



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:

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

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
en 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 Y Estado del Arte	10
4 Problemática	11
4.1 Justificación	11
4.2 Objetivos	13
4.2.1 Objetivo General	13
4.2.2 Objetivos Específicos	13
II Investigación	14
5 Marco Teórico	15
5.1 Teoría del control	15
5.1.1 Estructura de control jerárquico	15
5.2 Micorrredes eléctricas	15
5.3 Sistemas Multiagente	15
5.3.1 Teoría del consenso medio	15
5.4 Tencnologías de comunicación	16
5.4.1 bus CAN	16
5.4.2 ESP-NOW	16
5.4.3 UART	17
5.4.4 I ² C	18
5.4.5 MQTT	18

5.5 Medición de Variables Fisicas	19
5.5.1 Conversor Análogo-Digital(ADC)	19
5.5.2 Sensor de Tensión ZMPT101B	19
5.5.3 Sensor de corriente ACS712	19
5.6 Contenerización Docker	19
5.6.1 Broker MQTT	19
5.6.2 Base de Datos	19
5.6.2.1 SQL	19
5.6.3 NGINX	20
6 Arquitectura del sistema	21
6.1 Agente de Carga (AC)	22
6.2 Nodo de Consumo (NC)	23
6.2.1 Lógica del Algoritmo de priorización de las Cargas	24
6.3 Visualización de datos de manera remota	24
7 Análisis de Mercado	26
7.1 Seccionamiento del Mercado	27
7.1.1 Análisis de demanda	28
7.1.2 Análisis de oferta	28
7.1.3 Análisis de precios	28
III Desarrollo y Resultados	29
8 Control prioritario de la demanda de energía de las cargas	30
9 Agente de Carga (AC)	31
9.1 Hardware	31
9.2 Firmware	32
10 Nodo de Consumo (NC)	33
10.1Hardware	33
10.2Firmware	34
11 Plataforma IoT	35
12 Integración del Sistema de Gestión de Consumos	36
IV Discusión y Conclusiones	39
13 Discusion	40
14 Conclusiones	41

15 Trabajo a Futuro	42
V Anexos	43
Círculo Esquemático del Nodo de Consumo (NC)	44
Acrónimos	46
Glosario de Términos	47
VI Referencias	49

Índice de Imágenes

6.1 Arquitectura para el sistema propuesto	22
6.2 Diagrama esquemático del Agente de Carga (AC)	23
6.3 Diagrama esquemático del Nodo de Consumo (NC)	23
6.4 Diagrama de Flujo del algoritmo de priorización de las cargas en el NC	24
6.5 Plataforma-IoT Propuesta	25
9.1 Hardware desarrollado para el Agente de Carga(AC)	31
10.1Hardware desarrollado para el Nodo de Consumo(NC)	33
11.1Plataforma-IoT realizada	35
12.1Integración completa del Sistema de Gestión de Consumos	37
12.2Conexión de cargas para ensayo de la gestión del consumo	38
12.3Resultados del ensayo de la gestión de consumos	38

Índice de Tablas

8.1 Niveles de prioridad de carga	30
---	----

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 Y Estado del Arte

“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

La problemática se aborda considerando un aspecto crítico de los sistemas de generación distribuida y de las microrredes que, en la práctica, suele quedar relegado en las soluciones comerciales y académicas: la gestión distribuida, automática y priorizada de las cargas finales sin depender de un controlador central. Aunque existen sistemas que supervisan la generación y el consumo global, tal como se indicó en los antecedentes, son escasos los que actúan directamente sobre las cargas individuales en función de la disponibilidad energética real, y aún menos los que lo hacen de manera descentralizada, autónoma y con capacidad efectiva de actuación sobre los puntos de consumo. Este vacío es especialmente evidente cuando la oferta energética es variable y se requiere un mecanismo fiable para decidir qué dispositivos deben permanecer conectados y cuáles deben desconectarse sin comprometer la operación del sistema.

Esta necesidad adquiere especial relevancia en microrredes aisladas, donde la capacidad de generación es finita y la demanda varía en función de las necesidades.

Tal como plantea [24], estos sistemas se enfrentan habitualmente a escenarios de déficit de suministro, que obligan a las comunidades a afrontar apagones durante días de baja generación o en momentos críticos. En muchos entornos rurales —frecuentes en países en desarrollo— las inversiones necesarias para ampliar la generación o incorporar nuevos recursos no son viables en el corto plazo, lo que convierte a la gestión eficaz del lado de la demanda en un elemento indispensable para garantizar la continuidad de servicio. Bajo estas condiciones, el control puramente centralizado resulta insuficiente para reaccionar ante variaciones rápidas en la disponibilidad energética, por lo que se requiere incorporar mecanismos de actuación local capaces de priorizar cargas esenciales.

En este contexto, la propuesta técnica presentada busca cubrir precisamente esa limitación. El sistema permite determinar, de manera completamente automática, qué cargas se mantienen activas y cuáles deben desconectarse temporalmente cuando la energía disponible no alcanza para sostener toda la demanda. Para ello, monitoriza variables eléctricas relevantes en cada punto de consumo e incorpora una lógica de control ejecutada localmente en cada microcontrolador asociado, que toma decisiones según la prioridad asignada por el usuario. Este enfoque evita realizar modificaciones en los equipos que conforman la microrred —como inversores, rectificadores o bancos de baterías—, lo que facilita la instalación, conserva las garantías del equipamiento existente y evita incompatibilidades técnicas.

El sistema opera además con carácter modular, lo que permite aplicarlo selectivamente en cualquier punto de consumo. La cantidad de nodos puede ampliarse o reducirse sin alterar la arquitectura eléctrica general, algo especialmente valioso en entornos donde las necesidades energéticas varían con el tiempo o donde se incorporan cargas nuevas. Desde el punto de vista técnico, la propuesta constituye una adaptación innovadora de tecnologías conocidas —sensores de corriente, microcontroladores y comunicaciones inalámbricas de baja latencia— combinadas bajo una estrategia de control distribuido que atiende una necesidad aún no resuelta en la literatura: la actuación autónoma y priorizada directamente sobre las cargas finales.

En síntesis, no se busca controlar la microrred en su totalidad ni sustituir los sistemas de supervisión existentes, sino complementarlos mediante un mecanismo eficiente de gestión local del consumo. Esta capacidad aporta mejoras tangibles en eficiencia operativa, autonomía y sustentabilidad, al permitir que la demanda se adapte dinámicamente a la disponibilidad energética, fortaleciendo la resiliencia y el desempeño general de la microrred, especialmente en escenarios aislados o con restricciones severas de capacidad.

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 radiación según la zona, así como 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

5.1.1. Estructura de control jerárquico

a

5.2. Micorrredes eléctricas

5.3. Sistemas Multiagente

5.3.1. Teoría del consenso medio

a

5.4. Tencnologías de comunicación

5.4.1. bus CAN

El protocolo CAN (Controller Area Network) es un sistema de comunicación serial robusto y altamente confiable, desarrollado originalmente por Bosch para permitir el intercambio eficiente de información entre múltiples dispositivos en entornos embebidos. De acuerdo con la descripción técnica recopilada por National Instruments, todos los nodos conectados al bus comparten el mismo medio físico y reciben cada mensaje transmitido, decidiendo de manera autónoma si la información es relevante para ellos. Esta característica elimina la necesidad de una unidad central de control y favorece arquitecturas distribuidas. Una de las propiedades más destacadas de CAN es su método de arbitraje no destructivo. Cuando dos nodos intentan transmitir simultáneamente, el bus no sufre colisiones que invaliden los datos, sino que el protocolo determina de inmediato qué mensaje posee mayor prioridad. Esto se logra mediante la comparación bit a bit del identificador del mensaje, donde el ID con mayor precedencia conserva el acceso mientras el resto de los nodos interrumpe su transmisión. En lo referido a integridad, CAN incorpora mecanismos avanzados de detección de errores, incluidos códigos CRC, supervisión continua de bit y campos especiales que anuncian la presencia de fallos. Cuando se detecta un error, la trama afectada se descarta y el transmisor envía una señal que obliga a repetir el envío. Además, el protocolo incluye un sistema de confinamiento que evita que nodos con fallas reiteradas degraden el funcionamiento del bus, pudiendo incluso desconectarlos temporalmente si alcanzan ciertos umbrales de error. Finalmente, la topología del bus CAN permite reducir significativamente el cableado respecto de los sistemas punto a punto tradicionales, ya que todos los dispositivos comparten un único par de líneas diferenciales. Este enfoque simplifica el diseño físico, reduce costos y mantiene la inmunidad al ruido, lo que explica su amplia adopción en la industria automotriz y en sistemas embebidos de alta exigencia.[\[25\]](#)

5.4.2. ESP-NOW

ESP-NOW es un protocolo inalámbrico definido por Espressif que posibilita la comunicación directa entre dispositivos sin necesidad de utilizar un punto de acceso. Su diseño se basa en el uso de tramas específicas de acción en la capa de enlace, lo que reduce la complejidad del intercambio de datos y disminuye la latencia respecto de otros protocolos que requieren capas adicionales del modelo OSI. Este enfoque favorece arquitecturas de comunicación altamente eficientes, especialmente en aplicaciones que

deben operar con recursos limitados. El protocolo puede coexistir con Wi-Fi y Bluetooth Low Energy en un mismo chip, lo cual permite combinar conectividad local de baja latencia con acceso remoto mediante redes tradicionales. En materia de seguridad, ESP-NOW emplea cifrado basado en CCMP, un esquema incluido en los estándares IEEE 802.11. Para ello utiliza tanto una clave maestra como claves locales asignadas a cada par de dispositivos. Cuando existe una clave definida entre dos nodos, las tramas se cifran automáticamente, mientras que la comunicación sin clave permanece sin protección. Otra característica importante es la posibilidad de registrar múltiples dispositivos como pares aceptados, permitiendo que un nodo mantenga comunicación directa con varios receptores dentro del alcance. El protocolo es además muy eficiente en términos de consumo energético, debido a que reduce la cantidad de funciones involucradas en la transmisión y recepción, lo que lo convierte en una opción ideal para sistemas alimentados por baterías o para arquitecturas distribuidas donde cada nodo debe operar con una carga computacional mínima.[\[26\]](#)

5.4.3. UART

UART es un método tradicional de comunicación serial asíncrona que continúa siendo fundamental en sistemas embebidos debido a su simplicidad y confiabilidad. La documentación técnica de Espressif describe que los dispositivos ESP32 disponen de varios controladores UART independientes, cada uno configurable en aspectos como la velocidad de transmisión, el número de bits de datos, el uso de paridad y la cantidad de bits de parada. La comunicación no requiere una señal de reloj compartida, ya que cada extremo acuerda previamente la velocidad de transmisión. Esta característica facilita el uso de UART en sistemas donde solo se necesita un intercambio punto a punto, evitando la complejidad de buses más estructurados. El controlador UART del ESP32 permite manejar interrupciones asociadas a la recepción y transmisión de datos mediante colas de eventos en FreeRTOS, lo que reduce la carga del procesador y mejora la capacidad del sistema para reaccionar de manera oportuna. También incorpora soporte para control de flujo tanto por hardware como por software, lo que resulta útil cuando es necesario evitar desbordamientos del buffer en transmisiones de alta velocidad. El periférico ofrece funciones avanzadas como la detección de patrones específicos dentro del flujo de datos, lo que permite generar interrupciones cuando se reconocen secuencias particulares, y la operación en modos especiales como RS-485, que añade la capacidad de usar líneas diferenciales y trabajar en topologías half-duplex. Estas características amplían significativamente el rango de aplicaciones posibles, desde comunicaciones simples entre microcontroladores hasta sistemas industriales donde se requiere robustez y adaptación a diferentes entornos eléctricos.[\[27\]](#)

5.4.4. I²C

El bus I²C (Inter-Integrated Circuit) , especificado por NXP, constituye un método de comunicación serial síncrona ampliamente adoptado en sistemas embebidos para interconectar sensores, memorias y periféricos de baja y media velocidad. Su funcionamiento se basa en solo dos líneas compartidas: una para datos (SDA) y otra para la señal de reloj (SCL). Esta característica simplifica el diseño del hardware y permite conectar múltiples dispositivos en el mismo bus. Cada componente conectado a I²C posee una dirección única y puede actuar como transmisor o receptor según el contexto. La especificación oficial contempla la existencia de múltiples maestros, lo que implica que distintos dispositivos pueden iniciar una transmisión. Para resolver posibles conflictos, el bus incorpora un mecanismo de arbitraje que garantiza que solo un maestro controle la comunicación en cada momento sin generar colisiones destructivas. I²C dispone de diversos modos de operación que varían en velocidad, desde el modo estándar de 100 kbit/s hasta configuraciones de alta velocidad que alcanzan 3,4 Mbit/s. Esta flexibilidad permite emplearlo tanto en aplicaciones de bajo consumo como en sistemas que necesitan tasas de transferencia superiores. Además, están definidos con precisión los parámetros eléctricos, los tiempos de conmutación y las condiciones que deben respetarse para garantizar la integridad de la señal, lo que facilita el diseño de redes estables y confiables con múltiples dispositivos conectados simultáneamente.[\[28\]](#)

5.4.5. MQTT

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es un protocolo de mensajería ligero basado en el patrón publish/subscribe, diseñado para entornos con recursos limitados y redes que pueden tener baja velocidad, alta latencia o conexiones poco fiables. Este protocolo opera sobre TCP/IP, lo que le permite garantizar conexiones ordenadas y bidireccionales. El hecho de mantener la conexión abierta entre cliente y broker minimiza el sobrecoste de establecer nuevas conexiones, algo clave cuando se trabaja con dispositivos de bajo consumo. La arquitectura de MQTT se articula entre clientes (que pueden publicar mensajes o suscribirse a temas) y un broker, encargado de recibir, filtrar y reenviar los mensajes según los temas (“topics”) suscritos. Gracias a este modelo, los emisores y receptores quedan desacoplados, lo que permite escalabilidad eficiente y flexibilidad en la comunicación. MQTT define tres niveles de “Quality of Service” (QoS) para la entrega de mensajes:

1. QoS 0: entrega a lo sumo una vez (“fire-and-forget”).
2. QoS 1: entrega al menos una vez.

3. QoS 2: entrega exactamente una vez.

Además, el protocolo incluye mecanismos como el “Last Will and Testament” (LWT), que permite a un cliente informar a otros sobre su desconexión inesperada, y sesiones persistentes, que facilitan la reconexión después de una caída de red.[29][30]

5.5. Medición de Variables Fisicas

5.5.1. Conversor Análogo-Digital(ADC)

a

5.5.2. Sensor de Tensión ZMPT101B

a

5.5.3. Sensor de corriente ACS712

a

5.6. Contenerización Docker

5.6.1. Broker MQTT

a

5.6.2. Base de Datos

a

5.6.2.1. SQL

a

5.6.3. NGINX

a

CAPÍTULO 6

Arquitectura del sistema

El Sistema de Gestión Consumos (SGC) propuesto plantea un esquema distribuido para la gestión de las cargas en una la microrred, enfocado en equilibrar la demanda de consumo con la potencia disponible en tiempo real. El SGC pretende garantizar un uso eficiente de la energía, priorizando el abastecimiento de las cargas críticas de la microrred. La Figura 6.1 muestra los elementos que componen al SGC propuesto. El Agente de Carga (AC) es un dispositivo construido en base a un microcontrolador, que es responsable de establecer el vínculo entre los recursos energéticos de la microrred y los Nodos de Consumo (NC). El AC establece comunicación con los demás agentes de la microrred mediante un bus de comunicación CAN, a fin de obtener el valor de potencia disponible, cuyo valor depende directamente de las condiciones de generación y/o almacenamiento que posee la microrred. El AC también realiza medición del voltaje eficaz en la línea de corriente alterna proveniente de la microrred; con este dato de tensión y el valor de potencia disponible, calcula la corriente eficaz total que puede utilizar el conjunto de cargas e informa este valor periódicamente a los NC. Estos últimos, constituyen dispositivos de control (basados en microcontroladores) que están asociados a diferentes cargas eléctricas (por ej. electrobombas, electrodomésticos,

iluminación, entre otros). Cada NC dispone de una prioridad asignada, que es definida según la necesidad específica del usuario. La comunicación entre los nodos se realiza de manera multidireccional, permitiendo que cada uno, a partir de mensajes de todos los demás, evalúe su condición operativa en relación con el valor de la corriente total disponible en la microrred, su nivel de consumo y prioridad frente a otros nodos. Con esa información, cada nodo toma la decisión de conexión, desconexión o reconexión de la carga que tiene asociada.

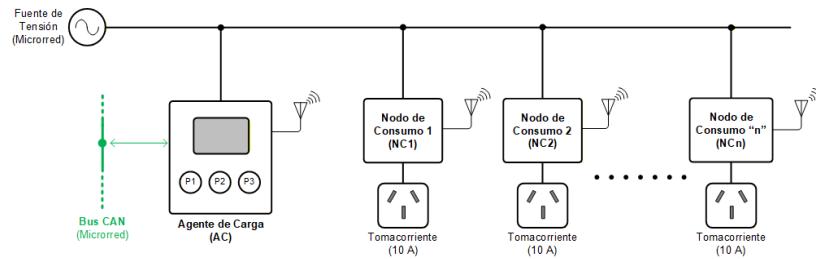


Imagen 6.1: Arquitectura para el sistema propuesto

6.1. Agente de Carga (AC)

El AC es el nexo entre la microrred y los NC, recibiendo la potencia disponible desde el sistema multiagente de supervisión de la microrred. A través de esta potencia y la medición local de la tensión eficaz de corriente alterna, el AC obtiene la corriente total disponible para el consumo en las cargas. Esta información de corriente disponible es reportada periódicamente a todos los NC quienes toman este valor como una restricción para su funcionamiento, de modo que éstos puedan ejecutar la lógica distribuida de conexión y desconexión de cargas, según las prioridades establecidas para cada una de ellas. Para cumplir con esto, el AC realiza las siguientes tareas esenciales:

- Comunicación vía bus CAN con el sistema de supervisión de la microrred para obtener la potencia disponible y reportar el consumo.
- Medición de la tensión eficaz de la línea para el cálculo de la corriente disponible.
- Envío de datos de la microrred (potencia, tensión, corriente) y de cada NC mediante UART para su posterior almacenamiento y visualización en una interfaz web.

Esta estrategia facilita el balanceo de la demanda frente a la oferta y prioriza el abastecimiento de las cargas críticas cuando la energía es limitada. En la Figura 6.2 se presenta el diagrama esquemático del AC diseñado para este sistema, donde se observan los bloques funcionales que permiten cumplir con las tareas mencionadas.

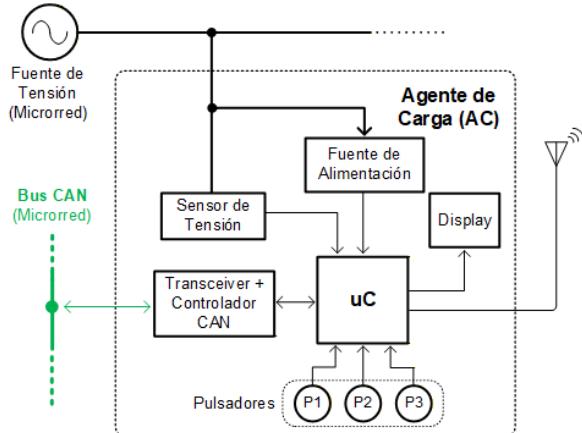


Imagen 6.2: Diagrama esquemático del Agente de Carga (AC)

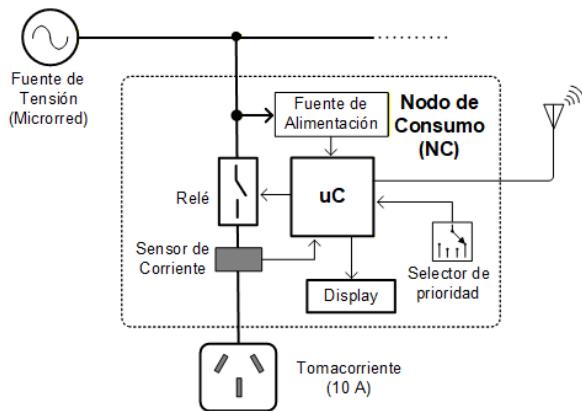


Imagen 6.3: Diagrama esquemático del Nodo de Consumo (NC)

6.2. Nodo de Consumo (NC)

Los Nodos de Consumo son las unidades responsables de decidir, de manera autónoma, si una carga eléctrica debe permanecer conectada o desconectada. Para ello, cada NC participa en un esquema de control distribuido donde intercambia información con los demás nodos y con el Agente de Carga (AC). Esta comunicación le permite conocer dos valores esenciales: la disponibilidad total de corriente para la microrred, que es informada periódicamente por el AC, y el consumo agregado de las cargas, estimado mediante el intercambio de mensajes entre los propios nodos. A partir de estos datos, cada NC evalúa su situación considerando la prioridad que tiene asignada. Las cargas críticas se mantienen siempre conectadas, mientras que las cargas no críticas pueden ser desconectadas si la demanda total supera la disponibilidad. Esta decisión no depende de un controlador central, sino que surge del propio nodo aplicando un algoritmo de consenso y priorización que asegura que la demanda global se mantenga por debajo del límite informado por el AC. Cada NC cuenta con una estructura, mostrada en la Figura 6.3, para llevar a cabo la logica de control distribuido y realizar la actuación sobre la carga asociada.

6.2.1. Lógica del Algoritmo de priorización de las Cargas

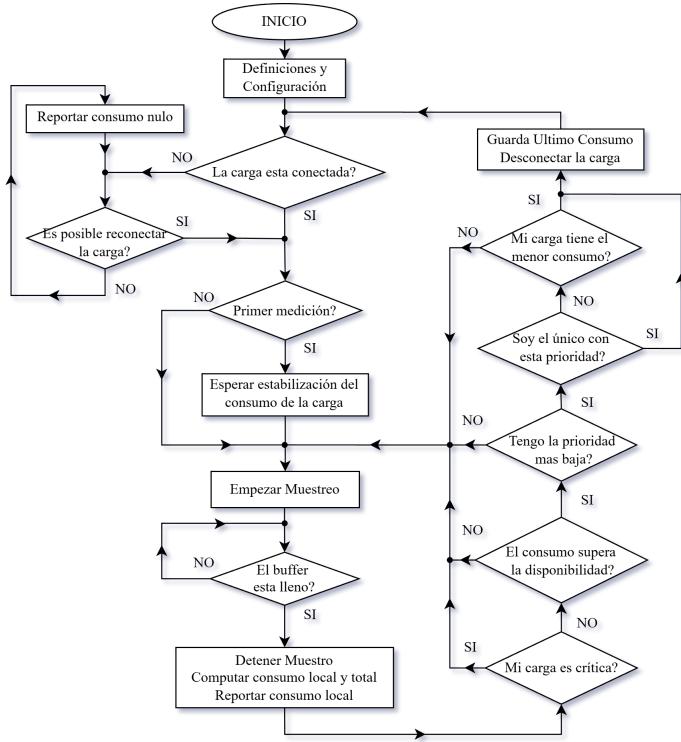


Imagen 6.4: Diagrama de Flujo del algoritmo de priorización de las cargas en el NC

6.3. Visualización de datos de manera remota

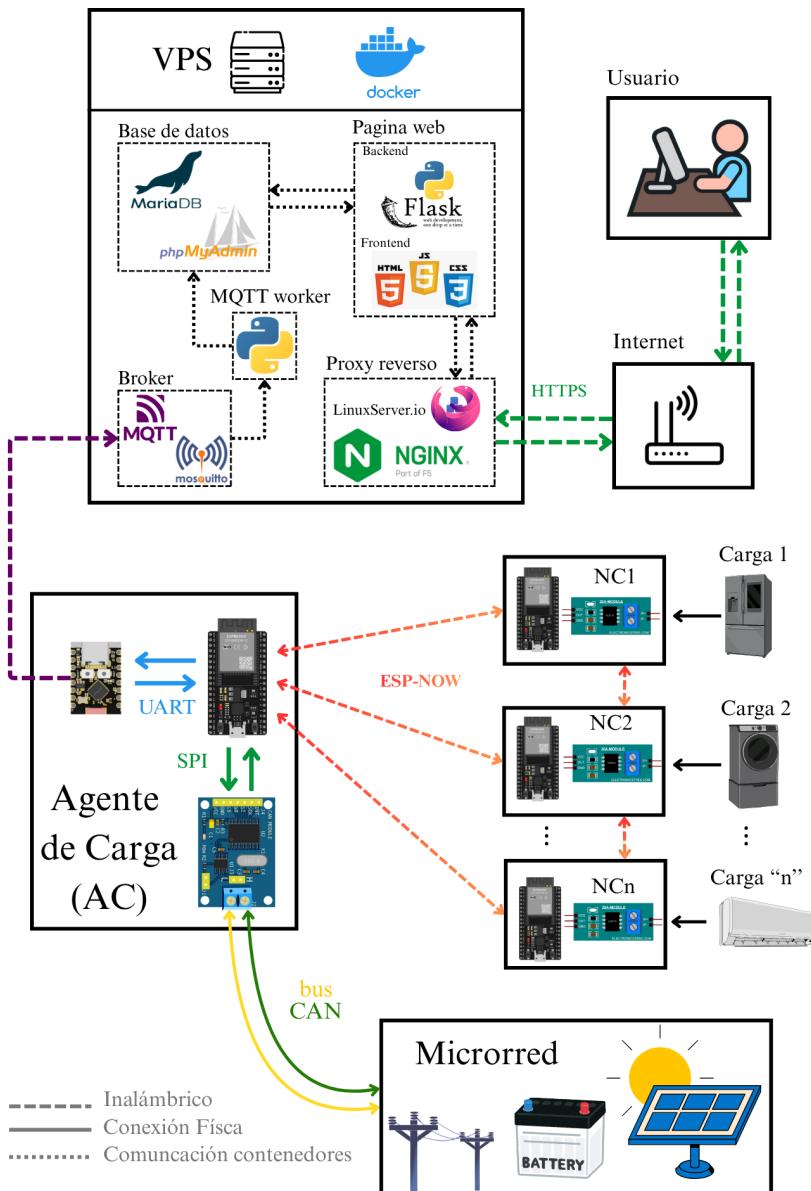


Imagen 6.5: Plataforma-IoT Propuesta

CAPÍTULO 7

Análisis de Mercado

El mercado global de energías renovables atraviesa un fuerte auge, impulsado por políticas de descarbonización, costos tecnológicamente cada vez más bajos y un compromiso creciente por parte de gobiernos y empresas con la sostenibilidad. El mercado de energía renovable sigue creciendo, y la energía solar representa una parte significativa del total, con gran expansión prevista hasta 2030 [31]. Además, la demanda por sistemas fotovoltaicos sigue en aumento, donde proyectan que la energía solar generará aproximadamente 1,39 billones de kWh para 2025 a nivel mundial, con una tasa de crecimiento anual estimada del 7,4 % entre 2025 y 2029 [32]. En paralelo, la necesidad de monitorización inteligente también está creciendo. El mercado de sistemas de monitoreo para plantas solares (PV Monitoring Systems) alcanzó valoraciones significativas y se espera que crezca entre 2025 y 2030, impulsado por la expansión de la capacidad solar, políticas favorables y el auge del IoT aplicado a energías renovables [33]. Del lado de los medidores y monitores específicos, el mercado de “power meters” solares (medidores para instalaciones fotovoltaicas) también está proyectado a crecer. Se estima que este mercado alcanzará US\$ 6,46 mil millones para 2030, con un crecimiento anual de alrededor de 10,7 %. [34]

En cuanto a Argentina, el sector de energías renovables ha mostrado un crecimiento sostenido en los últimos años, con una capacidad instalada que ha aumentado significativamente gracias a políticas de fomento como la ley nacional de Generación Distribuida 24.424. La energía solar fotovoltaica ha sido una de las tecnologías más destacadas, con numerosos proyectos tanto a nivel residencial como comercial e industrial. La Secretaría de Energía argentina ha dado a conocer que la capacidad instalada en el sector pasó de 30,689 MW en 2023 a 58,996 MW en 2024.[\[35\]](#)

7.1. Seccionamiento del Mercado

El sistema propuesto se orienta a un segmento de mercado conformado por empresas dedicadas a la instalación de sistemas de generación de energías renovables, especialmente sistemas de paneles solares. Estas empresas suelen ofrecer a sus clientes paquetes integrales que combinan equipamiento fotovoltaico, almacenamiento, inversores y servicios de monitoreo, por lo que representan un canal estratégico para la incorporación de tecnologías complementarias que mejoren el desempeño y la confiabilidad de las instalaciones. La inclusión de un sistema de gestión inteligente del consumo resulta especialmente relevante para este sector, ya que permite agregar valor en términos de eficiencia energética, continuidad del servicio y optimización del uso de los recursos disponibles en microrredes residenciales, rurales o industriales.

Dentro de este mercado pueden distinguirse empresas que trabajan con instalaciones residenciales, rurales y agroindustriales, como también en el sector industrial y comercial. En este sentido, el sistema se puede adaptar a estos escenarios donde los usuarios buscan reducir su dependencia de la red eléctrica y mitigar los efectos de los cortes de suministro eléctrico brindando una experiencia más estable. Además, suelen existir cargas críticas como bombas de agua, equipamiento de refrigeración o iluminación esencial. En estos entornos, la necesidad de priorizar consumos y mantener la operación ante variaciones en la disponibilidad energética vuelve especialmente valiosa una solución distribuida capaz de adaptarse en tiempo real a las condiciones de generación y almacenamiento.

El mercado objetivo comprende empresas que buscan diferenciar sus servicios mediante tecnologías que ofrezcan mayor estabilidad, eficiencia y resiliencia a las instalaciones energéticas. El sistema de gestión de consumo propuesto se posiciona como un complemento competitivo para sus paquetes comerciales, capaz de mejorar la calidad del servicio y ampliar las prestaciones de los sistemas fotovoltaicos ofrecidos a sus clientes.

7.1.1. Análisis de demanda

7.1.2. Análisis de oferta

7.1.3. Análisis de precios

Parte III

Desarrollo y Resultados

CAPÍTULO 8

Control prioritario de la demanda de energía de las cargas

Tabla 8.1: Niveles de prioridad de carga

Valor	Prioridad	Descripción
0	Carga Crítica	Permanece siempre conectada; solo se desconecta ante una pérdida total de potencia disponible.
1	Carga No crítica (Prioridad Alta)	Se desconecta únicamente cuando la disponibilidad de energía es muy baja.
2	Carga No crítica (Prioridad Media)	Se desconecta cuando se produce una reducción moderada de la potencia disponible.
3	Carga No crítica (Prioridad Baja)	Es la primera en desconectarse cuando aparece un déficit de potencia.

CAPÍTULO 9

Agente de Carga (AC)

9.1. Hardware



Imagen 9.1: Hardware desarrollado para el Agente de Carga(AC)

9.2. Firmware

CAPÍTULO 10

Nodo de Consumo (NC)

10.1. Hardware

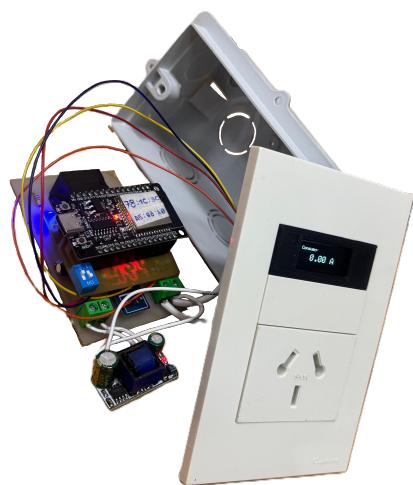


Imagen 10.1: Hardware desarrollado para el Nodo de Consumo(NC)

10.2. Firmware

CAPÍTULO 11

Plataforma IoT

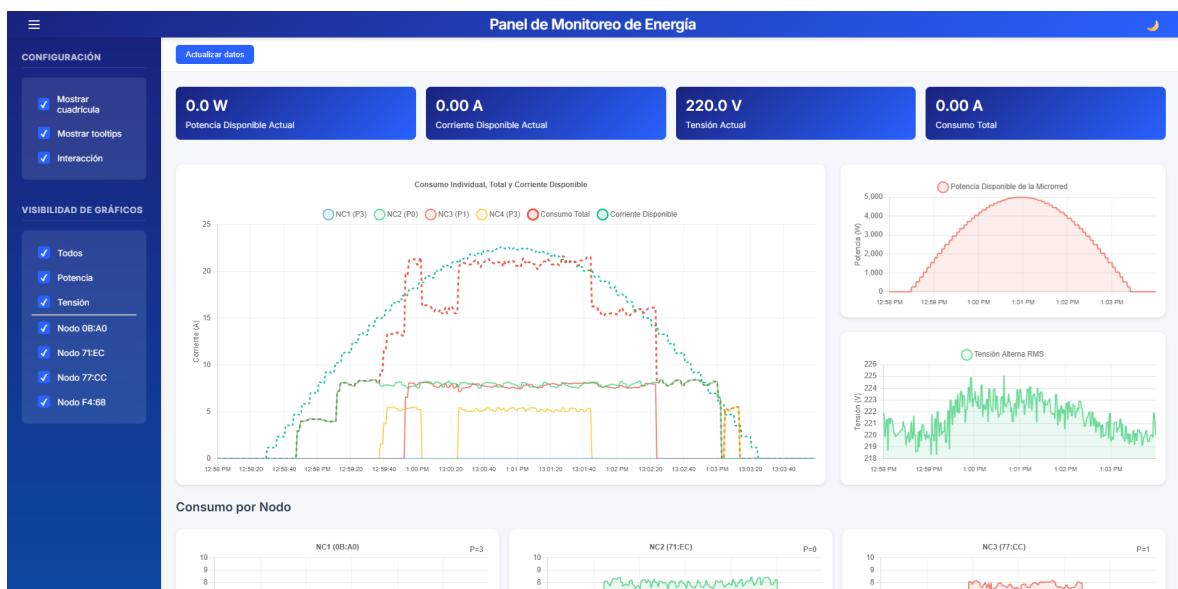


Imagen 11.1: Plataforma-IoT realizada

CAPÍTULO **12**

**Integración del Sistema de Gestión de
Consumos**

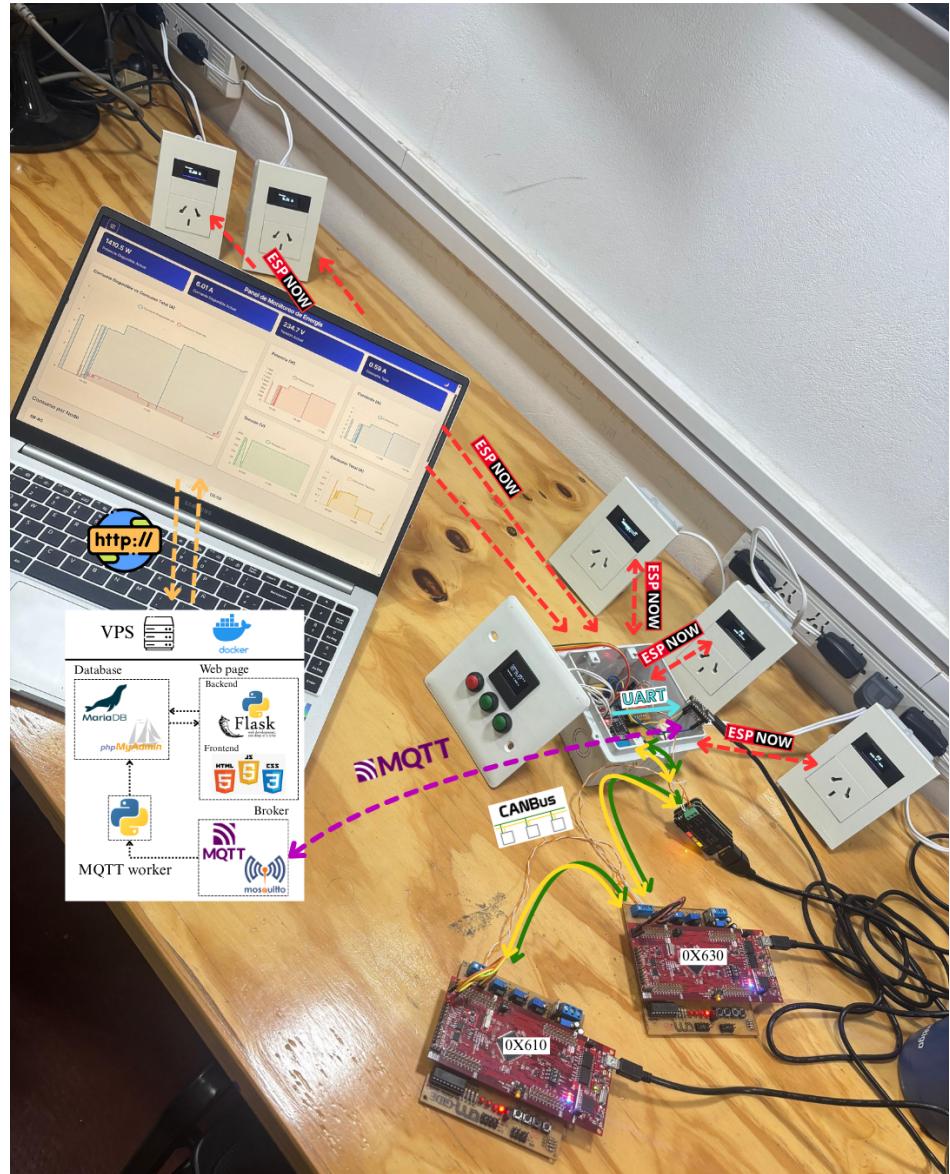


Imagen 12.1: Integración completa del Sistema de Gestión de Consumos

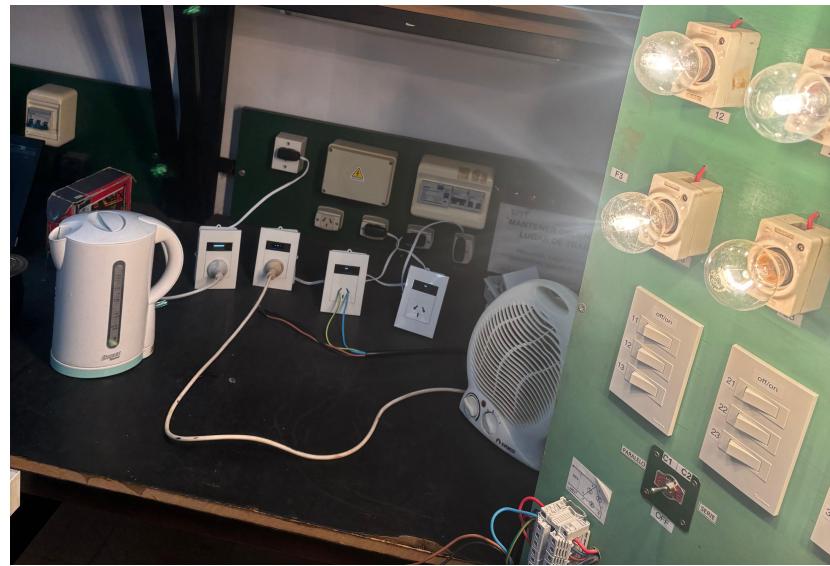


Imagen 12.2: Conexión de cargas para ensayo de la gestión del consumo

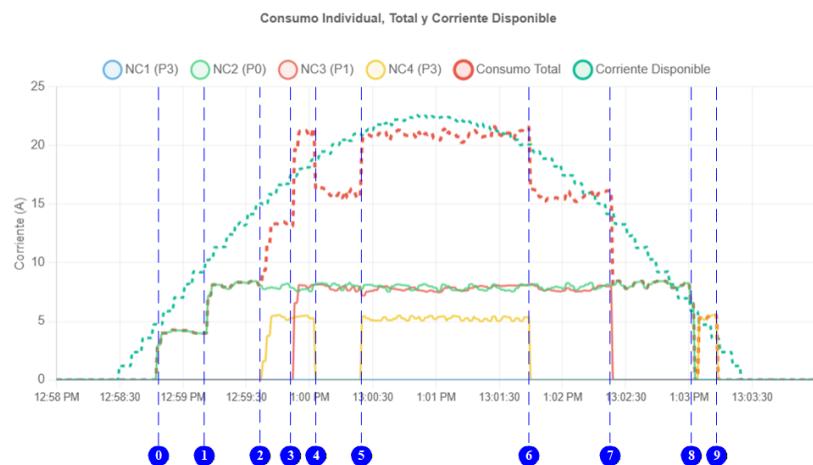


Imagen 12.3: Resultados del ensayo de la gestión de consumos

Parte IV

Discusión y Conclusiones

CAPÍTULO **13**

Discussion

CAPÍTULO **14**

Conclusiones

CAPÍTULO **15**

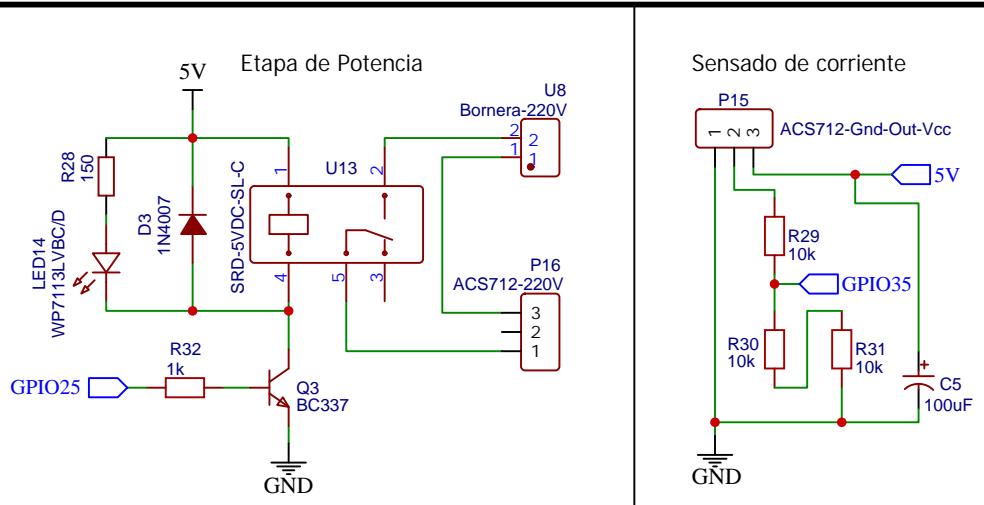
Trabajo a Futuro

Parte V

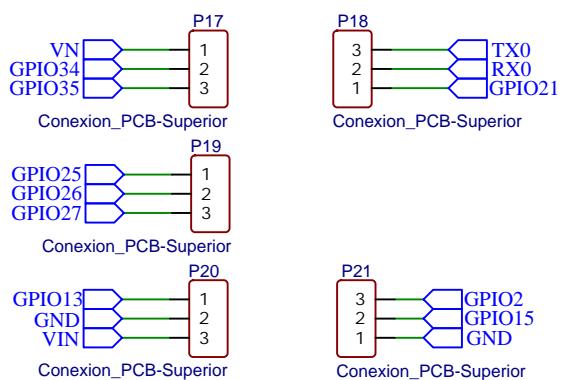
Anexos

Círculo Esquemático del Nodo de Consumo (NC)

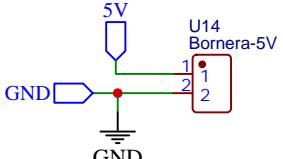
PLACA INFERIOR



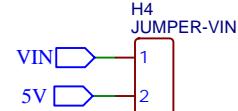
Pines que interconectan las placas



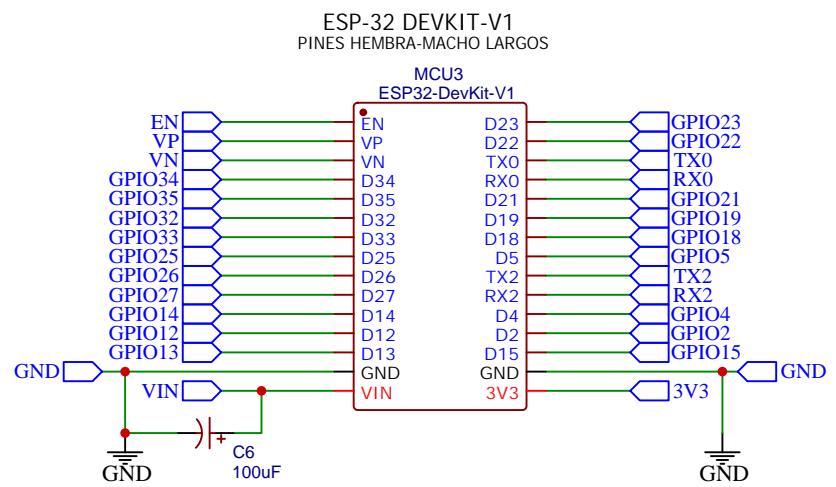
Alimentaci ó n 5V



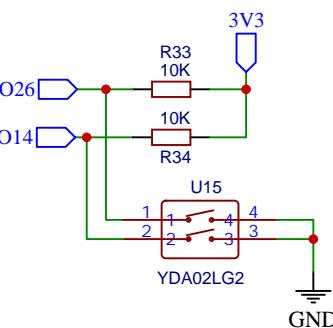
Jumper VIN/USB



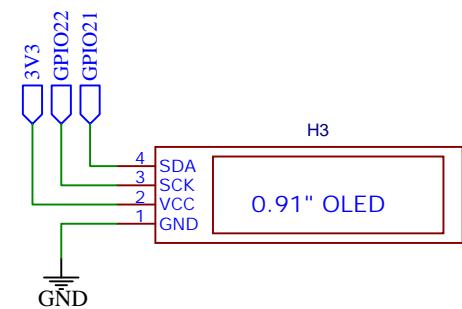
PLACA SUPERIOR



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 [46](#)
- P2P** Red “peer-to-peer” (par a par), un modelo de intercambio directo de recursos entre usuarios sin necesidad de un servidor central [46](#)
- 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 [46](#)
- WWW** World Wide Web, sistema global de información basado en hipertexto que permite acceder y navegar por múltiples recursos en Internet [46](#)

Glosario de Términos

- compilador** Programa que transforma código fuente escrito por un programador en instrucciones ejecutables por una computadora [46](#)
- LaTeX** Sistema de preparación de documentos basado en TeX, desarrollado por Leslie Lamport, ampliamente utilizado en el ámbito académico y científico [46](#)
- metadatos** Datos estructurados que describen, explican y permiten localizar o gestionar recursos de información [46](#)
- multiplataforma** Software o tecnología capaz de ejecutarse e interoperar en múltiples sistemas operativos o entornos digitales [46](#)
- online** Estado de conexión a una red digital, generalmente Internet, o actividad realizada a través de ella [46](#)
- plataforma** Infraestructura tecnológica y sociocultural que integra hardware, software, algoritmos y políticas, mediando prácticas sociales y producciones de contenido [46](#)
- Twitter** Servicio de microblogging para la publicación breve y dinámica de mensajes [46](#)

Parte VI

Referencias

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.
- [24] Y. Rajbhandari, «Enhanced demand-side management for solar-based isolated microgrid,» *IET Smart Grid and Sustainable Energy*, 2024. doi: [10.1049/stg2.12151](https://doi.org/10.1049/stg2.12151) dirección: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/stg2.12151>
- [25] National Instruments. «Controller Area Network (CAN) Overview.» Accedido: 2025-11-15. dirección: <https://www.ni.com/en/shop/seamlessly-connect-to-third-party-devices-and-supervisory-system/controller-area-network--can--overview.html>
- [26] Espressif Systems. «ESP-NOW User Guide.» Accedido: 2025-11-15. dirección: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/network/esp_now.html
- [27] Espressif Systems. «UART Peripheral — ESP32 Technical Reference.» Accedido: 2025-11-15. dirección: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/uart.html>
- [28] NXP Semiconductors, *I2C-bus Specification and User Manual*, Accedido: 2025-11-15, 2014. dirección: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- [29] OASIS Standard, «MQTT Version 3.1.1,» OASIS, inf. téc., 2014, Accedido: 2025-11-15. dirección: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html>
- [30] OASIS Standard, «MQTT Version 5.0,» OASIS, inf. téc., 2019, Accedido: 2025-11-15. dirección: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/os/mqtt-v5.0-os.html>
- [31] M. Intelligence. «Renewable Energy Market – Industry Report.» Accedido: 2025-11-15. dirección: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-renewable-energy-market-industry>

- [32] Statista. «Solar Energy Worldwide – Market Outlook.» Accedido: 2025-11-15. dirección: <https://www.statista.com/outlook/io/energy/renewable-energy/solar-energy/worldwide>
- [33] GlobeNewswire. «PV Monitoring Systems Market Outlook Report 2025–2030.» Accedido: 2025-11-15. dirección: <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/06/13/3099137/0/en/PV-Monitoring-Systems-Market-Outlook-Report-2025-2030-Rapid-Global-Expansion-of-Solar-Energy-Capacity-and-Supportive-Government-Policies-Driving-CAGR-at-11-9.html>
- [34] G. V. Research. «Solar Power Meter Market Report.» Accedido: 2025-11-15. dirección: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/solar-power-meter-market-report>
- [35] Secretaría de Energía de la Nación. «Reporte Anual 2024.» Accedido: 2025-11-15. dirección: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/reportes_anuales_2024.pdf