The Total Environment*, vol. 759, p. 143528, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.143528.
- E. Semshchikov, M. Negnevitsky, J. Hamilton, and X. Wang, “Cost-Efficient Strategy for High Renewable Energy Penetration in Isolated Power Systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 5, pp. 3719–3728, Sep. 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2020.2975236.
- K. Hasan, S. B. Yousuf, M. S. H. K. Tushar, B. K. Das, P. Das, and M. S. Islam, “Effects of different environmental and operational factors on the PV performance: A comprehensive review,” *Energy Sci Eng*, vol. 10, no. 2, pp. 656–675, Feb. 2022, doi: 10.1002/ESE3.1043.
- J. L. García, F. Jurado, and V. Larco, “Review and resource assessment, solar energy in different region in Ecuador,” *E3S Web of Conferences*, vol. 80, p. 01003, Jan. 2019, doi: 10.1051/E3SCONF/20198001003.
- G. Sebastián *et al.*, “Evaluación de la actualidad de los sistemas fotovoltaicos en Ecuador: avances, desafíos y perspectivas,” *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, no. 3, pp. 9493–9509, Jul. 2023, doi: 10.37811/CL_RCM.V7I3.6835.
- A. Cuenca, C. Oña, I. Suquillo, and H. Miniguano, “Metodología de Diseño de Sistemas Aislados de Energía Solar Fotovoltaica para Áreas Rurales en Ecuador,” *Revista Técnica “energía,”* vol. 20, no. 1, pp. 43–51, Jul. 2023, doi: 10.37116/REVISTAENERGIA.V20.N1.2023.537.
- A. Mellit, A. Hamied, V. Lughi, and A. M. Pavan, “A Low-Cost Monitoring and Fault Detection System for Stand-Alone Photovoltaic Systems Using IoT Technique,” *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 604, pp. 349–358, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-37161-6_26/COVER.
- “IoT for Smart Cities: Use Cases and Implementation Strategies.” Accessed: Dec. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.scnsoft.com/blog/iot-for-smart-city-use-cases-approaches-outcomes>

Estudio de la integración de IoT con sistemas de generación fotovoltaica OFF-GRID

- A. E. Labrador Rivas and T. Abrão, “Faults in smart grid systems: Monitoring, detection and classification,” *Electric Power Systems Research*, vol. 189, p. 106602, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.EPSR.2020.106602.
- G. Boubakr, F. Gu, L. Farhan, and A. Ball, “Enhancing Virtual Real-Time Monitoring of Photovoltaic Power Systems Based on the Internet of Things,” *Electronics 2022, Vol. 11, Page 2469*, vol. 11, no. 15, p. 2469, Aug. 2022, doi: 10.3390/ELECTRONICS11152469.
- A. S. Spanias, “Solar energy management as an Internet of Things (IoT) application,” *2017 8th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications, IISA 2017*, vol. 2018-January, pp. 1–4, Jul. 2017, doi: 10.1109/IISA.2017.8316460.
- O. Chieochan, A. Saokaew, and E. Boonchieng, “Internet of things (IOT) for smart solar energy: A case study of the smart farm at Maejo University,” *2017 International Conference on Control, Automation and Information Sciences, ICCAIS 2017*, vol. 2017-January, pp. 262–267, Dec. 2017, doi: 10.1109/ICCAIS.2017.8217588.
- R. K. Kodali and J. John, “Smart Monitoring of Solar Panels Using AWS,” *2020 International Conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and its Control, PARC 2020*, pp. 422–427, Feb. 2020, doi: 10.1109/PARC49193.2020.236645.
- J. Guamán, D. Guevara, C. Vargas, A. Ríos, and R. Nogales, “Solar Manager: Acquisition, Treatment and Isolated Photovoltaic System Information Visualization Cloud Platform,” *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 7, no. 1, pp. 214–223, Mar. 2017, doi: 10.20508/IJRER.V7I1.5334.G7003.
- G. Khambalkar, A. Wasurkar, R. Jibhakate, S. Dongare, and V. Chikhalonde, “Solar Power Monitoring System Using IOT Syatem,” 2023, Accessed: Dec. 05, 2023. [Online]. Available: www.ijert.org
- S. Deshmukh, P. D. L. Bhuyar, and A. T. Jadhav, “Review on IoT Based Smart Solar Photovoltaic Plant Remote Monitoring and Control Unit”.
- B. Shrihariprasath and V. Rathinasabapathy, “A smart IoT system for monitoring solar PV power conditioning unit,” *IEEE WCTFTR 2016 - Proceedings of 2016 World Conference on Futuristic Trends in Research and Innovation for Social Welfare*, Oct. 2016, doi: 10.1109/STARTUP.2016.7583930.

Estudio de la integración de IoT con sistemas de generación fotovoltaica OFF-GRID

- A. M. Eltamaly, M. A. Alotaibi, A. I. Alolah, and M. A. Ahmed, “IoT-Based Hybrid Renewable Energy System for Smart Campus,” *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 8555*, vol. 13, no. 15, p. 8555, Jul. 2021, doi: 10.3390/SU13158555.
- S. Adhya, D. Saha, A. Das, J. Jana, and H. Saha, “An IoT based smart solar photovoltaic remote monitoring and control unit,” *2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication, CIEC 2016*, pp. 432–436, Jul. 2016, doi: 10.1109/CIEC.2016.7513793.
- A. M. Elberry, J. Thakur, and J. Veysey, “Seasonal hydrogen storage for sustainable renewable energy integration in the electricity sector: A case study of Finland,” *J EnergyStorage*, vol. 44, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.EST.2021.103474.
- J. Tuuf, H. Lindén, S. Lieskoski, and M. Björklund-Sänkiäho, “Development of a nano-size off-grid energy system using renewables and IoT technologies at the Meteorita visitor center: A Finnish case study,” *Heliyon*, vol. 9, no. 11, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.HELIYON.2023.E21473.
- T. A. Dos Santos, F. G. de Freitas, D. L. C. Gonçalves, and L. M. Fernández-Ramírez, “Design and validation of IoT measurement system for photovoltaic generation,” *Ingenius*, vol. 2022, no. 28, pp. 44–52, Aug. 2022, doi: 10.17163/ING.S.N28.2022.04.
- C. A. Nallolla and P. Vijayapriya, “Optimal Design of a Hybrid Off-Grid Renewable Energy System Using Techno-Economic and Sensitivity Analysis for a Rural Remote Location,” *Sustainability 2022, Vol. 14, Page 15393*, vol. 14, no. 22, p. 15393, Nov. 2022, doi: 10.3390/SU142215393.
- “Real-Time Data Acquisition of Solar Panel Using Arduino | Arduino Project Hub.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: https://projecthub.arduino.cc/Aboubakr_Elhammoumi/real-time-data-acquisition-of-solar-panel-using-arduino-9c72ef
- M. A. A. Radia, M. K. E. Nimr, and A. S. Atlam, “IoT-based wireless data acquisition and control system for photovoltaic module performance analysis,” *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 6, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.prime.2023.100348.
- “IoT based photovoltaic monitoring system application”, doi: 10.1088/1742-6596/1367/1/012069.

Estudio de la integración de IoT con sistemas de generación fotovoltaica OFF-GRID

- A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, “A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things,” *Sensors 2016, Vol. 16, Page 1466*, vol. 16, no. 9, p. 1466, Sep. 2016, doi: 10.3390/S16091466.
- J. Park, J. Kim, S. Lee, and J. K. Choi, “Machine learning based photovoltaic energy prediction scheme by augmentation of on-site IoT data,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 134, pp. 1–12, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.FUTURE.2022.03.028.
- A. Malik, A. Haque, and V. S. B. Kurukuru, “IoT-based monitoring and management for photovoltaic system,” *Fault Analysis and its Impact on Grid-connected Photovoltaic Systems Performance*, pp. 291–318, Nov. 2022, doi: 10.1002/9781119873785.CH9.
- D. Hercog, T. Lerher, M. Truntič, and O. Težak, “Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices,” *Sensors 2023, Vol. 23, Page 6739*, vol. 23, no. 15, p. 6739, Jul. 2023, doi: 10.3390/S23156739.
- A. Mellit and S. Kalogirou, “Artificial intelligence and internet of things to improve efficacy of diagnosis and remote sensing of solar photovoltaic systems: Challenges, recommendations and future directions,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 143, p. 110889, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2021.110889.
- Y. Cheng, H. Saputra, L. M. Goh, and Y. Wu, “Secure smart metering based on LoRa technology,” *2018 IEEE 4th International Conference on Identity, Security, and Behavior Analysis, ISBA 2018*, vol. 2018-January, pp. 1–8, Mar. 2018, doi: 10.1109/ISBA.2018.8311466.

©2024 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).