



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<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, un sistema de preparación de documentos libre.



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE MISIONES



FACULTAD  
DE INGENIERÍA  
UNaM

Copyright © 2025 Krzyzanowski Lucas y Silva Pablo



---

# Prólogo

---

La transición hacia un modelo energético más sostenible y descentralizado ha dejado de ser una proyección futura para convertirse en una necesidad presente. En este contexto, las microrredes eléctricas emergen como la solución tecnológica por excelencia para dotar de autonomía y resiliencia a comunidades donde el tendido eléctrico convencional es deficiente o inexistente. Sin embargo, la implementación exitosa de estas redes no depende únicamente de la capacidad de generación, sino de la inteligencia con la que se administra el recurso finito de la energía.

El presente trabajo de tesis aborda, desde una perspectiva de ingeniería aplicada, el desafío crítico de equilibrar la oferta y la demanda en sistemas aislados de pequeña escala. A diferencia de los enfoques tradicionales centralizados, aquí se explora un paradigma distribuido, donde la toma de decisiones recae en dispositivos inteligentes dispersos en la red, capaces de cooperar para garantizar la continuidad del servicio.

A lo largo de estas páginas, el lector encontrará una propuesta integral que abarca desde el diseño del hardware electrónico y la programación de firmware de tiempo real, hasta la implementación de protocolos de comunicación robustos y plataformas de supervisión IoT. Este documento ha sido estructurado para guiar al lector desde los fundamentos teóricos del control jerárquico hasta la validación experimental de un prototipo funcional, ofreciendo una visión técnica detallada de cómo la electrónica moderna puede mejorar la calidad de vida en entornos rurales.

---

## Prefacio

---

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

*Albert Einstein*

Esta tesis nace en el seno del Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica (GIDE) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones, como respuesta a una problemática real y tangible que afecta a nuestra región. El trabajo se enmarca dentro del proyecto de investigación Código 16/11083-PDTS: “Bombeo de agua con energías renovables, almacenamiento de energía y conexión a la red para pequeñas huertas rurales comunitarias”.

Nuestra motivación principal surge de observar las dificultades que enfrentan las Escuelas de la Familia Agrícola (EFA) y los pequeños productores en zonas rurales, donde la inestabilidad del suministro eléctrico compromete servicios básicos como

el bombeo de agua. Comprendimos que no bastaba con instalar paneles solares; era necesario dotar a la instalación de un cerebro capaz de gestionar la energía de forma eficiente y automática.

Así surge el Sistema de Gestión de Consumos (SGC) presentado en este documento. Nuestro objetivo fue desarrollar una solución tecnológica que no solo fuera funcional, sino también modular, económica y replicable. Durante el desarrollo, nos enfrentamos al desafío de integrar múltiples disciplinas: electrónica de potencia, sistemas embebidos y desarrollo de software.

---

# **Agradecimientos**

---

La realización de esta tesis fue posible gracias al acompañamiento y la orientación de quienes brindaron su tiempo, sus conocimientos y los recursos necesarios para llevar adelante este trabajo.

Se agradece especialmente a los directores Mgter. Ing. Guillermo A. Fernández y Dr. Ing. Fernando Botterón, por su guía académica y técnica, por las discusiones que enriquecieron el desarrollo del proyecto y por su constante disposición para resolver dudas y revisar los avances realizados.

Asimismo, se expresa reconocimiento al Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica (GIDE) y al Departamento de Electrónica de la Facultad de Ingeniería, por proporcionar el espacio de trabajo, el equipamiento de laboratorio y el soporte técnico indispensables para la implementación y validación experimental del sistema.

Finalmente, se agradece a todos los docentes, compañeros y colaboradores que, de diversas formas, contribuyeron al proceso formativo y al entorno de trabajo en el que esta tesis pudo concretarse.

# Índice General

<b>Prólogo</b>	I
<b>Prefacio</b>	II
<b>Agradecimientos</b>	IV
<b>I Contextualización</b>	2
<b>1 Palabras Clave</b>	3
<b>2 Introducción</b>	4
<b>3 Antecedentes Y Estado del Arte</b>	10
<b>4 Problemática</b>	11
4.1 Justificación	11
4.2 Objetivos	13
4.2.1 Objetivo General	13
4.2.2 Objetivos Específicos	13
<b>II Investigación</b>	14
<b>5 Marco Teórico</b>	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 <sup>2</sup> 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
<b>6</b>	<b>Arquitectura del sistema . . . . .</b>	<b>21</b>
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 . . . . .	25
6.3.1	Infraestructura de Hardware . . . . .	26
6.3.2	Arquitectura de Software y Flujo de Datos . . . . .	27
<b>7</b>	<b>Análisis de Mercado . . . . .</b>	<b>29</b>
7.1	Seccionamiento del Mercado . . . . .	30
7.1.1	Análisis de demanda . . . . .	31
7.1.2	Análisis de oferta . . . . .	31
7.1.3	Análisis de precios . . . . .	31
<b>III</b>	<b>Desarrollo y Resultados . . . . .</b>	<b>32</b>
<b>8</b>	<b>Control prioritario de la demanda de energía de las cargas . . . . .</b>	<b>33</b>
8.1	Lógica de Desconexión y Reconexión . . . . .	34
8.1.1	Criterio de Desconexión . . . . .	34
8.1.2	Criterio de Reconexión . . . . .	35
<b>9</b>	<b>Agente de Carga (AC) . . . . .</b>	<b>36</b>
9.1	Hardware . . . . .	36
9.2	Firmware . . . . .	39
9.2.1	Adquisición y Procesamiento de Señales . . . . .	40
9.2.2	Gestión de Comunicaciones . . . . .	40
9.2.2.1	Bus CAN (Integración con la Microrred) . . . . .	41
9.2.2.2	Red ESP-NOW (Gestión de Cargas) . . . . .	41
9.2.2.3	UART (Gateway) . . . . .	42
9.2.3	Interfaz de Usuario . . . . .	42

<b>10</b>	<b>Nodo de Consumo (NC)</b>	<b>43</b>
10.1	Hardware . . . . .	43
10.2	Firmware . . . . .	45
10.2.1	Medición de Corriente . . . . .	46
10.2.2	Lógica de Control y Actuación . . . . .	46
10.2.3	Interfaz de Usuario . . . . .	47
<b>11</b>	<b>Plataforma IoT</b> . . . . .	<b>48</b>
11.1	Desarrollo del Backend y Procesamiento . . . . .	48
11.2	Diseño de Interfaz y Experiencia de Usuario . . . . .	49
<b>12</b>	<b>Integración del Sistema de Gestión de Consumos</b> . . . . .	<b>51</b>
12.1	Interconexión con Agentes de la Microrred . . . . .	51
12.2	Estructuras de Comunicación . . . . .	53
12.2.1	Bus CAN . . . . .	53
12.2.2	ESP-NOW . . . . .	54
12.2.3	MQTT . . . . .	54
12.3	Validación Experimental . . . . .	55
12.3.1	Análisis de Resultados . . . . .	56
<b>IV</b>	<b>Discusión y Conclusiones</b> . . . . .	<b>58</b>
<b>13</b>	<b>Discusion</b> . . . . .	<b>59</b>
<b>14</b>	<b>Conclusiones</b> . . . . .	<b>60</b>
<b>15</b>	<b>Trabajo a Futuro</b> . . . . .	<b>61</b>
<b>V</b>	<b>Anexos</b> . . . . .	<b>62</b>
	<b>Prototipado del Nodo de Consumo (NC)</b> . . . . .	<b>63</b>
	<b>Circuito Esquemático y Diseño de PCB del Nodo de Consumo (NC)</b> . . . . .	<b>65</b>
	<b>Circuito Esquemático y Diseño de PCB del Agente de Carga (AC)</b> . . . . .	<b>68</b>
	<b>Desarrollo de Hardware</b> . . . . .	<b>71</b>
	<b>Acrónimos</b> . . . . .	<b>75</b>
	<b>Glosario de Términos</b> . . . . .	<b>76</b>
<b>VI</b>	<b>Referencias</b> . . . . .	<b>78</b>

# 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) . . . . .	24
6.4	Diagrama de Flujo del algoritmo de priorización de las cargas en el NC	25
6.5	Plataforma-IoT Propuesta . . . . .	26
9.1	Hardware desarrollado para el Agente de Carga(AC) . . . . .	39
9.2	Prueba de comunicación vía bus CAN entre el AC y el sistema de supervisión de la microrred . . . . .	41
9.3	Pantalla implementada para el AC. Muestra los valores de tensión, potencia y corriente disponibles en la microrred. . . . .	42
10.1	Hardware desarrollado para el Nodo de Consumo (NC) . . . . .	45
10.2	Prueba de medición de corriente en el NC contra punta de corriente . .	46
10.3	Pantallas implementadas para el NC. (a) Consumo. (b) Disponibilidad. (c) Prioridades. . . . .	47
11.1	Vista Principal de la Plataforma-IoT implementada. (a) Tema Claro. (b) Tema Oscuro. . . . .	49
11.2	Vista de consumos en detalle. (a) Tema Claro. (b) Tema Oscuro. . . . .	50
12.1	Integración completa del Sistema de Gestión de Consumos . . . . .	52
12.2	Placa Texas Instruments utilizada para emular pruebas de comunicación CAN . . . . .	53
12.3	Conexión de cargas para ensayo de la gestión del consumo . . . . .	55
12.4	Resultados del ensayo de la gestión de consumos bajo perfil de irradiancia simulado . . . . .	56
1	Primera version del NC ensablada en placa perforada. (a) Vista de componentes. (b) Conexiones. . . . .	64
2	Desarrollo de las PCB de los NC en su versión anterior y AC . . . . .	72
3	Primera versión de los NC y AC ensamblados . . . . .	73
4	Version Final anterior . . . . .	74

# Índice de Tablas

8.1 Niveles de prioridad de carga . . . . .	34
12.1 Estructura de paquetes CAN para la integración con placas TI . . . . .	53
12.2 Estructura de mensajes ESP-NOW de control . . . . .	54
12.3 Organización de Tópicos MQTT y frecuencia de publicación . . . . .	54
12.4 Payload JSON: Datos por Nodo . . . . .	54
12.5 Payload JSON: Datos Totales del Sistema . . . . .	55

---

# **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 de gestión local del consumo. Aportando 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. I<sup>2</sup>C

El bus I<sup>2</sup>C (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 I<sup>2</sup>C 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. I<sup>2</sup>C 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.

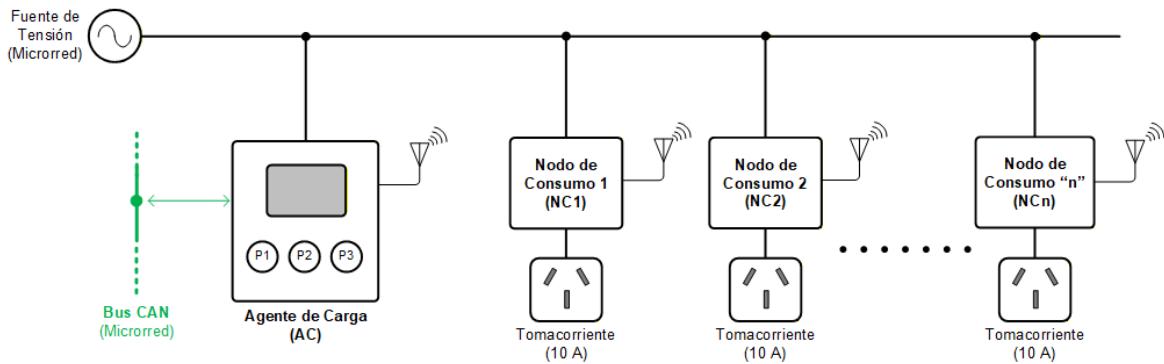


Figura 6.1: Arquitectura para el sistema propuesto

## 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.

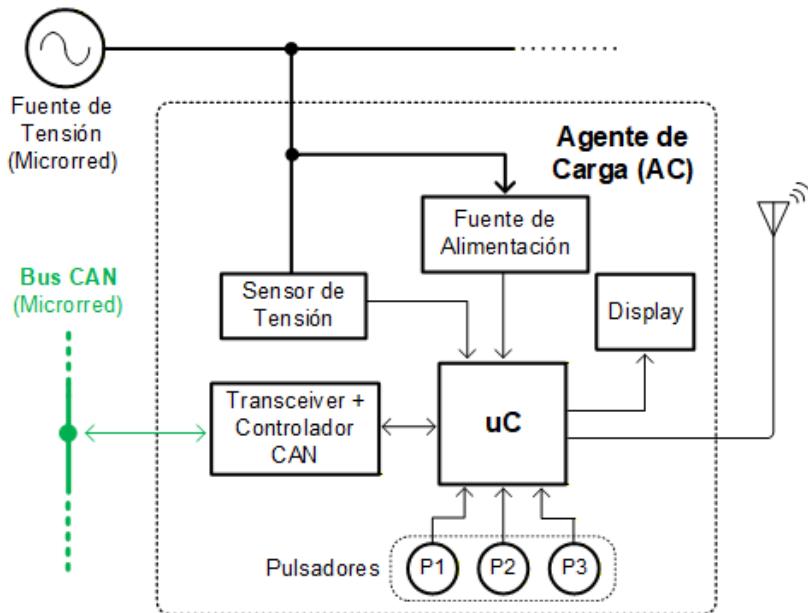


Figura 6.2: Diagrama esquemático del Agente de Carga (AC)

## 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.

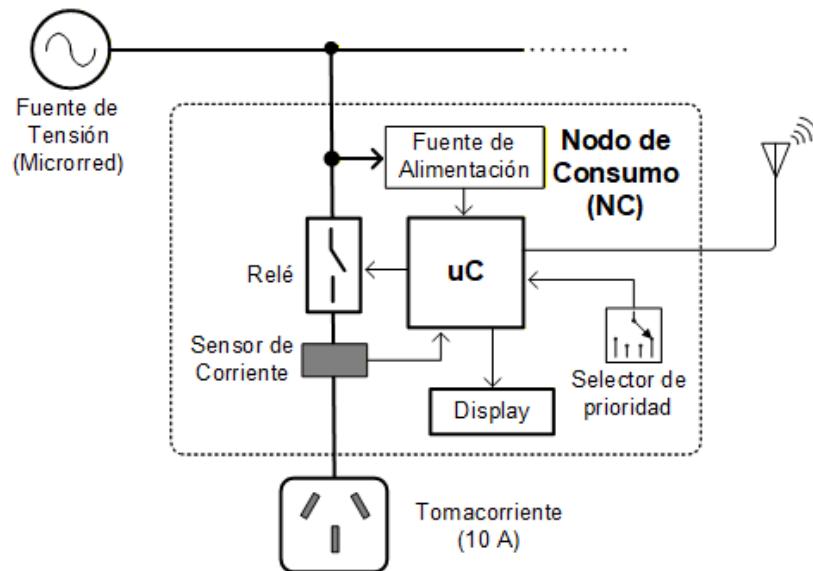


Figura 6.3: Diagrama esquemático del Nodo de Consumo (NC)

### 6.2.1. Lógica del Algoritmo de priorización de las Cargas

La autonomía del Nodo de Consumo se sustenta en una rutina de control cíclica que se ejecuta localmente en el microcontrolador. La Figura 6.4 esquematiza el flujo de operaciones que realiza el firmware para gestionar el estado de la carga.

A nivel arquitectónico, este diagrama representa un bucle de control cerrado que integra tres procesos fundamentales:

1. **Adquisición de Estado:** El nodo determina si la carga está físicamente conectada o desconectada y verifica la validez de los datos de corriente medidos.
2. **Sincronización de Información:** Antes de tomar cualquier decisión, el sistema asegura la recepción de los parámetros globales (disponibilidad) y la difusión de sus propios datos (consumo y prioridad) al resto de la red.
3. **Evaluación y Actuación:** Basándose en la comparación entre la oferta energética y la demanda agregada, el algoritmo resuelve el estado final del relé, priorizando la estabilidad del sistema sobre la continuidad de suministro de las cargas no críticas.

Este ciclo de ejecución continuo permite que el nodo adapte su comportamiento en tiempo real ante las perturbaciones de la microrred, operando como una entidad independiente pero coordinada dentro del esquema distribuido.

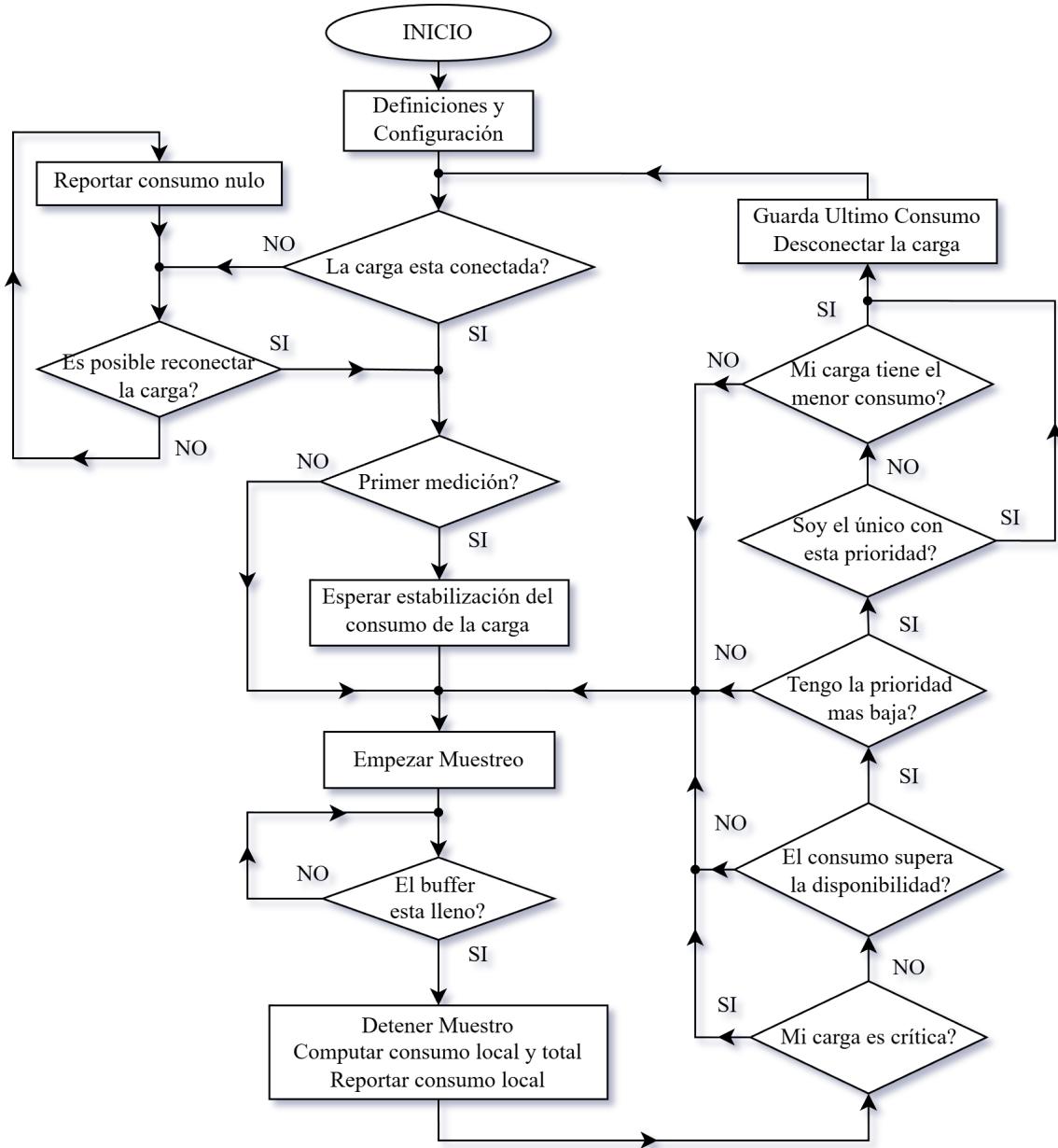


Figura 6.4: Diagrama de Flujo del algoritmo de priorización de las cargas en el NC

### 6.3. Visualización de datos de manera remota

Para complementar la gestión local realizada por el Agente de Carga y los Nodos de Consumo, se diseñó una arquitectura de supervisión remota basada en el paradigma de Internet de las Cosas (IoT). Esta capa superior del sistema tiene como objetivo desacoplar la adquisición de datos de su visualización, permitiendo el monitoreo histórico y en tiempo real desde cualquier ubicación con acceso a internet.

La arquitectura propuesta, ilustrada en la Figura 6.5, se fundamenta en un esquema de microservicios contenerizados. A diferencia de las aplicaciones monolíticas tradicionales, este enfoque divide las funcionalidades del servidor (recepción de datos,

almacenamiento, procesamiento e interfaz) en unidades independientes o contenedores” que se comunican entre sí a través de una red virtual interna.

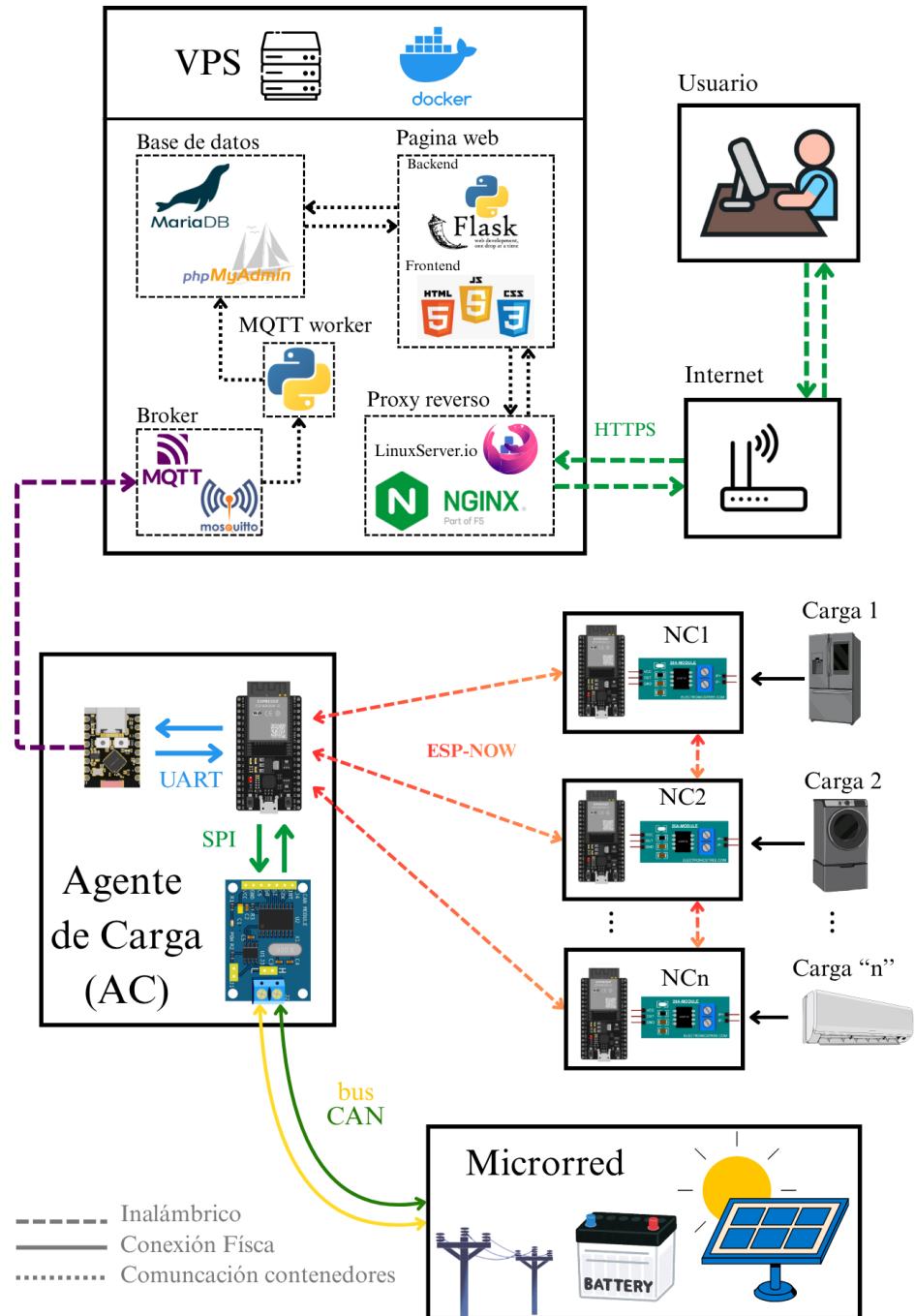


Figura 6.5: Plataforma-IoT Propuesta

### 6.3.1. Infraestructura de Hardware

El diseño del sistema es agnóstico al hardware, lo que significa que puede desplegarse tanto en servidores en la nube (VPS) como en computadoras de placa reducida (SBC) ubicadas en el mismo sitio de la microrred.

Para garantizar el funcionamiento fluido de todos los servicios simultáneos descritos a continuación, se establecen los siguientes requisitos de hardware mínimos para el servidor host:

- **Procesador:** Arquitectura compatible con contenedores (x86-64 o ARM64), con al menos 2 núcleos para manejar la concurrencia de peticiones web y el procesamiento de mensajes MQTT.
- **Memoria RAM:** Mínimo 1 GB (recomendado 2 GB) para soportar la ejecución simultánea del motor de base de datos, el servidor web y el broker de mensajería sin recurrir excesivamente a la memoria de intercambio (swap).
- **Almacenamiento:** Espacio suficiente para el sistema operativo anfitrión y la persistencia de la base de datos histórica.
- **Conectividad:** Interfaz de red permanente con acceso a internet y capacidad para gestionar puertos de entrada (HTTP/HTTPS y MQTT).

En la implementación de referencia para este trabajo, se optó por un Servidor Privado Virtual (VPS), lo que garantiza alta disponibilidad y una IP pública estática para el acceso remoto.

### 6.3.2. Arquitectura de Software y Flujo de Datos

La lógica de interconexión se basa en el flujo de datos ascendente desde el hardware de campo hacia la interfaz de usuario. Cada contenedor Docker desempeña un rol específico en esta cadena de procesamiento:

1. **Ingreso de Datos (Broker MQTT):** Es el punto de entrada de la información. Este contenedor actúa como un concentrador de mensajes que recibe las tramas de telemetría enviadas por el módulo de comunicación del Agente de Carga (ESP32-S3). Su función es puramente de transporte y enrutamiento; no procesa ni almacena los datos, simplemente los distribuye a los servicios que estén suscritos a los tópicos correspondientes (como consumo, tensión o disponibilidad).
2. **Procesamiento Lógico (Worker):** Este contenedor ejecuta un servicio en segundo plano (script Python) que actúa como el "pegamento" lógico del sistema. Se suscribe al Broker para interceptar todos los mensajes entrantes. Su responsabilidad es decodificar las cargas útiles (payloads) en formato JSON, validar que los datos se encuentren dentro de rangos coherentes y estructurarlos adecuadamente para su inserción en la base de datos.

3. **Almacenamiento Persistente (Base de Datos):** Recibe los datos ya procesados por el Worker y los organiza en tablas relacionales. Este contenedor es el único que mantiene estado persistente, almacenando el historial operativo de cada nodo y de la microrred en general para permitir la generación de gráficas de evolución temporal.
4. **Interfaz de Usuario (Servidor Web):** Contiene la lógica de la aplicación web (Backend y Frontend). Este servicio consulta la base de datos para recuperar el historial y se suscribe directamente al Broker (o utiliza una API interna) para reflejar los cambios en tiempo real en el navegador del usuario. Es el encargado de renderizar el panel de control (Dashboard).
5. **Seguridad y Acceso (Proxy Reverso):** Es la cara visible del servidor hacia internet. Este contenedor intercepta todas las peticiones externas (HTTP/HTTPS), gestiona los certificados de seguridad SSL para encriptar la conexión y enruta el tráfico hacia el contenedor del servidor web. Esto protege a la base de datos y a los servicios internos de una exposición directa a la red pública.

Esta arquitectura modular facilita la escalabilidad del sistema: si se requiere procesar más datos o añadir nuevas funcionalidades (como alertas por Telegram), basta con añadir un nuevo contenedor suscrito al Broker sin necesidad de detener o modificar los servicios que ya están en funcionamiento.

# 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

---

La estrategia de gestión de demanda implementada en el SGC se fundamenta en un esquema de priorización estática definido por el usuario. Este enfoque permite que el sistema tome decisiones autónomas de desconexión y reconexión de cargas sin depender de un controlador central que dicte las acciones individuales de cada nodo.

El objetivo principal del algoritmo es asegurar que la demanda total de corriente de la microrred ( $I_{total}$ ) se mantenga siempre por debajo de la corriente máxima disponible ( $I_{disponible}$ ) informada por el AC, garantizando en todo momento el suministro a los dispositivos esenciales.

Para lograr esto, a cada NC se le asigna un nivel de prioridad que determina su jerarquía en el orden de desconexión ante un déficit energético. La Tabla 8.1 detalla los cuatro niveles definidos para la operación del sistema.

Tabla 8.1: Niveles de prioridad de carga

Valor	Prioridad	Descripción
0	Carga Crítica	Permanece siempre conectada; el sistema la excluye de la lógica de desconexión automática, salvo ante un colapso total de la red.
1	Carga No crítica (Prioridad Alta)	Es la última categoría en ser desconectada. Se sacrifica únicamente cuando la disponibilidad de energía es crítica y ya se han desconectado las cargas de menor jerarquía.
2	Carga No crítica (Prioridad Media)	Se desconecta cuando se produce una reducción moderada de la potencia disponible, actuando como un amortiguador intermedio.
3	Carga No crítica (Prioridad Baja)	Es la primera en desconectarse ante cualquier déficit de potencia, permitiendo liberar recursos rápidamente para las cargas más importantes.

## 8.1. Lógica de Desconexión y Reconexión

El algoritmo de control se ejecuta localmente en cada NC y evalúa periódicamente el estado de la microrred. La toma de decisiones se basa en la comparación entre el consumo total agregado y la disponibilidad informada por el AC. A continuación se describe la lógica implementada para los dos estados posibles de la carga: conectada y desconectada.

### 8.1.1. Criterio de Desconexión

Cuando la carga se encuentra activa, el nodo monitorea si la corriente total consumida ( $I_{total}$ ) supera a la corriente disponible ( $I_{disponible}$ ). Si se detecta esta condición de sobrecarga ( $I_{total} > I_{disponible}$ ), se activa el procedimiento de desconexión selectiva, el cual sigue los siguientes pasos lógicos para determinar qué nodo debe actuar:

- Verificación de Criticidad:** Si el nodo tiene configurada una prioridad de nivel 0 (Crítica), ignora la condición de sobrecarga y mantiene el suministro, trasladando la responsabilidad de desconexión a los nodos no críticos.
- Evaluación de Prioridad Global:** El nodo verifica si posee la prioridad más baja (valor numérico más alto) entre todos los dispositivos que están actualmente

conectados a la red. Si existen nodos con una prioridad menor (ej. prioridad 3) y el nodo actual tiene prioridad alta (ej. 1), este último se mantiene conectado.

3. **Desempate por Consumo:** En el caso de que existan múltiples nodos compartiendo la misma prioridad más baja (por ejemplo, dos estufas con prioridad 3), el sistema debe decidir cuál de ellas desconectar para estabilizar la red con el menor impacto posible. Para ello, el algoritmo implementa una regla de desempate basada en el consumo: se desconecta aquel nodo que presente el menor consumo de corriente medido.

Esta lógica asegura que la reducción de carga sea gradual y justa, comenzando siempre por los dispositivos menos esenciales.

### 8.1.2. Criterio de Reconexión

Si la carga se encuentra desconectada debido a una acción previa de control, el nodo evalúa constantemente la posibilidad de reconexión. Para evitar oscilaciones en el sistema (efecto de encendido y apagado constante), se implementa un margen de seguridad o histéresis.

La condición para reconnectar una carga es:

$$I_{total} + I_{carga\_propia} + I_{margen} < I_{disponible} \quad (8.1)$$

Donde  $I_{carga\_propia}$  es el último valor de corriente registrado por el nodo antes de desconectarse e  $I_{margen}$  es un valor de seguridad adicional. Solo si la capacidad disponible en la red es suficiente para soportar la carga del nodo más este margen de seguridad, el NC decide su reconexión automática.

# CAPÍTULO 9

---

## Agente de Carga (AC)

---

### 9.1. Hardware

El AC está implementado sobre una placa de desarrollo basada en un microcontrolador ESP32 de 32 bits. La elección de esta plataforma responde a su adecuada capacidad de procesamiento e interfaces para las tareas requeridas, su amplia disponibilidad en el mercado junto a un bajo costo y la extensa base de recursos técnicos existentes, lo que facilita su programación y mantenimiento. Este dispositivo integra las funciones de adquisición de datos, cálculo de variables eléctricas y comunicación tanto con la microrred como con los NC.

El sistema cuenta en primer lugar con una etapa de alimentación encargada de acondicionar la tensión de corriente alterna proveniente de la microrred para energizar el circuito completo. La estabilidad de esta fuente es fundamental, ya que variaciones significativas en su salida introducen errores en las mediciones realizadas por el AC o pueden afectar el desempeño del microcontrolador.

Para la medición de la tensión de la microrred se emplea un módulo sensor basado en el transformador de señal ZMPT101B, seleccionado tanto por sus características técnicas como por su disponibilidad comercial. Este módulo genera una señal sinusoidal con un nivel de continua (offset) y una amplitud proporcional a la tensión real medida. Antes de ser leída por la entrada analógica del microcontrolador, la señal atraviesa una etapa de adecuación que garantiza que sus valores se mantengan dentro del rango permitido por el ESP32, evitando sobrepasar el límite máximo de 3,3 V.

Con el fin de comunicarse con los demás agentes que intervienen en la microrred, el AC incorpora un módulo CAN basado en el controlador MCP2515. Este dispositivo actúa como interfaz física entre el microcontrolador y el bus diferencial del protocolo CAN, permitiendo tanto el envío como la recepción de mensajes. El módulo se conecta al ESP32 mediante la interfaz SPI, a través de la cual se gestionan las señales de control (CS, INT) asociadas a la transmisión y recepción de datos.

El intercambio de información entre el AC y los NC se complementa mediante el protocolo inalámbrico ESP-NOW, soportado nativamente por el ESP32. Este protocolo opera en la banda Wi-Fi pero utiliza directamente la capa de enlace de datos. Al prescindir de redes Wi-Fi existentes, encabezados adicionales y procesos de reensamblado, ofrece baja latencia y alta confiabilidad en enlaces de corto a mediano alcance.

En virtud de la naturaleza distribuida del sistema, el AC también actúa como receptor de los datos de consumo enviados por todos los NC. Estos valores, junto con los parámetros globales de consumo y generación de la microrred que el propio AC calcula, son transmitidos mediante una interfaz UART a un módulo ESP32-S3 Super Mini. Este módulo tiene como función publicar la información recibida en un servidor externo para su almacenamiento, visualización y análisis posterior, permitiendo así integrar la operación local de la microrred con herramientas remotas de supervisión.

Finalmente, el AC incorpora una interfaz local destinada a la interacción con el usuario. Esta incluye un display que proporciona retroalimentación visual inmediata y que se comunica con el microcontrolador mediante la interfaz serie I<sup>2</sup>C. Se integran además pulsadores que permiten navegar entre distintas pantallas e ingresar parámetros operativos del Sistema de Gestión de Consumo (SGC), facilitando su configuración y supervisión sin necesidad de herramientas externas.

Pensando en la integración del AC dentro de instalaciones eléctricas ya existentes, se consideró fundamental que su montaje no requiriera intervenciones complejas ni modificaciones significativas de la infraestructura del usuario. En entornos residenciales, comerciales e industriales es habitual la presencia de cajas de paso estandarizadas

de  $10 \times 10$  cm, ampliamente utilizadas en canalizaciones eléctricas convencionales. Con el fin de favorecer la compatibilidad con este tipo de cajas y facilitar su incorporación por parte de instaladores de sistemas de microrredes, el diseño de la placa de circuito impreso (PCB) del AC se desarrolló teniendo en cuenta esta restricción dimensional desde el inicio del proceso.

La PCB se definió para ajustarse al espacio interno de la caja mencionada, respetando las distancias necesarias para acomodar todos los componentes que forman parte del circuito, la separación entre zonas de baja tensión y las partes asociadas a la medición de la tensión del bus y la fuente de alimentación. En base a estas consideraciones se organizaron los componentes siguiendo una disposición que permitiera mantener recorridos cortos en la medida de lo posible para las señales sensibles como, por ejemplo, la adquisición de la tensión, asegurar una correcta disipación térmica y reservar ubicaciones accesibles para conectores, borneras y elementos de interfaz con el usuario.

El diseño final del PCB, mostrado en los Anexos V, refleja estas decisiones, integrando en un espacio compacto todos los elementos funcionales del AC y permitiendo su instalación en una caja de paso estándar sin requerir adaptadores adicionales. Esta compatibilidad busca facilitar significativamente su implementación, reduciendo tiempos y costos de instalación y contribuyendo a que el sistema pueda ser incorporado como un módulo más dentro de las soluciones habituales manejadas por empresas instaladoras de sistemas de paneles solares.

En cuanto al proceso de fabricación del prototipo, el mismo se realizó en base técnicas accesibles que permitieran validar el funcionamiento del AC antes de avanzar hacia una producción más estandarizada. La PCB fue elaborada mediante el método de transferencia, técnica ampliamente utilizada en etapas iniciales de desarrollo por su bajo costo y rapidez de implementación. Una vez transferido el diseño al cobre y completado el proceso de grabado mediante la reacción química de oxidación-reducción con cloruro férrico, se realizaron las perforaciones necesarias para la colocación de los componentes, conectores y módulos externos. Posteriormente, se llevó a cabo el montaje y la soldadura de todos los elementos, asegurando una correcta fijación mecánica y verificando la continuidad eléctrica en cada etapa.

Con el objetivo de integrar la interfaz local en la caja de paso de  $10 \times 10$  cm, se efectuó un mecanizado de la tapa para alojar tanto los pulsadores como el display. La disposición de estos elementos fue seleccionada para garantizar accesibilidad al usuario, buena visibilidad y comodidad durante la utilización del sistema. Para asegurar un montaje firme y estético del display, se diseñó un soporte específico mediante software de modelado tridimensional y se imprimió en 3D utilizando material plástico de alta

resistencia. Este soporte permite fijar el display en la posición adecuada y facilita el ensamblaje final sin necesidad de herramientas adicionales.

El conjunto resultante, mostrado en la Figura 9.1, combina una PCB que cumple con las restricciones de diseño y una interfaz accesible en un dispositivo práctico para la instalación en una infraestructura existente.



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

## 9.2. Firmware

El desarrollo del firmware para el AC se basó en una arquitectura cooperativa de tiempo real, diseñada para garantizar la integridad de las mediciones eléctricas sin sacrificar la capacidad de respuesta en las comunicaciones. La estructura del código separa las tareas críticas de baja latencia, como el muestreo de señales, de las tareas de gestión de alto nivel, como la actualización del display y el manejo de los protocolos de red.

Las funciones de alta prioridad, específicamente la lectura del conversor analógico-digital (ADC) y los temporizadores del microcontrolador, se ejecutan de inmediato

gracias a rutinas de servicio de interrupción (ISR). Por otro lado, la lógica de control principal, que incluye el envío y recepción de mensajes CAN, la gestión de la red ESP-NOW y la interfaz de usuario, se procesa en el bucle principal (main loop) de manera no bloqueante. Esta separación asegura un comportamiento determinista en la adquisición de datos, evitando que el procesamiento de las comunicaciones degrade la precisión de la medición de tensión.

### 9.2.1. Adquisición y Procesamiento de Señales

La medición de la tensión de red proveniente de la microrred se realiza mediante un muestreo síncrono de alta frecuencia. Se configuró un temporizador por hardware para generar interrupciones a una frecuencia de 50 kHz. En cada interrupción, se dispara la conversión del ADC, asegurando que la frecuencia de muestreo sea un múltiplo exacto de la frecuencia fundamental de la red (50 Hz). Esto permite capturar un número entero de períodos de la señal, minimizando el error por efecto de "ventaneo.<sup>en</sup> en el cálculo del valor eficaz (RMS).

El firmware implementa un procedimiento de calibración al inicio para determinar el nivel de continua (offset) introducido por el sensor ZMPT101B. Posteriormente, en tiempo de ejecución, cada muestra es corregida restando este offset. El valor RMS se calcula procesando la suma de los cuadrados de las muestras adquiridas en una ventana de tiempo definida, aplicando luego la raíz cuadrada según la Ecuación 9.1:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (v[n] - V_{offset})^2} \times K_{sens} \quad (9.1)$$

Donde  $N$  es el número total de muestras en la ventana de medición,  $v[n]$  es el valor digital de la muestra actual,  $V_{offset}$  es el valor de calibración de cero y  $K_{sens}$  es el factor de sensibilidad del hardware. Este valor de tensión eficaz, combinado con la potencia disponible informada por el sistema de supervisión, permite al AC determinar la corriente máxima que puede ser consumida por el conjunto de cargas.

### 9.2.2. Gestión de Comunicaciones

El AC actúa como un puente de información, gestionando dos dominios de comunicación simultáneos: el enlace cableado con la supervisión de la microrred y la red inalámbrica con los NC.

### 9.2.2.1. Bus CAN (Integración con la Microrred)

La comunicación con los demás agentes se realiza a través del bus CAN. La lógica de transmisión implementada es no bloqueante: el AC intenta enviar sus reportes de estado y, en caso de fallo, realiza un número limitado de reintentos. El sistema cuenta con un mecanismo de recuperación de fallos que monitorea los errores de transmisión; si estos superan un umbral predefinido, el firmware reinicia automáticamente el controlador MCP2515 para restablecer el servicio sin intervención del usuario.

Para verificar el correcto funcionamiento de la capa física y la lógica de transmisión, se realizaron pruebas conectando el AC a un módulo analizador de bus CAN vinculado a una computadora. Como se observa en la Figura 9.2, esto permitió visualizar en tiempo real los paquetes inyectados en el bus por el AC, confirmando la correcta estructura de los identificadores y los datos enviados antes de la integración final con los demás agentes.



Figura 9.2: Prueba de comunicación vía bus CAN entre el AC y el sistema de supervisión de la microrred

### 9.2.2.2. Red ESP-NOW (Gestión de Cargas)

Para la coordinación con los NC, el firmware gestiona el intercambio de mensajes de control sin conexión (connectionless). El AC difunde periódicamente un mensaje de *Disponibilidad*, que contiene el límite de corriente calculado para la red. A su

vez, se mantiene a la escucha de los mensajes de *Consenso* provenientes de los nodos, los cuales reportan su consumo actual y prioridad.

La gestión de la lista de nodos es dinámica: al recibir un mensaje de un NC, el AC actualiza su registro interno o lo añade si es un nodo nuevo. Para mantener la coherencia del sistema, el firmware ejecuta una rutina de limpieza que elimina de la lista a aquellos nodos que no han reportado actividad tras un periodo de tiempo determinado (timeout), evitando así que datos obsoletos afecten el cálculo del consumo total.

### 9.2.2.3. UART (Gateway)

Adicionalmente, el AC consolida toda la información anterior y la transmite vía UART hacia el módulo secundario (ESP32S3-SuperMini), encargado de la publicación de datos via MQTT hacia la plataforma IoT, liberando al procesador principal de las tareas de conexión Wifi y publicacion de datos hacia el broker.

### 9.2.3. Interfaz de Usuario

La interacción local se gestiona mediante la actualización condicional del display OLED. Para minimizar la carga de procesamiento, el contenido de la pantalla solo se redibuja cuando se detectan cambios significativos en los valores mostrados o cuando el usuario interactúa con los pulsadores.

La Figura 9.3 muestra la pantalla principal de operación, donde el usuario puede visualizar en tiempo real las variables críticas del sistema: la potencia disponible ( $P_{disp}$ ), la tensión eficaz de red ( $V_{rms}$ ), la corriente máxima calculada ( $I_{max}$ ) y el consumo actual del sistema ( $I_{cons}$ ). El firmware también incluye pantallas de diagnóstico para verificar el estado del bus CAN y listar los nodos conectados.



Figura 9.3: Pantalla implementada para el AC. Muestra los valores de tensión, potencia y corriente disponibles en la microrred.

# CAPÍTULO 10

---

## Nodo de Consumo (NC)

---

### 10.1. Hardware

Los Nodos de Consumo representan el elemento ejecutivo dentro de la arquitectura distribuida del sistema propuesto. A diferencia de los esquemas de control centralizados tradicionales, estos dispositivos brindan la capacidad de procesar información local y tomar decisiones de actuación de manera autónoma con información de sus pares. Para cumplir con este requisito de inteligencia distribuida, se seleccionó al igual que en el caso anterior un ESP32. Esta elección no es arbitraria; sino que responde a la necesidad de contar con un procesador de alta velocidad capaz de gestionar simultáneamente el muestreo de señales en tiempo real y el protocolo de comunicación inalámbrico ESP-NOW, todo ello manteniendo un bajo costo y un consumo energético acotado.

El desarrollo del hardware del NC enfrentó el desafío de circuitos de potencia, medición de precisión e interfaz de usuario en un volumen físico restringido. El objetivo

de diseño fue lograr que el dispositivo final pudiera alojarse dentro de la cajas electricas de embutir rectangulares estándar de  $5 \times 10$  cm, ya existentes en la gran mayoría de instalaciones eléctricas. Para resolver esta restricción geométrica sin comprometer la seguridad ni la funcionalidad, se adoptó una estrategia de diseño modular, dividiendo el circuito en dos placas de circuito impreso (PCB) apiladas.

Esta arquitectura de dos niveles cumple una doble función crítica. En primer lugar, optimiza el uso del espacio disponible dentro del gabinete. En segundo lugar, y más importante, establece una barrera de seguridad entre los circuitos de alta tensión y la lógica de control. La placa inferior está dedicada en parte al manejo de la tensión de red (220 V CA) y medición de corriente, mientras que la placa superior aloja el microcontrolador y selector de prioridad. Esta separación física reduce significativamente el riesgo de inyectar alta tensión al microcontrolador y minimiza el acoplamiento o interferencias electromagnéticas provenientes de la red.

En la placa inferior, denominada etapa de potencia, se encuentran los siguientes subsistemas:

- **Fuente de Alimentación:** Se integró un módulo convertidor CA-CC conmutado compacto, encargado de transformar la tensión de línea de 220 V CA a una tensión continua estable de 5 V para alimentar la lógica del sistema. La estabilidad de esta fuente es vital, ya que variaciones en la tensión de alimentación podrían introducir errores en la referencia del sensor de corriente.
- **Actuación:** El control de la carga se realiza mediante un relé electromecánico con capacidad de conmutación de hasta 12 A a 250 V CA. Dado que las salidas digitales del microcontrolador no poseen la capacidad de corriente suficiente para excitar directamente la bobina del relé, se implementó una etapa de potencia intermedia utilizando un transistor bipolar NPN de uso general (modelo BC337) configurado como interruptor entrando en corte y saturación.
- **Sensor:** La medición del consumo se realizó mediante un sensor de corriente por efecto Hall lineal ACS712. Este componente ofrece una ventaja fundamental ya que proporciona aislamiento galvánico entre el conductor de corriente (que está al potencial de red) y los pines de señal. El sensor entrega una tensión analógica proporcional a la corriente instantánea que circula hacia la carga. Sin embargo, como este módulo opera a 5 V y el ESP32 tiene entradas tolerantes solo hasta 3.3 V, fue necesario intercalar un divisor de tensión resistivo para adecuar los niveles de señal y proteger al microcontrolador contra sobretensiones.

Por otra parte, la placa superior concentra las funciones de control e interacción. El módulo ESP32 se monta en esta, facilitando el acceso a sus puertos de programación y depuración. Para la configuración del dispositivo, se incorporó un interruptor

tipo DIP Switch de dos vías. Este componente permite al instalador o usuario asignar una dirección de prioridad binaria (de 0 a 3) al nodo de manera física, eliminando la necesidad de conectar una computadora o dispositivo para reconfigurar el software cada vez que se cambia la función del nodo. Finalmente, para brindar retroalimentación inmediata, se diseñó primero una interfaz visual compuesta por una barra de LEDs de tres colores (rojo, amarillo y verde) que se puede observar en los Anexos [Prototipado del Nodo de Consumo \(NC\)](#) y [Desarrollo de Hardware](#). Estos indicadores permitian únicamente el estado de disponibilidad energética de la microrred. Luego como se puede ver en la Figura 10.1 se implemento un display OLED similar al del AC con diseño en 3D para ser adaptado a una tapa estandar de cajas rectangulares de la marca Cambre, es específico su linea Siglo XXI.

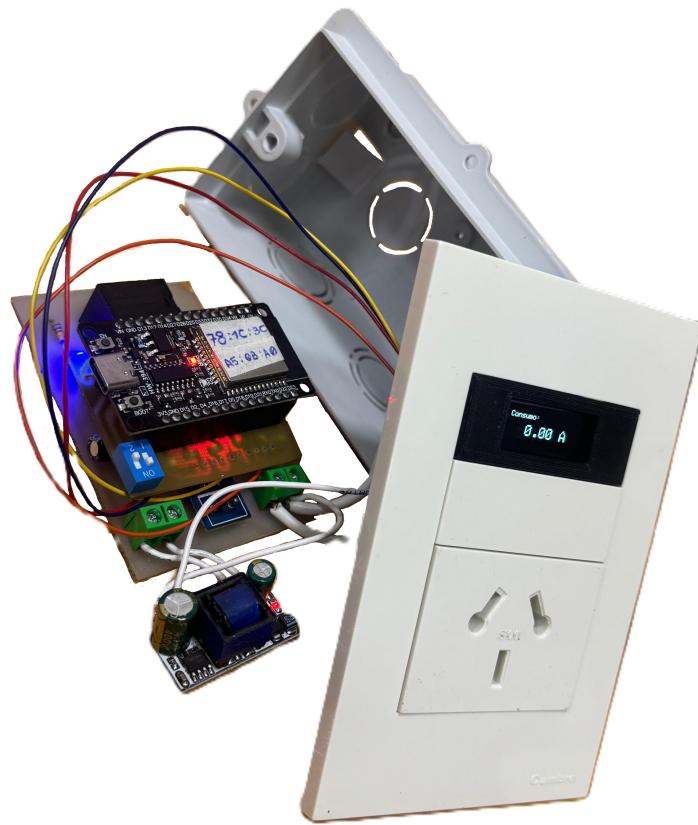


Figura 10.1: Hardware desarrollado para el Nodo de Consumo (NC)

## 10.2. Firmware

El firmware del NC implementa la lógica de control distribuido descrita en el Capítulo 8. Su bucle principal ejecuta tres tareas fundamentales de manera cíclica: la medición precisa del consumo, el intercambio de mensajes de consenso y la ejecución del algoritmo de decisión para la conexión o desconexión de la carga.

### 10.2.1. Medición de Corriente

La adquisición de la señal del sensor ACS712 sigue el mismo principio de muestreo síncrono utilizado en el AC. El microcontrolador captura la forma de onda de la corriente consumida por la carga y calcula su valor eficaz (RMS) en tiempo real.

Para validar la precisión de este método, se realizaron ensayos comparativos utilizando una punta de corriente comercial calibrada y un osciloscopio, como se muestra en la Figura 10.2. Los resultados demostraron que el sistema mantiene una linealidad adecuada y es capaz de medir correctamente incluso ante cargas no lineales (como fuentes conmutadas), reportando valores con un error en torno a los 30-40 mA siendo prácticamente insignificantes respecto del valor máximo y también mejorable con una fuente de mayor calidad.

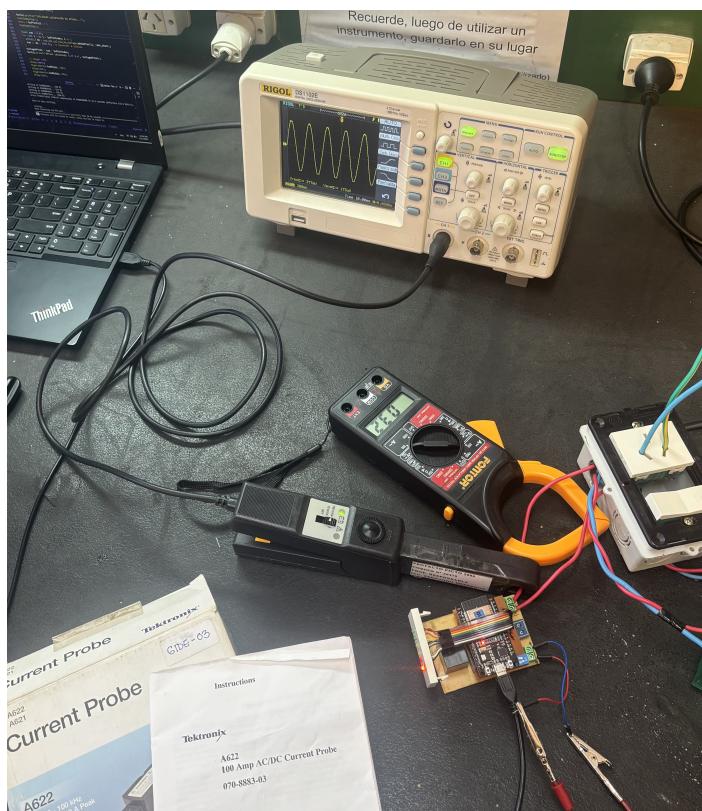


Figura 10.2: Prueba de medición de corriente en el NC contra punta de corriente

### 10.2.2. Lógica de Control y Actuación

El núcleo del firmware es una máquina de estados que evalúa constantemente si la carga debe permanecer conectada o desconectada. Esta decisión se basa en la comparación entre el consumo total reportado por la red (suma de los consumos de todos los nodos) y el límite de corriente disponible informado por el AC.

- **Si la carga está conectada:** El nodo verifica si el consumo total supera la disponibilidad. De ser así, y si su prioridad es la más baja de la red, procede a desconectar el relé para aliviar la carga del sistema.
- **Si la carga está desconectada:** El firmware aplica una lógica de reconexión con histéresis. Antes de intentar reconectar, calcula una corriente total estimada sumando el consumo actual de la red, su propio consumo histórico (guardado antes de la desconexión) y un margen de seguridad adicional. Solo si esta suma es inferior a la disponibilidad, se permite la reconexión. Esto evita oscilaciones indeseadas donde el nodo se conecta y desconecta repetidamente al estar cerca del límite.

### 10.2.3. Interfaz de Usuario

Para mantener al usuario informado sobre el estado operativo, el firmware gestiona un display OLED que alterna automáticamente entre diferentes vistas informativas, tal como se aprecia en la Figura 10.3.

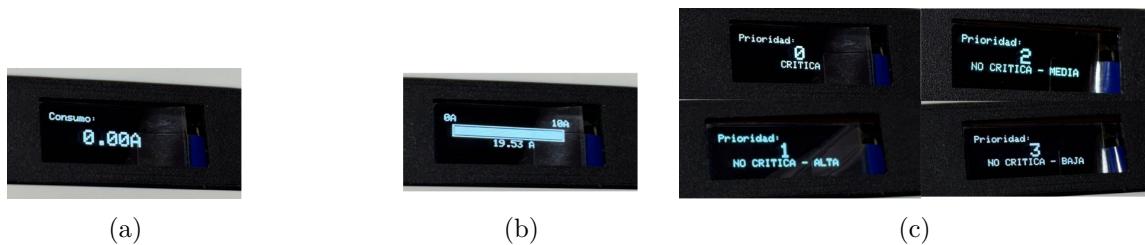


Figura 10.3: Pantallas implementadas para el NC. (a) Consumo. (b) Disponibilidad. (c) Prioridades.

- **Consumo (a):** Muestra la corriente instantánea que está demandando la carga conectada al nodo.
- **Disponibilidad (b):** Visualiza gráficamente (mediante una barra de progreso) y numéricamente cual es la disponibilidad de la microrred.
- **Prioridad (c):** Indica el nivel de prioridad asignado en el hardware (Carga Crítica o No Crítica Alta, Media o Baja), permitiendo al usuario verificar la configuración del NC.

# CAPÍTULO 11

---

## Plataforma IoT

---

La implementación final de la plataforma de supervisión se llevó a cabo materializando la arquitectura de microservicios descrita anteriormente. El sistema se despliega sobre un entorno contenerizado con Docker, lo que permitió aislar las dependencias de cada servicio y garantizar la portabilidad del software entre el entorno de desarrollo y el servidor de producción (VPS).

A continuación se detallan los aspectos técnicos del desarrollo del backend y el diseño de la interfaz de usuario.

### 11.1. Desarrollo del Backend y Procesamiento

El núcleo lógico de la plataforma reside en dos componentes de software desarrollados en lenguaje Python:

1. **Gestor de Telemetría (MQTT Worker):** Se implementó un script que opera como demonio (servicio en segundo plano). Este componente utiliza la librería `paho-mqtt` para suscribirse al broker y recibir en tiempo real los paquetes de datos JSON enviados por el AC. Su función es decodificar los payloads, validar que los valores eléctricos (tensión, corriente, potencia) se encuentren en rangos físicos coherentes y persistir la información en la base de datos MariaDB.
2. **Servidor de Aplicación (Flask):** Para la lógica web se utilizó el micro-framework Flask. Este se encarga de exponer los endpoints o rutas de la aplicación, gestionar las consultas SQL a la base de datos histórica y servir las plantillas HTML al navegador del cliente.

## 11.2. Diseño de Interfaz y Experiencia de Usuario

La interfaz visual (Frontend) fue construida utilizando el motor de plantillas Jinja2 integrado en Flask, combinado con el framework CSS Bootstrap para garantizar la adaptabilidad (diseño responsivo) en diferentes tamaños de pantalla.

Para dotar al sistema de una estética profesional y limpia, se seleccionó el tema Cerulean de la suite Bootswatch. Este tema se caracteriza por el uso de tonalidades azules y una tipografía clara que facilita la lectura de datos técnicos. Adicionalmente, se implementó mediante JavaScript una funcionalidad de cambio de modo (Claro/Oscuro), permitiendo al operador ajustar el contraste de la interfaz según las condiciones de iluminación del entorno, tal como se aprecia en la Figura 11.1.

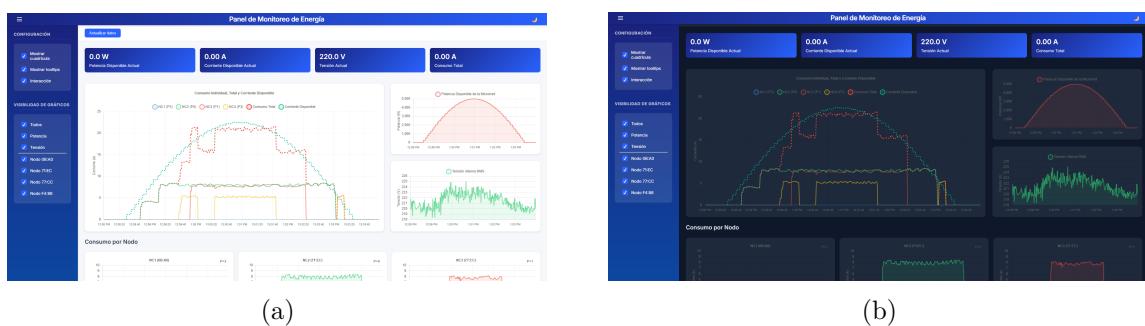


Figura 11.1: Vista Principal de la Plataforma-IoT implementada. (a) Tema Claro. (b) Tema Oscuro.

El panel de control principal (Dashboard) integra los siguientes elementos informativos:

- **Tarjetas de Estado (Top Cards):** Ubicadas en la parte superior, ofrecen una lectura inmediata de las variables críticas: Potencia Disponible, Corriente Disponible, Tensión de Red y Consumo Total Agregado.

- **Gráfico Principal:** Se utiliza la librería *Chart.js* para renderizar la evolución temporal de la energía. Este gráfico permite visualizar la curva de disponibilidad (simulando, por ejemplo, un perfil solar) superpuesta con el consumo real, facilitando la identificación visual de los momentos de déficit o superávit energético.

Para un análisis más granular, se desarrolló una vista de detalle por nodo, mostrada en la Figura 11.2. En esta sección, el usuario puede supervisar el comportamiento individual de cada NC, verificando los ciclos de conexión y desconexión ejecutados por el algoritmo de prioridad distribuida.

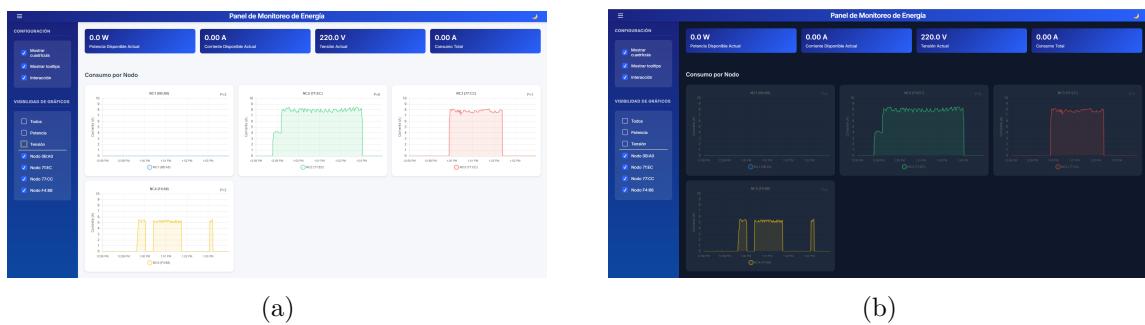


Figura 11.2: Vista de consumos en detalle. (a) Tema Claro. (b) Tema Oscuro.

Finalmente, la seguridad en el acceso remoto se garantizó mediante el despliegue de un contenedor Nginx actuando como proxy inverso, el cual gestiona certificados SSL de Let's Encrypt para forzar la comunicación encriptada vía HTTPS.

# CAPÍTULO 12

---

## **Integración del Sistema de Gestión de Consumos**

---

La validación final del Sistema de Gestión de Consumos requirió la integración de todos los componentes desarrollados, incluyendo el AC, los NC's y la Plataforma IoT, en un entorno que emulara fielmente las condiciones operativas de una microrred real. Para ello, se diseñó un banco de pruebas híbrido que combina hardware real de potencia con emuladores digitales para los demás agentes involucrados en el control de la microrred.

### **12.1. Interconexión con Agentes de la Microrred**

Tal como se observa en la Figura 12.1, la arquitectura física integra el AC en el bus de comunicaciones de la microrred. Dado que no se disponía de la infraestructura completa de generación, como paneles solares físicos y un banco de baterías de gran

capacidad en el laboratorio de pruebas, se optó por emular el comportamiento de los agentes restantes utilizando hardware de alto rendimiento.

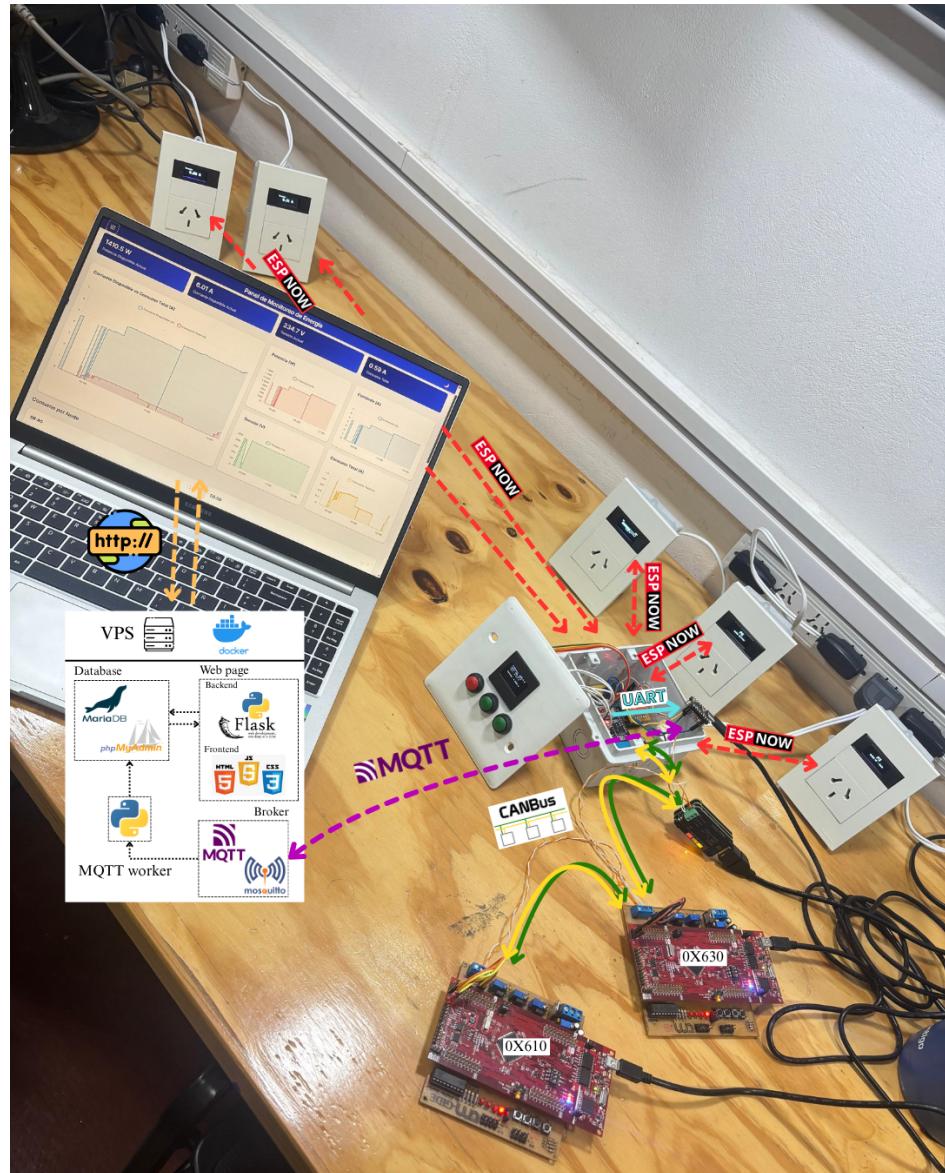


Figura 12.1: Integración completa del Sistema de Gestión de Consumos

Para este fin, se emplearon dos placas de desarrollo Texas Instruments LAUNCHXL-F28377S (ver Figura 12.2). La elección de esta plataforma se justifica por su arquitectura que incluye un Control Law Accelerator (CLA). Si bien en esta etapa actúan como emuladores, estas placas poseen la capacidad de procesamiento necesaria para ejecutar en el futuro los lazos de control de los convertidores de potencia reales de la microrred.

En la configuración del ensayo, una de las placas TI asume el rol de Agente de Generación (AG). Este dispositivo inyecta en el bus CAN mensajes periódicos que simulan los valores de tensión y corriente provenientes de un arreglo fotovoltaico, permitiendo al AC calcular la disponibilidad energética sin necesidad de una fuente de energía renovable real conectada.

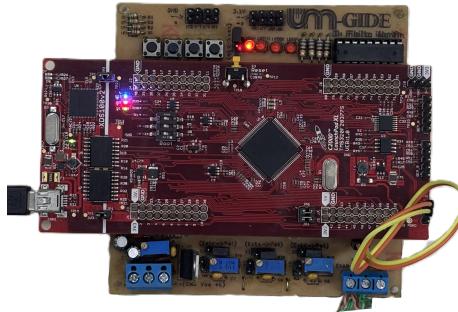


Figura 12.2: Placa Texas Instruments utilizada para emular pruebas de comunicación CAN

## 12.2. Estructuras de Comunicación

El correcto funcionamiento del sistema distribuido depende de la integridad de los datos intercambiados en tres niveles de red distintos. A continuación, se detallan las estructuras de los paquetes implementados para cada protocolo, especificando el formato de los datos para garantizar la interoperabilidad entre las diferentes plataformas de hardware.

### 12.2.1. Bus CAN

La comunicación entre el AC y el AG se realiza mediante tramas estándar CAN 2.0B. Es fundamental destacar que, para el empaquetado de los datos numéricos que ocupan más de un byte, se utiliza el formato Little Endian. Esto significa que el byte menos significativo (LSB) se transmite primero, seguido por el byte más significativo (MSB). Esta convención debe ser respetada rigurosamente por ambos microcontroladores para una correcta reconstrucción de los valores enviados en 16 bits.

La Tabla 12.1 detalla los identificadores (ID) y la codificación de los datos físicos utilizados en el ensayo. Los valores de tensión y corriente se envían como enteros sin signo.

Tabla 12.1: Estructura de paquetes CAN para la integración con placas TI

ID CAN	Emisor	Estructura de Datos (Payload)
0x610	Agente Gen. (TI F28377S)	Byte 0-1: Tensión ( $V_{fv}$ ) Byte 2-3: Corriente ( $I_{fv}$ )
0x620	Agente Carga (ESP32 AC)	Byte 0-1: Consumo Total

### 12.2.2. ESP-NOW

Para la coordinación inalámbrica entre el AC y los NC's, se utilizan tramas de longitud fija que minimizan la latencia. A diferencia del bus CAN, aquí se transmiten valores en punto flotante para mayor precisión en la toma de decisiones del algoritmo distribuido. La estructura de estos mensajes se presenta en la Tabla 12.2.

Tabla 12.2: Estructura de mensajes ESP-NOW de control

Tipo	Emisor	Datos
Disponibilidad	Agente Carga	<code>float availableCurrent</code> (Límite calculado)
Consenso	Nodo Consumo	<code>float current</code> (Consumo propio) <code>uint8_t priority</code> (Nivel 0-3) <code>float totalCurrent</code> (Suma acumulada)

### 12.2.3. MQTT

Finalmente, para la integración con la plataforma IoT, el sistema publica la telemetría en formato JSON a través de una red TCP/IP. Este formato es ideal para la interoperabilidad con sistemas web y bases de datos. La Tabla 12.3 describe la organización jerárquica de los tópicos a los que se suscribe el servidor, definiendo la frecuencia de actualización para cada tipo de dato.

Tabla 12.3: Organización de Tópicos MQTT y frecuencia de publicación

Tipo de dato	Tópico MQTT	Descripción
Datos por nodo	<code>nodo/&lt;ID&gt;</code>	Publica el consumo instantáneo individual.
TOTALES sistema	<code>energia/tOTALES</code>	Publica las variables globales del sistema.
Heartbeat	<code>status</code>	Notificación periódica de estado de conexión del AC al broker.

Las cargas útiles (payloads) de los mensajes están estructuradas como objetos JSON estándar. La Tabla 12.4 muestra el formato utilizado para reportar la actividad de cada nodo individual, mientras que la Tabla 12.5 detalla el mensaje consolidado que describe el estado general de la microrred.

Tabla 12.4: Payload JSON: Datos por Nodo

Campo	Tipo	Descripción
<code>nodo</code>	string	Identificador único del nodo (ej: "nodo_1")
<code>consumo</code>	float	Consumo medido en Amperes o Watts
<code>fecha</code>	string (ISO)	Marca de tiempo (ej: "2025-02-18T14:55:10")

Tabla 12.5: Payload JSON: Datos Totales del Sistema

Campo	Tipo	Descripción
potencia	float	Potencia total instantánea disponible
corriente	float	Corriente total disponible
tension	float	Tensión eficaz de red medida
consumo_total	float	Sumatoria del consumo de todos los NC's
fecha	string (ISO)	Marca de tiempo sincronizada

## 12.3. Validación Experimental

Para evaluar la respuesta del algoritmo de priorización ante escenarios de generación variable, se diseñó un ensayo dinámico integral. Se conectaron cargas reales a los NC's, tal como se muestra en la Figura 12.3, configurando un escenario con diferentes tipos de demanda y niveles de importancia:



Figura 12.3: Conexión de cargas para ensayo de la gestión del consumo

- **NC2 (Crítica - Prioridad 0):** Se utilizó una carga resistiva de alta potencia simulada mediante un banco de resistencias con dos niveles de operación (4 A y 8 A), representando equipos esenciales que no deben salir de servicio.
- **NC3 (Prioridad Alta - Prioridad 1):** Se conectó una pava eléctrica, representando una carga resistiva de uso intermitente pero importante.
- **NC4 (Prioridad Baja - Prioridad 3):** Se empleó un banco de lámparas incandescentes, simulando iluminación o cargas prescindibles que pueden ser desconectadas en primer lugar.

La condición de entrada para el ensayo fue un perfil de irradiancia solar simulado.=, en la placa TI que actúa como Agente de Generación, se programó una

curva de generación que emula el comportamiento de un día solar completo (amanecer, mediodía, atardecer), pero comprimido temporalmente en un ciclo acelerado de 5 minutos. Esto permitió someter al sistema a rampas pronunciadas de subida y bajada de disponibilidad energética, forzando la actuación de los NC y validando la respuesta del algoritmo.

### 12.3.1. Análisis de Resultados

La Figura 12.4 presenta la evolución temporal de las corrientes durante el ensayo completo. La línea punteada verde representa la corriente disponible ( $I_{disp}$ ) dictada por el perfil solar simulado, mientras que la línea punteada roja muestra el consumo total ( $I_{total}$ ) agregado de la red que el sistema intenta regular.

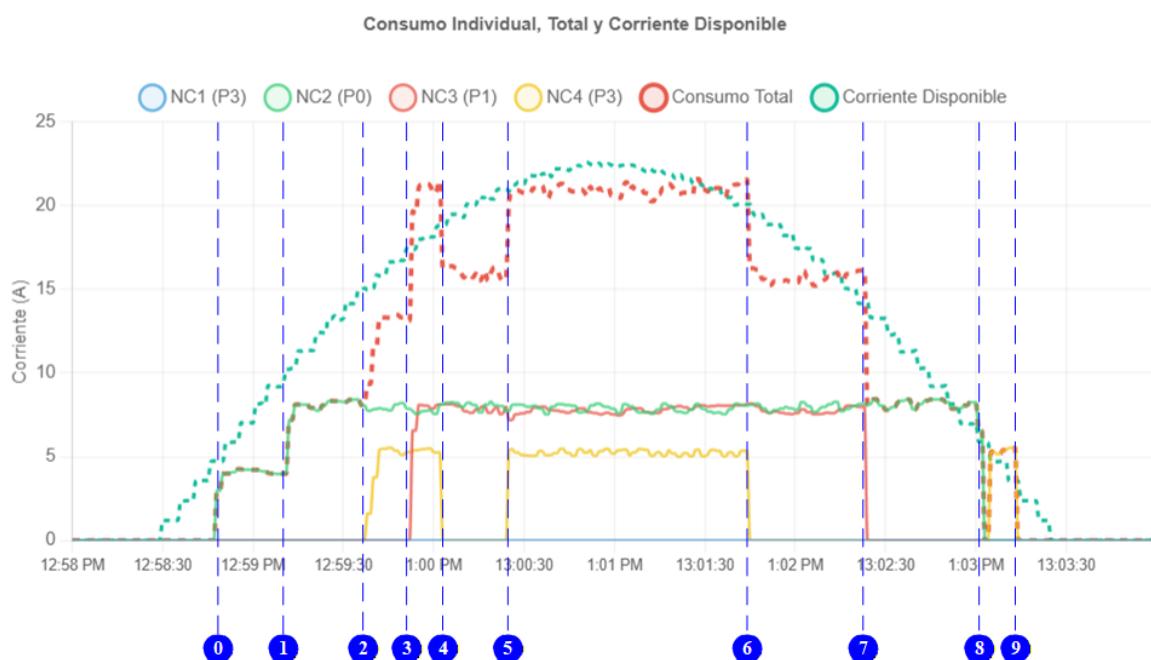


Figura 12.4: Resultados del ensayo de la gestión de consumos bajo perfil de irradiancia simulado

El comportamiento del sistema se analiza cronológicamente a través de los eventos marcados en la gráfica, demostrando la capacidad de auto-regulación de los NC's:

- **Inicio (Instantes 0-1):** Con una disponibilidad inicial baja pero suficiente, se conecta manualmente la carga crítica (NC2). El sistema detecta que hay margen operativo y permite su funcionamiento continuo sin restricciones.
- **Aumento de Generación (Instantes 2-3):** A medida que la irradiancia simulada aumenta hacia el mediodía, crece la capacidad de corriente disponible. Esto habilita la conexión manual de cargas adicionales. Primero se conecta el banco de

lámparas (NC4, prioridad baja) y posteriormente la pava eléctrica (NC3, prioridad alta). En esta fase, el sistema admite todas las cargas por un momento debido al periodo de estabilización de las cargas y proceso de consenso entre los NC.

- **Saturación y Desconexión (Instante 4):** Se alcanza el punto de inflexión donde el sistema reconoce que la demanda agregada supera a la disponibilidad. El algoritmo distribuido detecta inmediatamente la condición de déficit ( $I_{total} > I_{disp}$ ). Siguiendo estrictamente la lógica de prioridades, el sistema decide automáticamente desconectar el NC4, ya que posee la prioridad más baja (P3). Esta acción estabiliza la red de forma instantánea, protegiendo a las cargas de mayor jerarquía.
- **Reconexión Automática (Instante 5):** Al aumentar nuevamente la disponibilidad debido al pico de mediodía simulado, el nodo desconectado (NC4) evalúa su condición de reconexión. El nodo verifica matemáticamente que existe un margen suficiente ( $I_{disp} > I_{total} + I_{propia} + Margen$ ) y procede a reconectarse automáticamente, demostrando la capacidad del sistema para recuperar cargas cuando las condiciones energéticas mejoran.
- **Descenso de Generación (Instantes 6-7):** Al simular el atardecer, la disponibilidad comienza a caer. El sistema reacciona desconectando escalonadamente las cargas según su importancia. Primero se desconecta nuevamente el NC4 (baja prioridad) y, al continuar el descenso de la curva de generación, se fuerza la desconexión del NC3 (alta prioridad), preservando la energía restante exclusivamente para la carga crítica.
- **Colapso Simulado (Instante 8):** La generación cae por debajo del mínimo necesario incluso para sostener la carga crítica. En este punto extremo, el sistema protege la integridad de la microrred desconectando finalmente al NC2. Es interesante observar que se produce una breve reconexión del NC4; esto ocurre porque su consumo es menor que el de la carga crítica y sí encaja dentro del pequeño margen de energía remanente, lo cual valida que la decisión se basa puramente en la capacidad matemática disponible en tiempo real y no en estados predefinidos.

Este ensayo valida integralmente la lógica de control distribuido, demostrando que los NC's son capaces de auto-gestionarse para mantener el equilibrio energético de la microrred sin intervención del usuario, respetando estrictamente la jerarquía de prioridades establecida.

## **Parte IV**

### **Discusión y Conclusiones**

CAPÍTULO **13**

---

**Discussion**

---

CAPÍTULO **14**

---

**Conclusiones**

---

CAPÍTULO **15**

---

**Trabajo a Futuro**

---

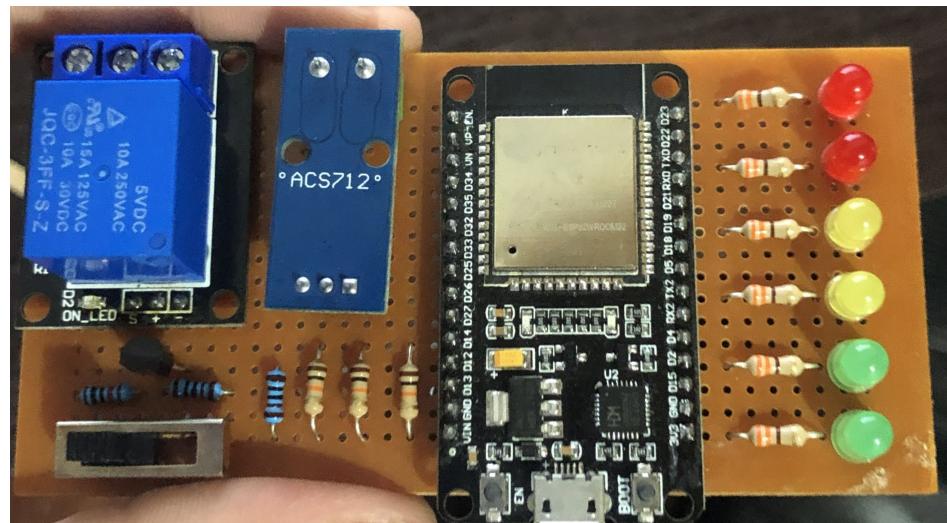
## **Parte V**

### **Anexos**

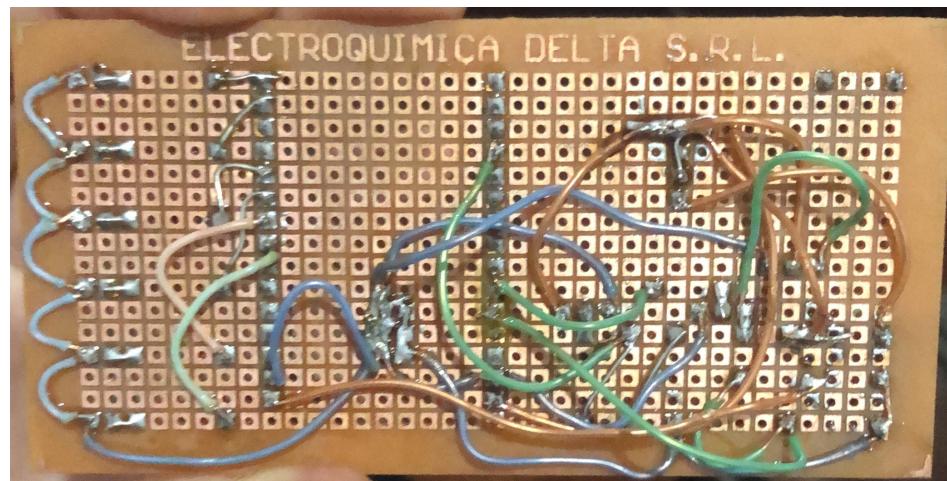
---

# **Prototipado del Nodo de Consumo (NC)**

---



(a)



(b)

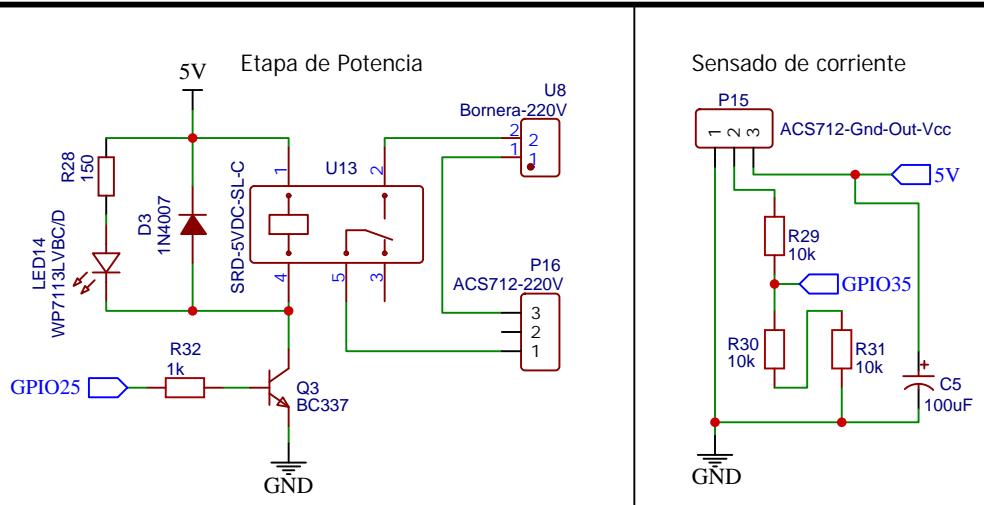
Figura 1: Primera version del NC ensablada en placa perforada. (a) Vista de componentes. (b) Conexiones.

---

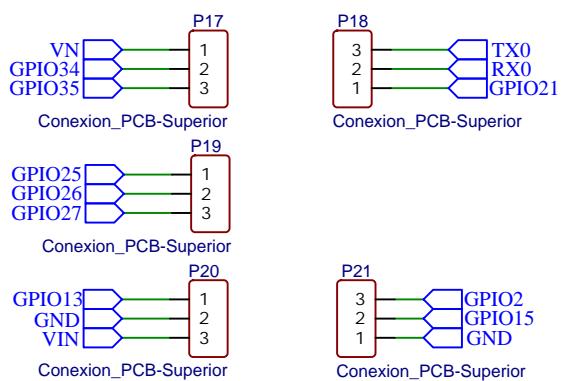
## **Circuito Esquemático y Diseño de PCB del Nodo de Consumo (NC)**

---

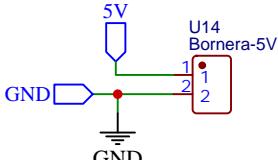
## PLACA INFERIOR



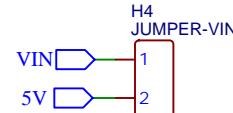
Pines que interconectan las placas



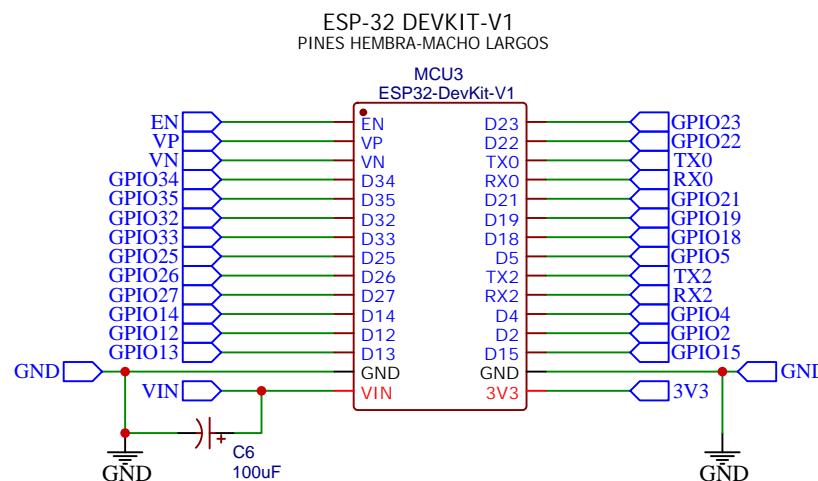
Alimentaci ó n 5V



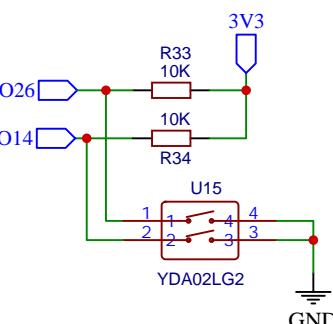
Jumper VIN/USB



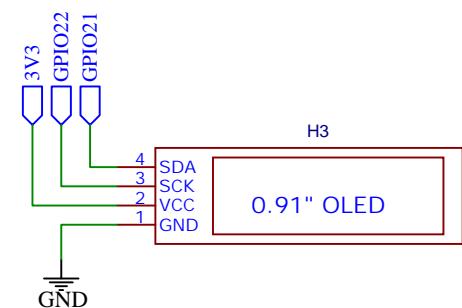
## PLACA SUPERIOR



Dipswitch selector de prioridad



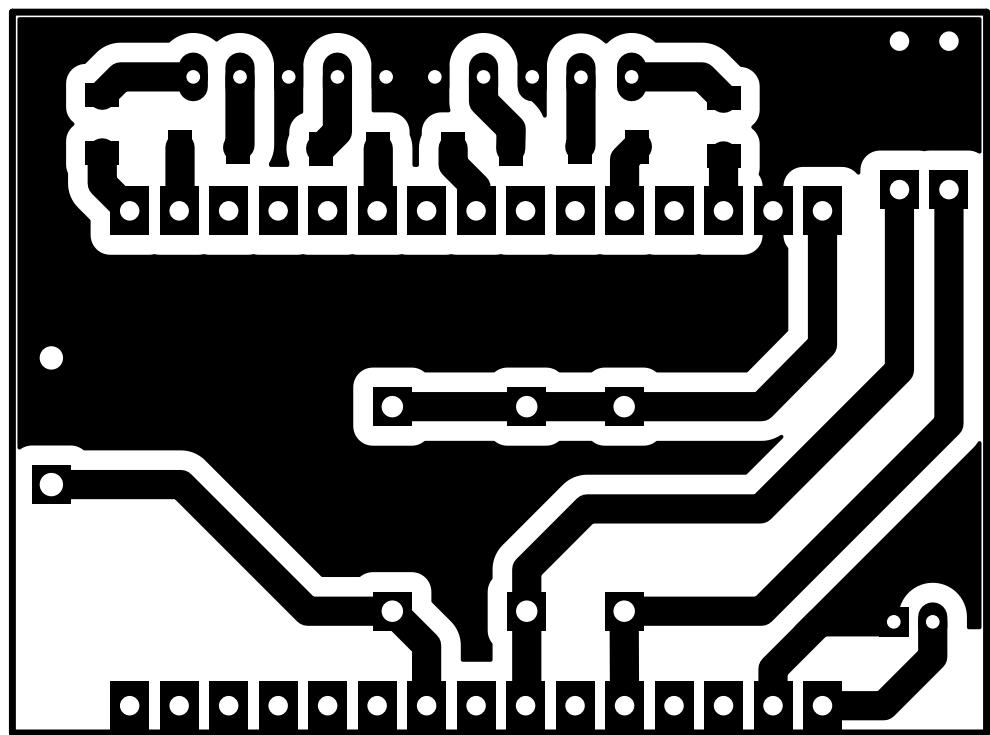
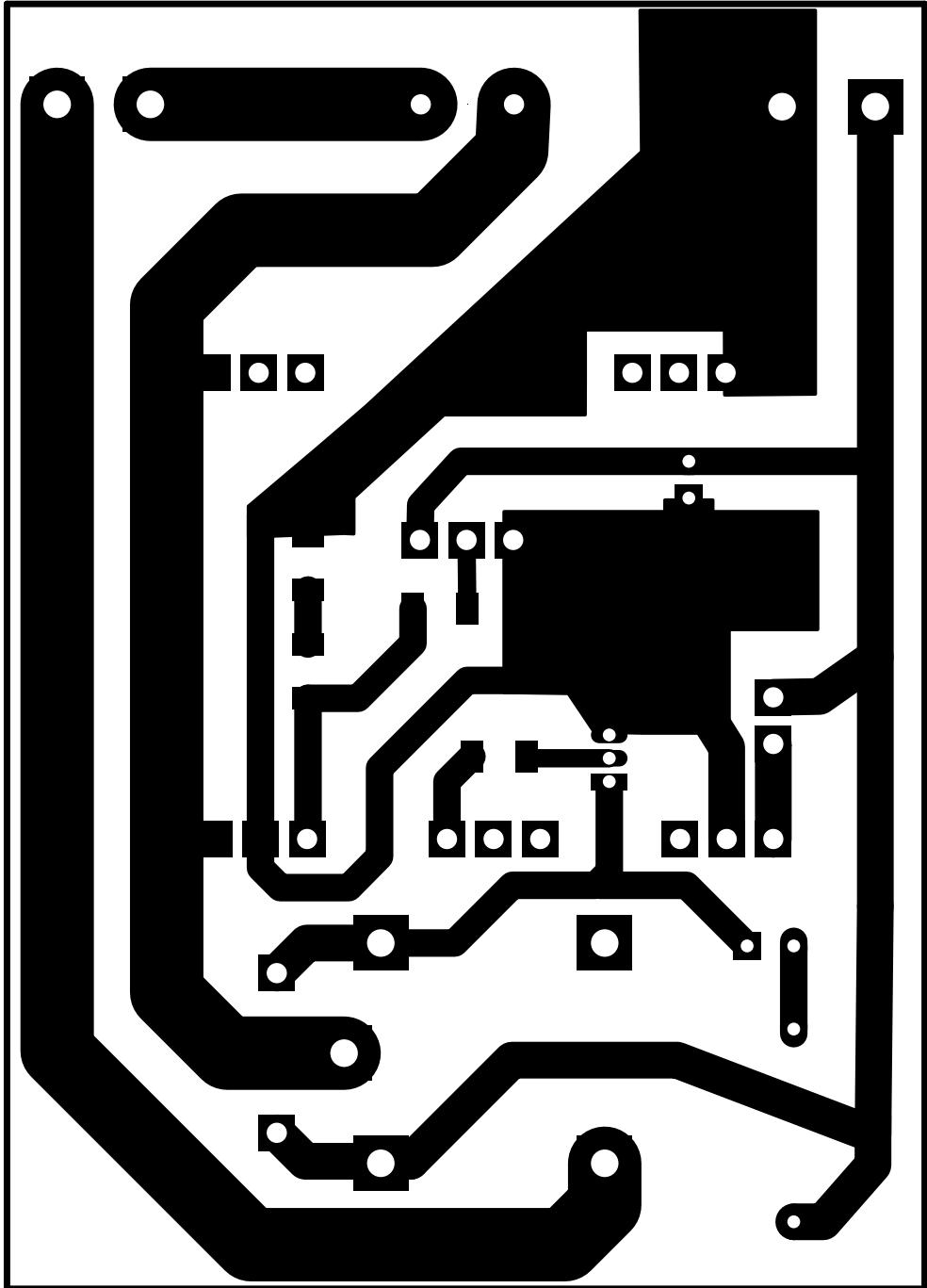
Display oled 0,91" indicador



TITLE:

nodo-carga-v3

REV: 1.0



---

## **Circuito Esquemático y Diseño de PCB del Agente de Carga (AC)**

---

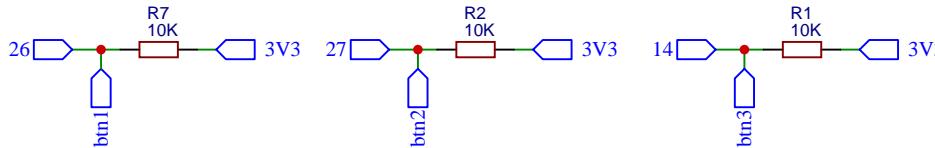
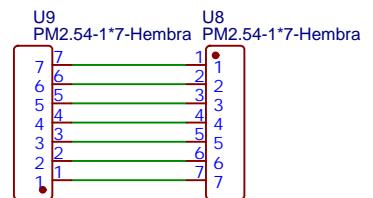
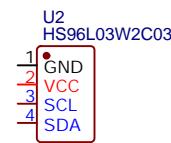
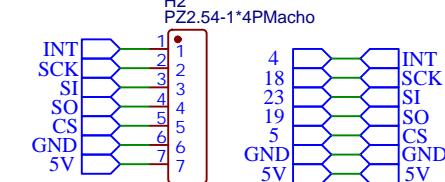
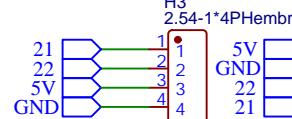
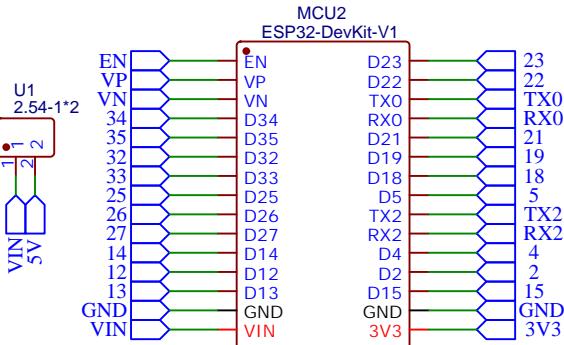
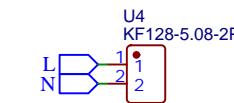
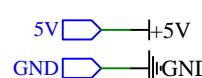
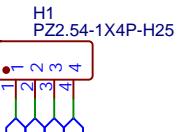
1

2

3

4

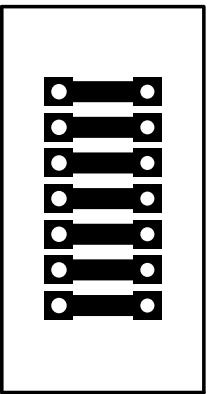
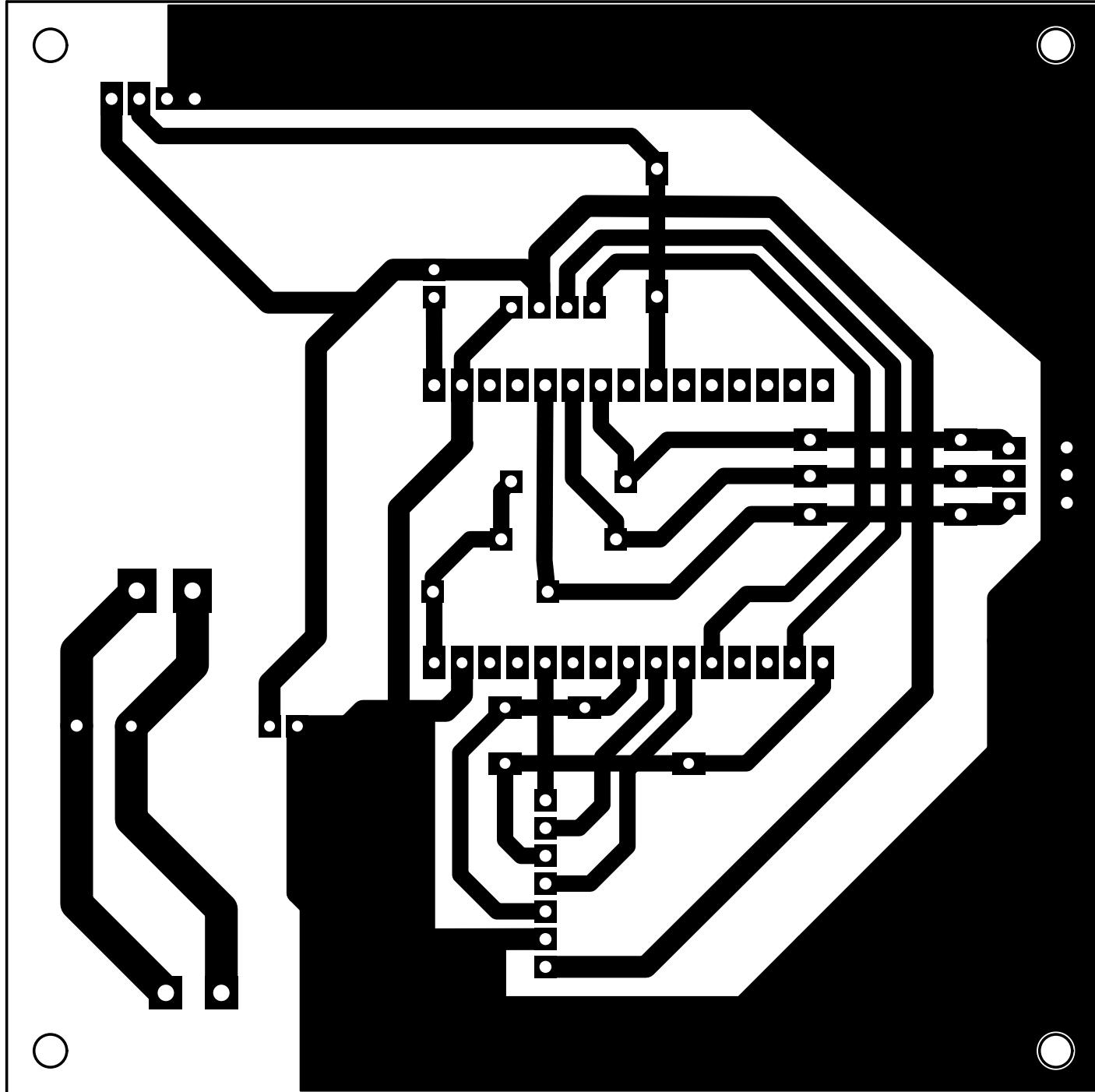
5



TITLE:

TFI - Sistemas Embebidos - Nodo Informante

REV: 1.0



---

## **Desarrollo de Hardware**

---

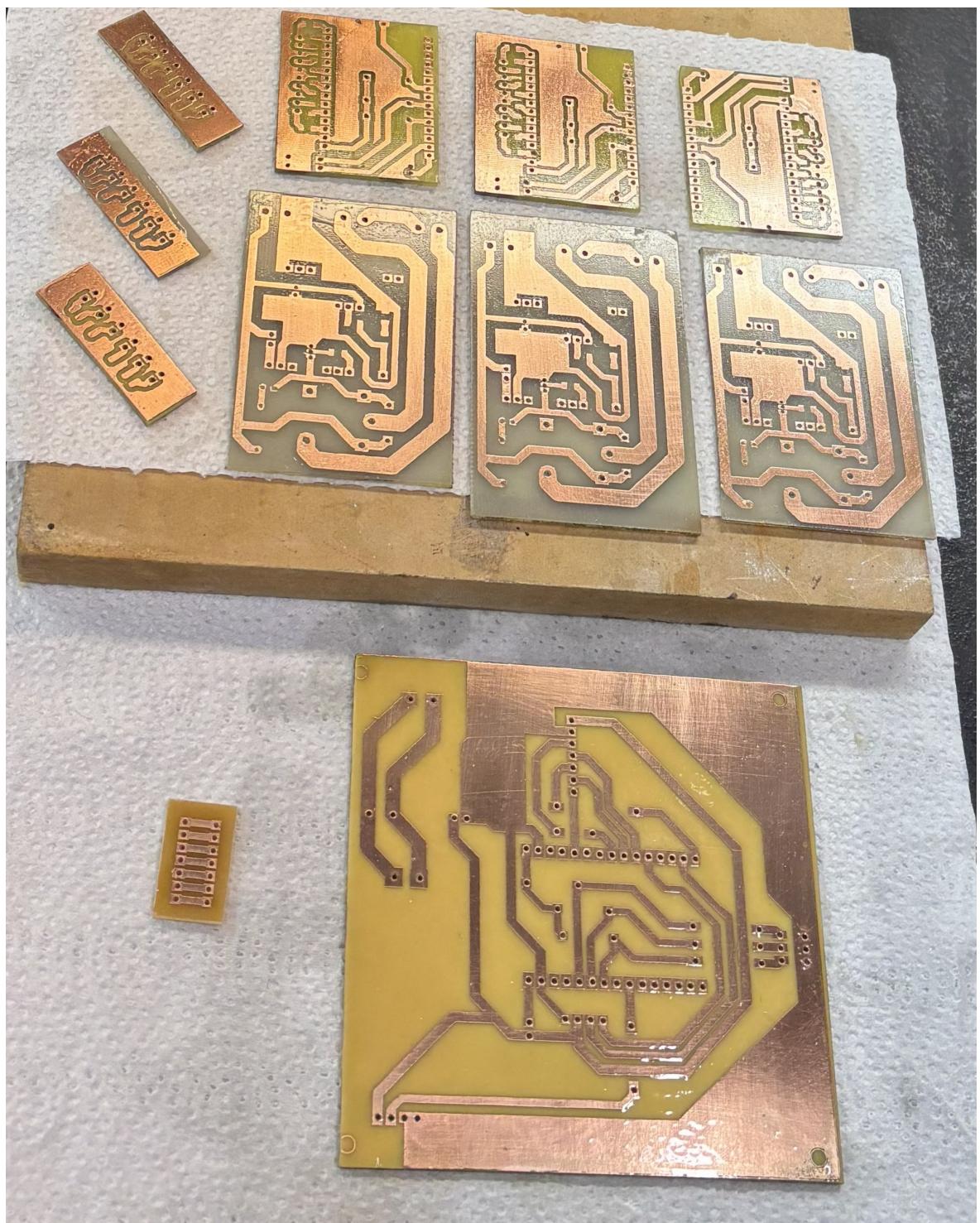


Figura 2: Desarrollo de las PCB de los NC en su versión anterior y AC

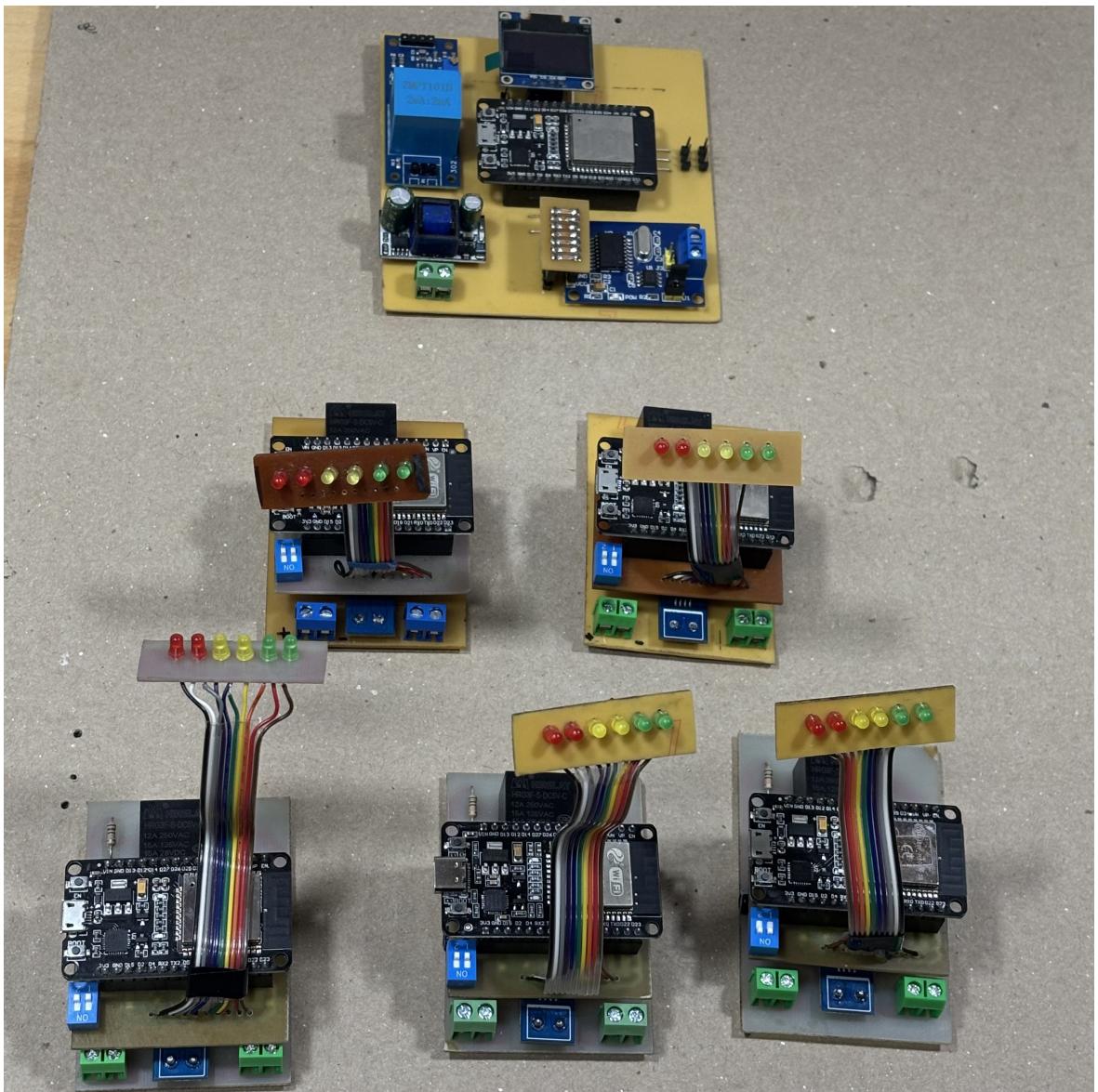


Figura 3: Primera versión de los NC y AC ensamblados



Figura 4: Version Final anterior

---

## Acrónimos

---

**AC** Agente de Carga [75](#)

**ADC** Analog-to-Digital Converter (Conversor Analógico-Digital) [75](#)

**CAN** Controller Area Network (Red de Área de Controlador), protocolo de comunicación serial robusto utilizado para la interconexión de agentes [75](#)

**GD** Generación Distribuida [75](#)

**GIDE** Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica [75](#)

**IoT** Internet of Things (Internet de las Cosas) [75](#)

**MQTT** Message Queuing Telemetry Transport, protocolo de mensajería ligero basado en el modelo publicación/suscripción [75](#)

**MR** Microrred Eléctrica [75](#)

**NC** Nodo de Consumo [75](#)

**PCB** Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impreso) [75](#)

**RMS** Root Mean Square (Valor Eficaz), medida estadística de la magnitud de una cantidad variable [75](#)

**SGC** Sistema de Gestión de Consumos [75](#)

---

## Glosario de Términos

---

**Agente** Entidad de hardware y software con capacidad de procesamiento autónomo que interactúa con otros agentes para alcanzar un objetivo de control común [75](#)

**Broker MQTT** Servidor central en la arquitectura MQTT que recibe mensajes de los clientes publicadores y los distribuye a los clientes suscriptores [75](#)

**Docker** Plataforma de software que permite crear, probar e implementar aplicaciones rápidamente mediante el uso de contenedores estandarizados [75](#)

**ESP-NOW** Protocolo de comunicación inalámbrica de baja latencia desarrollado por Espressif, que permite la transmisión directa de paquetes entre dispositivos sin necesidad de un router Wi-Fi [75](#)

**Firmware** Software específico que controla directamente el hardware de un dispositivo electrónico, ejecutándose típicamente en un microcontrolador [75](#)

**Histéresis** Tendencia de un sistema a conservar sus propiedades en ausencia del estímulo que las ha generado. En control, se utiliza para evitar oscilaciones rápidas alrededor de un punto de consigna [75](#)

**LittleEndian** Formato de almacenamiento o transmisión de datos digitales en el cual el byte menos significativo se coloca en la posición más baja de memoria o se transmite primero [75](#)

**Microrred** Sistema eléctrico local que integra generación distribuida, almacenamiento y cargas, capaz de operar conectado a la red principal o en modo aislado (isla) [75](#)

**Payload** Carga útil de datos contenida dentro de un paquete de comunicación, excluyendo los encabezados y metadatos del protocolo [75](#)

**Tópico** Cadena de texto utilizada en MQTT para filtrar y enrutar mensajes. Los clientes se suscriben a tópicos específicos para recibir la información deseada [75](#)

# **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](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](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/reportes_anuales_2024.pdf)