



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE MISIONES



FACULTAD
DE INGENIERÍA
UNaM

Universidad Nacional de Misiones

Facultad de Ingeniería

Tesis de Grado

Gestión del Consumo de Energía en Microrredes Eléctricas

Para la obtención del grado de
Ingeniero en Computación

Por

**Krzyzanowski Clark Lucas Nicolás
Silva Pablo Eduardo**

Directores de Tesis:

**Mgrt. Ing. Fernández Guillermo Alfredo
Dr. Ing. Botterón Fernando**

Noviembre de 2025

Como miembros del Jurado de Tesis certificamos que hemos leído el documento de la Tesis preparada por Sr. KRZYZANOWSKI Clark Lucas Nicolás y el Sr. SILVA Pablo Eduardo, titulada “Gestión del Consumo de Energía en Microrredes Eléctricas” y recomendamos sea aceptada como parte de los requisitos para obtener el grado académico de INGENIERO EN COMPUTACIÓN.

La aprobación final y aceptación de este documento de Tesis estará condicionada a la presentación de la copia final ante el Comité Académico del INGENIERO EN COMPUTACIÓN. Oberá, 15 de Noviembre de 2025.

[Firma Jurado 1]

[Firma Jurado 2]

[Firma Jurado 3]

[Título Nombre y APELLIDO Jurado 1]

[Título Nombre y APELLIDO Jurado 2]

[Título Nombre y APELLIDO Jurado 3]

Oberá, 15 de Noviembre de 2025.

GESTIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA EN MICRORREDES ELÉCTRICAS

Krzyzanowski Lucas y Silva Pablo

Este material está publicado bajo la licencia Atribución-Compartir Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0 Int.) de Creative Commons Internacional. No puede usar este archivo excepto en conformidad con la Licencia. Puede obtener una copia de la Licencia en <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>.

Visite el sitio de Creative Commons para conocer el lenguaje específico que rige los permisos y limitaciones bajo la Licencia.

Puede descargar ese documento de la siguiente dirección de Internet:

<http://REPOSITORIO.unam.edu.ar/>.

Este libro fue escrito en L^AT_EX, un sistema de preparación de documentos libre.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE MISIONES



FACULTAD
DE INGENIERÍA
UNaM

Copyright © 2025 Krzyzanowski Lucas y Silva Pablo



Prologo

Prefacio

*“Nunca se puede resolver un problema
el mismo nivel en el que fue creado”*

Albert Einstein

Agradecimientos

Es importante dar las gracias a sus directores de tesis, supervisores, asesores estadísticos y otras personas que le hayan ayudado (por ejemplo, colegas que le hayan ofrecido apoyo o facilitado datos). También hay que mencionar a los organismos de financiación. También es habitual referirse a quienes han tenido que “aguantarle” durante el proceso de redacción de la tesis, normalmente familiares y amigos.

Índice General

Prologo	I
Prefacio	II
Agradecimientos	III
I Contextualización	2
1 Palabras Clave	3
2 Introducción	4
3 Antecedentes	10
4 Problemática	11
4.1 Justificación	11
4.2 Objetivos	11
4.2.1 Objetivo General	11
4.2.2 Objetivos Específicos	12
II Investigación	13
5 Marco Teórico	14
5.1 Teoría del control	14
5.2 Sistemas Multiagente	14
5.3 Agente de Carga(AC)	14
5.3.1 Medición de y cálculo de Tensión	15
5.3.2 bus CAN	15
5.3.3 Comunicacion Serial UART	15
5.3.4 Protocolo ESP-NOW	15
5.4 Nodo de Consumo(NC)	15
5.4.1 Medición y cálculo de Corriente	15
5.4.2 Teoria del consenso medio	15
5.4.3 Algoritmo de gestion del consumo	15

5.5 Internet de las cosas (IoT)	16
5.5.1 MQTT	16
5.5.2 Docker	16
5.5.3 Base de datos	16
6 Arquitectura del sistema	17
7 Análisis de Mercado	18
7.1 Seccionamiento del Mercado	18
7.1.1 Análisis de demanda	18
7.1.2 Análisis de oferta	18
7.1.3 Análisis de precios	18
III Desarrollo	19
8 Hardware	20
9 Firmware	23
10 Plataforma IoT	24
IV Anexos	26
Anexos	27
Circuito Esquemático del Nodo de Consumo (NC)	27
Acrónimos	29
Glosario de Términos	30
V Referencias	32
Bibliografía	33

Índice de Imágenes

8.1 Hardware desarrollado para el Agente de Carga(AC)	21
8.2 Hardware desarrollado para el Nodo de Consumo(NC)	22
10.1Plataforma-IoT Propuesta	25

Índice de Tablas

Índice Comentado

Organización de la Memoria de la Tesis

La memoria de esta tesis se organiza según la siguiente estructura:

En el Capítulo 2: [Introducción](#) (desde la página [4](#)),

Parte I

Contextualización

CAPÍTULO 1

Palabras Clave

Generación Distribuida; Microrredes; Energías Renovables; Escuelas de la Familia Agrícola (EFA); Gestión de Energía; Control Jerárquico;

CAPÍTULO 2

Introducción

“La ciencia es el padre del conocimiento, pero las opiniones son las que engendran la ignorancia.”

Hipócrates

A nivel mundial la producción de energía eléctrica está basada predominantemente en un modelo centralizado, donde grandes centrales de generación, interconectadas entre sí, abastecen a los centros de consumo. Estas centrales mayormente utilizan para la generación combustibles fósiles, energía hidráulica o energía nuclear y suelen ubicarse lejos de los consumidores. La gran distancia entre los puntos de generación y los usuarios finales implica que la energía eléctrica deba ser transportada y distribuida mediante extensas redes, propiciando dos desventajas principales: una mayor vulnerabilidad a las interrupciones generalizadas del suministro y pérdidas de energía significativas en la transmisión [1]. Por otra parte, a esto se agrega que las

instalaciones de producción a gran escala presentan un impacto ambiental considerable, ya que la construcción y operación de estas alteran profundamente los ecosistemas en los que son instalados [2].

Actualmente el modelo de generación centralizado está siendo modificado debido al incremento de sistemas de generación que son conectados a la red de distribución, tanto por clientes industriales como residenciales. En los últimos años ha tomado relevancia este tipo de generación distribuida, propiciando una solución a los inconvenientes surgidos con el esquema de generación centralizada.

La Generación Distribuida (GD) consiste en la producción de energía eléctrica mediante pequeñas fuentes de generación ubicadas cerca de los puntos de consumo, en contraposición a lo que sucede en el modelo tradicional centralizado [3]. En este esquema de generación se utiliza una amplia gama de tecnologías, generalmente (aunque no siempre) bajas en emisiones de carbono (por ej. solar, eólica, biomasa) o más eficientes (por ej. cogeneración de calor y electricidad), que proporcionan beneficios asociados al ahorro en la transmisión y distribución de la energía (reducción de pérdidas), eliminación de costosas infraestructuras, incremento en la diversificación de fuentes de energía, adaptación a las demandas (usando generadores modulares) y mejoras al acceso a la energía en áreas remotas o rurales, entre otras [4]. La GD permite una producción de energía eléctrica más accesible, eficiente, fiable y con menor impacto al medioambiente que en el caso del esquema de generación centralizado.

Con el fin de integrar diferentes recursos energéticos distribuidos a las redes eléctricas existentes, en el año 2002 surge el concepto de Microrred [5]. El mismo es definido como aquellos sistemas integrados, que combinan elementos tales como generadores, dispositivos de almacenamiento y cargas eléctricas ubicados dentro de un área delimitada, con la capacidad de operar tanto de forma autónoma como conectadas a la red de distribución principal [6]. El término Microrred hace referencia a un pequeño número de recursos energéticos (fuentes y almacenadores de energía) que puede actuar como una entidad única a nivel de red y proporcionar un modo de funcionamiento desconectado (autónomo) o conectado a la red, brindando así el suministro de energía permanente a las cargas eléctricas locales [7]. En el modo de operación autónomo puede aprovecharse los recursos energéticos locales (fuentes y almacenamiento de energía), satisfaciendo la carga de la microrred; mientras que, en el modo conectado a la red, es habilitado el intercambio de energía con la misma. La importación de energía a la microrred puede darse cuando la disponibilidad de los recursos energéticos es insuficiente, mientras que la microrred podrá exportar energía a la red eléctrica de distribución cuando hay excedentes en la generación de energía eléctrica. Estos modos de operación permiten la adaptación de las microrredes a diferentes condiciones requeridas por sus

elementos, mejorando la eficiencia, confiabilidad y resiliencia del sistema eléctrico que abastece a las cargas [8]. Esto contribuye a los beneficios propios de los sistemas de GD mencionados, haciendo que la red eléctrica ya no sea un sistema unidireccional de transferencia de energía.

Considerando el bus que permite la transferencia de energía entre los componentes de las microrredes (generadores, sistemas de almacenamiento y cargas), estas pueden clasificarse en tres tipos fundamentales [9], [10]:

Microrredes de corriente alterna (M-CA): poseen un bus o barra de CA al que se conectan generación, almacenamiento y cargas. Estos sistemas presentan una integración sencilla a la red eléctrica convencional; utilizan tecnologías maduras, especialmente en convertidores y transformadores; pero se requieren conversiones extras cuando las fuentes y/o cargas son de CC (ej. paneles fotovoltaicos, baterías, electrónica de potencia, entre otras), lo que reduce la eficiencia.

Microrredes de corriente continua (M-CC): se estructuran alrededor de un bus de CC. Presentan una eficiencia más alta al evitar múltiples conversiones (paneles fotovoltaicos y baterías pueden conectarse directamente); son adecuadas para cargas modernas que ya trabajan en CC (iluminación LED, vehículos eléctricos, entre otros); no presentan los inconvenientes de sincronización y estabilidad típicos de CA. Pero aún falta estandarización en niveles de tensión y dispositivos de protección a utilizar en este tipo de microrredes.

Microrredes híbridas (M-CACC): combinan buses de CA y CC interconectados mediante convertidores electrónicos de potencia bidireccionales, permitiendo aprovechar las ventajas de ambos. Estos sistemas presentan flexibilidad para integrar recursos y cargas en CA y CC al mismo tiempo; hay mayor eficiencia energética (menos conversiones extras); tienen mejor capacidad de resiliencia y adaptabilidad en ambos modos de operación (autónomo y conectado a red). Pero requieren una mejor coordinación del control entre los dos buses y presentan mayor complejidad en el diseño.

En los últimos años las M-CC han experimentado un desarrollo significativo debido a que ofrecen ventajas notables en relación a eficiencia energética, simplicidad de control y adaptabilidad a las tecnologías modernas. Estas características las hacen especialmente idóneas para entornos con alta penetración de fuentes de generación renovable (como paneles fotovoltaicos) y cargas electrónicas, que son naturalmente de CC [11]. Para que las M-CC puedan operar adecuadamente en los modos autónomo y conectado a red, es necesario que sus componentes incorporen convertidores electrónicos de potencia (del tipo CC-CC y CC-CA). Estos dispositivos cumplen el rol de interfaz entre los elementos del sistema y el bus de tensión de CC que los interconecta. Para

asegurar la estabilidad, la calidad de la energía y la eficiencia económica de la microrred, los convertidores mencionados deben operar bajo una estructura de control que contemple diversas estrategias, en función de la tarea específica que desempeñen dentro de la microrred. Entre las arquitecturas de control más aceptadas en la comunidad científica, se encuentra el “control jerárquico”, el cual organiza las funciones de control en distintos niveles, cada uno con objetivos definidos y operando en diferentes escalas de tiempo [12].

En una M-CC donde los sistemas de generación y almacenamiento de energía se interconectan al bus de tensión de CC mediante convertidores CC-CC que operan con control local de corriente y tensión (control de nivel 0), el sistema de control jerárquico para esta microrred puede dividirse en tres niveles que actúan de manera coordinada y cumplen con los siguientes objetivos [13]:

Control Primario: opera a nivel local y es responsable de tareas tales como la regulación de voltaje del bus de CC y el reparto de la carga entre los recursos energéticos (generadores y almacenadores de energía) en proporción a la capacidad máxima de los mismos. Para implementar este nivel de control se utilizan únicamente mediciones locales (sin comunicación externa), operando en el orden de los milisegundos a segundos.

Control Secundario: permite la restauración de las desviaciones ocasionadas por el control primario (tensión del bus de CC) y mejora el reparto de carga. Generalmente utiliza enlaces de comunicación para recopilar datos y realizar ajustes a nivel del sistema. Actúa en el orden de los segundos a minutos.

Control Terciario: proporciona el nivel más avanzado de supervisión de la microrred, centrándose en la optimización (operación económica), la regulación global y la gestión de energía del sistema. También puede integrar demandas de la red eléctrica principal (por ej. venta de energía eléctrica) y coordinar múltiples microrredes interconectadas. Opera en el orden de los minutos a horas.

Según cómo se toman las decisiones de control y dónde reside la “inteligencia” del sistema [14], el control jerárquico de la M-CC puede implementarse combinando estrategias de control centralizadas, descentralizadas y distribuidas [15]. Las estrategias de control centralizadas utilizan un controlador único que decide actuar basándose en información global de la microrred; si bien esto favorece una coordinación precisa entre los componentes del sistema, el control es vulnerable a fallos en el controlador y/o las comunicaciones, pudiendo paralizar la operación de la microrred. En las estrategias de control descentralizado, cada controlador aplicado a los convertidores opera con mediciones locales, sin comunicación con otros dispositivos; esto reduce la vulnerabilidad a

fallos y facilita la escalabilidad del sistema, pero limita el conocimiento del estado global del sistema, afectando a objetivos tales como el balance de potencia y/o la reducción de costos de operación de la microrred. En las estrategias de control distribuidas, los controladores de los convertidores intercambian información limitada para coordinar decisiones; si un convertidor falla, los demás mantienen operativa la microrred; de esta forma se combina tolerancia a fallos y conocimiento global de la microrred, pero requiere protocolos de comunicación robustos.

La gestión de energía que forma parte del control terciario de las M-CC consiste en una serie de estrategias de control aplicadas a la generación, el almacenamiento y las cargas (consumo) del sistema [16]. En el caso de la generación, la gestión de energía consiste en modificar el modo de operación de las interfaces (convertidores) que conectan a las fuentes de energía con el bus de tensión de CC de la microrred, cambiando entre los modos control de tensión de bus y seguimiento del punto de máxima potencia según el resultado del balance entre generación y consumo de energía en el sistema [17], [18]. Para el almacenamiento, la gestión de energía consiste en controlar la carga y descarga de las baterías utilizadas considerando el balance entre generación y consumo de energía; también se considera el estado de carga de estos dispositivos en la toma de decisiones sobre importar o exportar energía de la red eléctrica y para complementar la operación con dispositivos de almacenamiento de respuesta transitoria rápida (supercapacitores), que permiten afrontar variaciones bruscas en la tensión del bus de la microrred [19], [20]. Por otra parte, la gestión de energía del lado del consumo de la microrred está relacionada con la gestión de la carga, donde puede aplicarse un esquema de selección de cargas a abastecer, siendo estas clasificadas en cargas críticas y no críticas [21]; las primeras son aquellas cargas cuya alimentación debe garantizarse en todo momento y el sistema de gestión de energía de la microrred da prioridad absoluta a su suministro, mientras que las segundas son las que pueden desconectarse o alimentarse solo cuando hay excedente de energía y la cantidad de energía almacenada lo permite (es decir, se activan únicamente después de asegurar la alimentación de las cargas críticas de la microrred).

Atendiendo a lo anterior, este trabajo se enfoca en la gestión del consumo (carga) de una M-CC utilizada para proporcionar parte de la energía eléctrica utilizada en un establecimiento educativo de la provincia de Misiones, que pertenece a las denominadas Escuelas de la Familia Agrícola (EFA). Estas instituciones se caracterizan por estar emplazadas en zonas rurales de la provincia, donde el suministro eléctrico de red presenta inconvenientes debido a fallas frecuentes en las líneas de transmisión o bien por la ausencia de infraestructura adecuada para su mantenimiento. A esto se suma la existencia de fuertes tormentas eléctricas y las dificultades en la reparación de las líneas que son derivadas del terreno accidentado y de la densa vegetación existente en

las zonas rurales de la provincia. Los inconvenientes mencionados resultan en un servicio eléctrico rural con cortes prolongados y fluctuaciones en el voltaje del suministro, que afectan a las necesidades básicas como la refrigeración de alimentos, el bombeo de agua y la iluminación.

Para contribuir a la solución del inconveniente mencionado, el proyecto de investigación “Bombeo de agua con energías renovables, almacenamiento de energía y conexión a la red para pequeñas huertas rurales comunitarias: Estudio, diseño y puesta en funcionamiento”, en el que se enmarca este trabajo, propone el uso de una M-CC basada en paneles fotovoltaicos y almacenamiento con baterías, para abastecer parte de la instalación eléctrica del establecimiento. La Figura 1 muestra el esquema de esta microrred. La misma opera adecuadamente en los modos conectado y desconectado de la red eléctrica, gracias al sistema de control distribuido conformado por cinco agentes (AG, AB, AR, AS y AC) que actúan en forma autónoma y en conjunto para gestionar el modo de operación de las interfaces de potencia (rectificador, convertidores e inversores), asociadas a cada componente de la microrred. De esta forma, a través de los agentes se logra una gestión de los recursos energéticos (fuente y almacenamiento), interacción con la red eléctrica, gestión de las cargas (consumo) y detección/actuación ante fallas en los componentes de la microrred. Este sistema de supervisión multiagente constituye un sistema computacional distribuido, donde los agentes toman decisiones y actúan de forma autónoma a partir de información local e información distribuida por los demás agentes del sistema, con el fin de alcanzar objetivos comunes [22]; en comparación con estrategias de control centralizadas y descentralizadas, esta estrategia de control distribuida combina tolerancia a fallos y conocimiento global de la microrred, lo cual mejora la resiliencia en su funcionamiento y también la escalabilidad en relación al agregado de nuevos componentes a la misma [23].

CAPÍTULO 3

Antecedentes

“La matemática es la ciencia del orden y la medida, de bellas cadenas de razonamientos, todos sencillos y fáciles”.

René Descartes

CAPÍTULO 4

Problemática

4.1. Justificación

4.2. Objetivos

4.2.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de gestión inteligente de cargas en una MR de fuentes renovables, principalmente de paneles fotovoltaicos, que optimice el consumo de energía priorizando cargas críticas en función de la disponibilidad energética, e incorpore una plataforma para la visualización de métricas relacionadas.

4.2.2. Objetivos Específicos

- Identificar las necesidades y características clave para el monitoreo y control del consumo energético en una MR, seleccionando aquellas que resulten más relevantes y eficientes para los procesos de medición y transmisión de información.
- Diseñar e implementar un sistema integral de medición, adquisición y visualización de datos, que permita la comunicación efectiva entre nodos y facilite la optimización del uso de la energía generada por fuentes renovables.
- Determinar las condiciones operativas de prueba tanto favorables como desfavorables para someter al sistema. Para esto se pueden establecer diferentes perfiles de irradiación según la zona, como así diferentes consumos dependiendo de la estación del año, entre otras.
- Validar el correcto funcionamiento del sistema para las diferentes condiciones.

Parte II

Investigación

CAPÍTULO 5

Marco Teórico

5.1. Teoría del control

asd

5.2. Sistemas Multiagente

asd

5.3. Agente de Carga(AC)

asd

5.3.1. Medición de y cálculo de Tensión

sad

5.3.2. bus CAN

sad

5.3.3. Comunicacion Serial UART

sad

5.3.4. Protocolo ESP-NOW

sad

5.4. Nodo de Consumo(NC)

5.4.1. Medición y cálculo de Corriente

asd

5.4.2. Teoria del consenso medio

asd

5.4.3. Algoritmo de gestion del consumo

asd

5.5. Internet de las cosas (IoT)

5.5.1. MQTT

asd

5.5.2. Docker

asd

5.5.3. Base de datos

asdas

CAPÍTULO **6**

Arquitectura del sistema

CAPÍTULO 7

Análisis de Mercado

En este capítulo se realizará un análisis del mercado actual relacionado con los sistemas de gestión energética, enfocándose en las soluciones existentes, sus características y limitaciones. Se evaluarán diferentes productos y tecnologías disponibles, así como las tendencias emergentes en el sector.

7.1. Seccionamiento del Mercado

7.1.1. Análisis de demanda

7.1.2. Análisis de oferta

7.1.3. Análisis de precios

Parte III

Desarrollo

CAPÍTULO 8

Hardware

En este capítulo se describirá el desarrollo del hardware implementado en los dispositivos del sistema de gestión energética propuesto. Se detallarán los componentes principales, el diseño del circuito y las consideraciones técnicas tomadas durante el proceso de desarrollo.



Imagen 8.1: Hardware desarrollado para el Agente de Carga(AC)

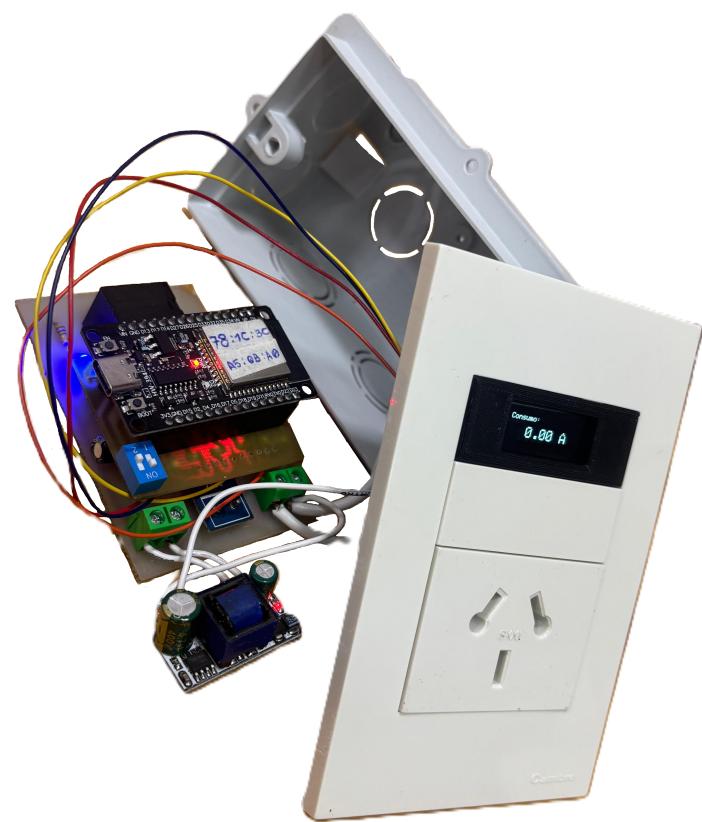


Imagen 8.2: Hardware desarrollado para el Nodo de Consumo(NC)

CAPÍTULO 9

Firmware

En este capítulo se describirá el desarrollo del firmware implementado en los dispositivos del sistema de gestión energética propuesto. Se detallarán las funcionalidades principales, la arquitectura del software y los protocolos de comunicación utilizados.

CAPÍTULO 10

Plataforma IoT

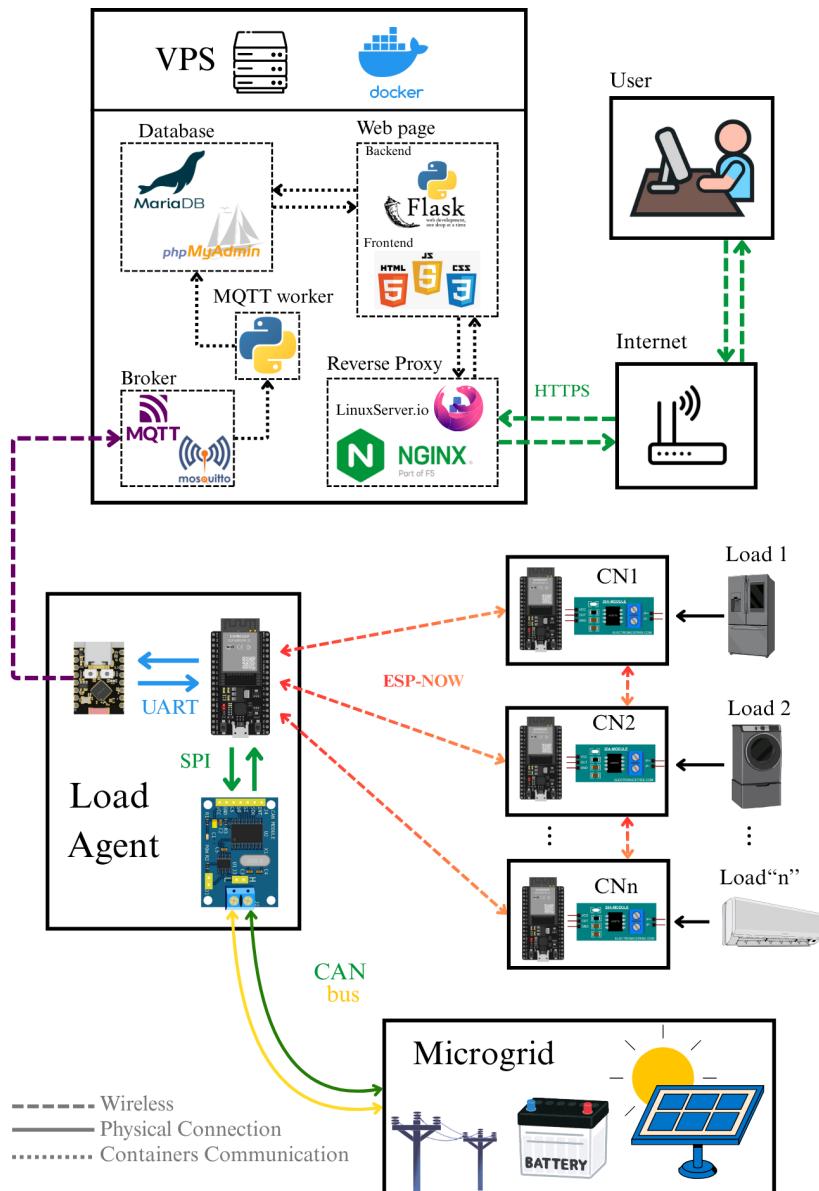


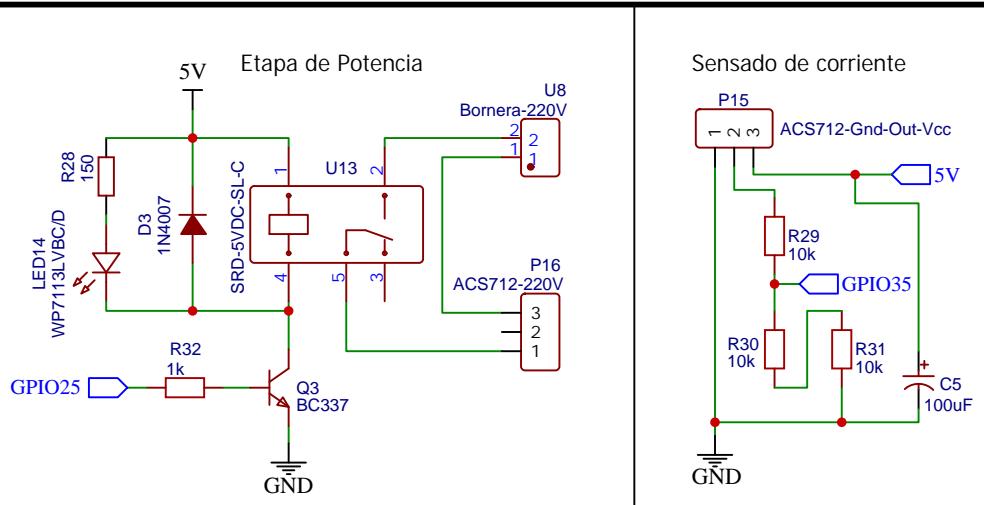
Imagen 10.1: Plataforma-IoT Propuesta

Parte IV

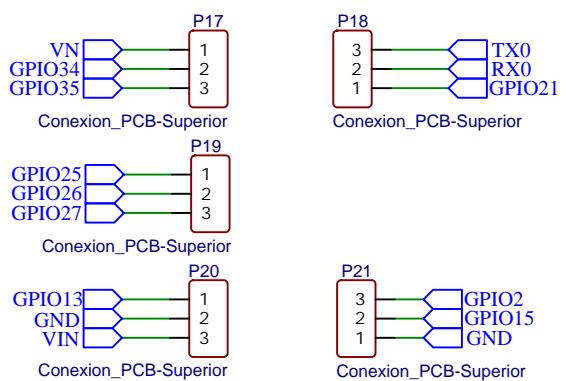
Anexos

Círculo Esquemático del Nodo de Consumo (NC)

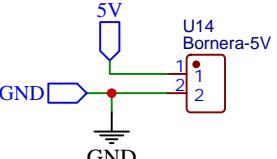
PLACA INFERIOR



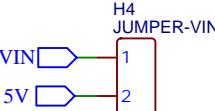
Pines que interconectan las placas



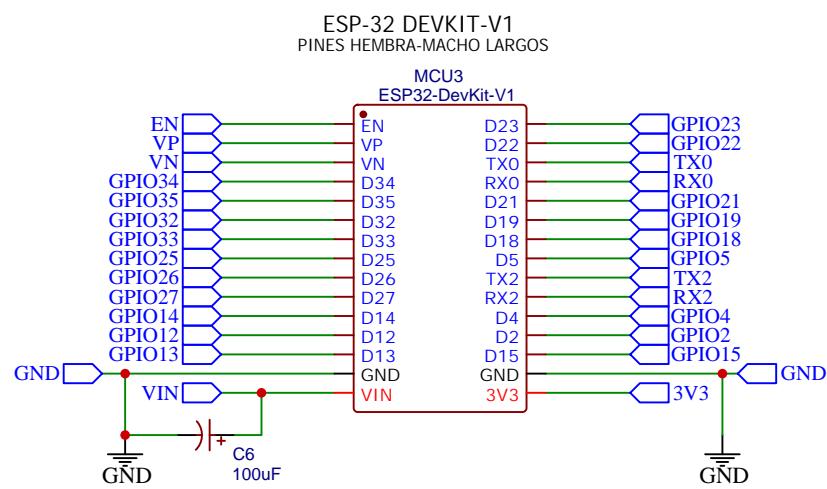
Alimentaci ó n 5V



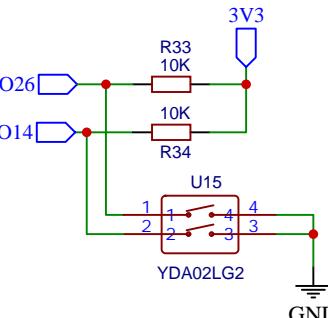
Jumper VIN/USB



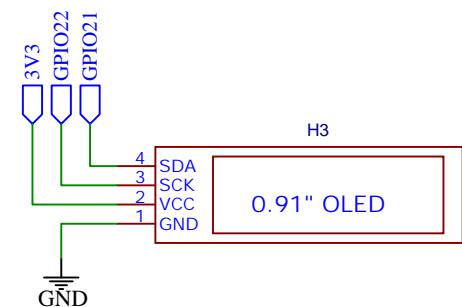
PLACA SUPERIOR



Dipswitch selector de prioridad



Display oled 0,91" indicador



TITLE:

nodo-carga-v3

REV: 1.0

Acrónimos

HTTP Protocolo de Transferencia de Hipertexto (Hypertext Transfer Protocol), utilizado para la comunicación y transferencia de datos en la World Wide Web [29](#)

P2P Red “peer-to-peer” (par a par), un modelo de intercambio directo de recursos entre usuarios sin necesidad de un servidor central [29](#)

URL Localizador Uniforme de Recursos (Uniform Resource Locator), una dirección web que especifica la ubicación de un recurso en Internet y el mecanismo para acceder a él [29](#)

WWW World Wide Web, sistema global de información basado en hipertexto que permite acceder y navegar por múltiples recursos en Internet [29](#)

Glosario de Términos

- brecha digital** Desigualdad en el acceso, uso y apropiación de tecnologías entre distintos grupos sociales, geográficos, económicos o culturales [29](#)
- compilador** Programa que transforma código fuente escrito por un programador en instrucciones ejecutables por una computadora [29](#)
- conectividad** Capacidad de conexión e interacción mediante tecnologías digitales, asociada también al capital social y las prácticas comunicacionales [29](#)
- LaTeX** Sistema de preparación de documentos basado en TeX, desarrollado por Leslie Lamport, ampliamente utilizado en el ámbito académico y científico [29](#)
- metadatos** Datos estructurados que describen, explican y permiten localizar o gestionar recursos de información [29](#)
- multiplataforma** Software o tecnología capaz de ejecutarse e interoperar en múltiples sistemas operativos o entornos digitales [29](#)
- nube** Modelo de computación que permite utilizar software, procesamiento y almacenamiento a través de Internet sin intervención local [29](#)
- online** Estado de conexión a una red digital, generalmente Internet, o actividad realizada a través de ella [29](#)
- plataforma** Infraestructura tecnológica y sociocultural que integra hardware, software, algoritmos y políticas, mediando prácticas sociales y producciones de contenido [29](#)
- Twitter** Servicio de microblogging para la publicación breve y dinámica de mensajes [29](#)

Web 2.0 Conjunto de sitios web que priorizan la colaboración, participación del usuario, interoperabilidad y generación de contenido en la World Wide Web [29](#)

Parte V

Referencias

Bibliografía

Bibliografía

- [1] L. Mehigan, J. P. Deane, B. P. O. Gallachóir y V. Bertsch, «A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems,» *Energy*, vol. 163, págs. 822-836, 2018.
- [2] E. Olivera Fujiwara, «Energía y medio ambiente,» *Revista Mexicana de Opinión Pública*, n.º 9, págs. 51-65, 2010.
- [3] N. Shaukat, R. Islam, M. Rahman, B. Khan, B. Ullah y S. M. Ali, «Decentralized, Democratized, and Decarbonized Future Electric Power Distribution Grids: A Survey on the Paradigm Shift From the Conventional Power System to Micro Grid Structures,» *IEEE Access*, vol. 11, págs. 60 957-60 987, 2023.
- [4] G. Allan, I. Eromenko, M. Gilmartin, I. Kockar y P. McGregor, «The economics of distributed energy generation: A literature review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, págs. 543-556, 2015.
- [5] R. Lasseter et al., *Integration of Distributed Energy Resources - The CERTS MicroGrid Concept*, Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS) report, 2002.
- [6] P. K. Olulope, O. A. Odetoye y M. O. Olanrewaju, «A review of emerging design concepts in applied microgrid technology,» *AIMS Energy*, vol. 10, n.º 4, págs. 776-800, 2022.
- [7] M. Uddin, H. Mo, D. Dong, S. Elsawah, J. Zhu y J. M. Guerrero, «Microgrids: A review, outstanding issues and future trends,» *Energy Strategy Reviews*, vol. 49, págs. 101-127, 2023.

- [8] T. E. K. Zidane et al., «Power systems and microgrids resilience enhancement strategies: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 207, pág. 114 953, 2025.
- [9] T.-G. Kim, H. Lee, C.-G. An, J. Yi y C.-Y. Won, «Hybrid AC/DC Microgrid Energy Management Strategy Based on Two-Step ANN,» *Energies*, vol. 16, n.º 4, pág. 1787, 2023.
- [10] Y. Lei et al., «Research on a Novel AC/DC Hybrid Microgrid Based on Silicon Controlled Converters and Polarity Reversal Switches,» *Sensors*, vol. 25, n.º 6, pág. 1766, 2025.
- [11] A. Mittal, A. Rajput, J. Kamya y R. Kandari, «Microgrids, their types and applications,» en *Microgrids: Modeling, Control and Applications*, J. M. Guerrero y R. Kandari, eds., Academic Press, 2022, págs. 3-40.
- [12] Z. Shuai, J. Fang, F. Ning y Z. J. Shen, «Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, págs. 3670-3682, 2018.
- [13] A. W. Adegboyega, S. Sepasi, H. O. R. Howlader, B. Griswold, M. Matsuura y L. R. Roose, «DC Microgrid Deployments and Challenges: A Comprehensive Review of Academic and Corporate Implementations,» *Energies*, vol. 18, n.º 5, 2025.
- [14] F. S. Al-Ismail, «DC Microgrid Planning, Operation, and Control: A Comprehensive Review,» *IEEE Access*, vol. 9, págs. 36 154-36 172, 2021.
- [15] G. Ahmad, A. Hassan, A. Islam, M. Shafiullah, M. A. Abido y M. Al-Dhaifallah, «Distributed control strategies for microgrids: A critical review of technologies and challenges,» *IEEE Access*, vol. 13, págs. 60 702-60 719, 2025.
- [16] M. Shafiullah et al., «Review of Recent Developments in Microgrid Energy Management Strategies,» *Sustainability*, vol. 14, n.º 22, pág. 14 794, 2022.
- [17] Y. Alidrissi, R. Ouladsine, A. Elmouatamid, M. Bakhouya, N. El Kamoun y K. Zine-Dine, «An energy management strategy for DC microgrids with PV/battery systems,» *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 16, n.º 3, págs. 1285-1296, 2021.
- [18] F. Li, Z. Shi, Z. Zhu e Y. Gan, «Energy Management Strategy for Direct Current Microgrids with Consideration of Photovoltaic Power Tracking Optimization,» *Energies*, vol. 18, n.º 2, pág. 252, 2025.
- [19] H. Lee et al., «Energy Management System of DC Microgrid in Grid-Connected and Stand-Alone Modes: Control, Operation and Experimental Validation,» *Energies*, vol. 14, n.º 3, pág. 581, 2021.

- [20] M. Panda, M. Chankaya, S. Mohanty y S. D. Sandeep, «State-of-charge-based energy management strategy for hybrid energy storage system in DC microgrid,» *IEEE Access*, vol. 13, págs. 77 353-77 364, 2025.
- [21] M. F. Elmorshedy, U. Subramaniam, J. S. Mohamed Ali y D. Almakhles, «Energy Management of Hybrid DC Microgrid with Different Levels of DC Bus Voltage for Various Load Types,» *Energies*, vol. 16, n.º 14, pág. 5438, 2023.
- [22] V. Stennikov, E. Barakhtenko, G. Mayorov y D. Sokolov, «Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach,» *Applied Energy*, vol. 309, pág. 118 487, 2022.
- [23] N. Altin, S. E. Eyimaya y A. Nasiri, «Multi-Agent-Based Controller for Microgrids: An Overview and Case Study,» *Energies*, vol. 16, n.º 5, pág. 2445, 2023.