

GESTIÓN AUTÓNOMA DEL CONSUMO DE ENERGÍA PARA SISTEMAS DE SUPERVISIÓN DE MICRORREDES ELÉCTRICAS BASADO EN AGENTES

Silva, P. E.¹; Krzyzanowski Clark, L. N.¹; Fernández, G. A.¹; Esteban, E. S.²; Botterón, F.³

¹Instituto de Materiales de Misiones (IMAM), Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Facultad de Ingeniería (FI), Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica (GIDE). Oberá, Misiones, Argentina.

²Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), Universidad Nacional de Salta (UNSa). Salta Capital.

³IMAM, UNaM, CONICET, GIDE, FI. Oberá, Misiones, Argentina.

e-mail: pablosilva.ten@gmail.com; lucasclark997@gmail.com; guillermo.fernandez@fio.unam.edu.ar;
s.esteban593@gmail.com; botteron@fio.unam.edu.

Recibido 07/2025; Aceptado 08/2025

RESUMEN.- Las microrredes son sistemas eléctricos locales que combinan generación, almacenamiento de energía y cargas eléctricas dentro de un área definida, operando tanto en modo desconectado como conectado a la red eléctrica principal. Estas instalaciones representan una evolución de la generación distribuida, orientadas a la producción y consumo local de energía eléctrica para aprovechar los recursos disponibles, reducir pérdidas por transporte y aumentar la fiabilidad del suministro, especialmente ante fallos en la red principal. Las microrredes requieren de sistemas de control y supervisión para gestionar la generación, el almacenamiento y las cargas. En modo desconectado, estos sistemas tienen que balancear consumo con energía disponible, priorizando el abastecimiento de las cargas críticas de la microrred. Considerando esto, el presente trabajo propone el desarrollo de un sistema electrónico de gestión de consumo autónomo, que adapta la demanda según las especificaciones del sistema de supervisión de la microrred. Se detalla el diseño del software y hardware propuesto y los ensayos que demuestran la gestión adecuada del consumo, garantizando el suministro a las cargas críticas bajo distintas condiciones impuestas por el sistema de supervisión de la microrred. La propuesta puede mejorar la resiliencia en las microrredes, especialmente en casos con alta penetración de energías renovables y/o altos requerimientos de confiabilidad.

Palabras clave: Gestión del consumo, supervisión, microrredes, generación distribuida.

AGENT-BASED AUTONOMOUS ENERGY CONSUMPTION MANAGEMENT FOR MICROGRID MONITORING SYSTEMS

ABSTRACT.- Microgrids are local electrical systems that combine generation, energy storage, and electrical loads within a defined area, operating both in disconnected and connected modes. These facilities represent an evolution of distributed generation, oriented toward the local production and consumption of electrical energy to take advantage of available resources, reduce transmission losses, and increase supply reliability, especially in the event of grid failures. Microgrids require control and monitoring systems to manage generation, storage, and loads. In disconnected mode, these systems must balance consumption with available energy, prioritizing the supply of critical microgrid loads. Considering this, this work proposes the development of an autonomous electronic consumption management system that adapts demand according to the specifications of the microgrid monitoring system. The design of the proposed software and hardware, as well as the tests that demonstrate adequate consumption management, guaranteeing supply to critical loads under different conditions imposed by the microgrid monitoring system, are detailed. The proposal can improve resilience in microgrids, especially in cases with high renewable energy penetration and/or high reliability requirements.

Keywords: Consumption management, monitoring, microgrids, distributed generation.



Esta obra está bajo Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

1. INTRODUCCIÓN

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 (Mehigan L. *et al.*, 2018). 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 (Olivera Fujiwara E., 2010).

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 (Shaukat N. *et al.*, 2023). 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 (Allan G. *et al.*, 2015). 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 (Lasseter R. *et al.*, 2002). 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 (Olulope P. K. *et al.*, 2022). 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, brindado así el suministro de energía permanente a las cargas eléctricas locales (Uddin M. *et al.*, 2023). 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, mien-

tras 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 (Zidane T. E. K. *et al.*, 2025). 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 (Kim T-G. *et al.*, 2023; Lei Y. *et al.*, 2025):

- **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 (Mittal A. *et al.*, 2022). 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 (Shuai Z. *et al.*, 2018).

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 (Adegboyega A. W. *et al.*, 2025):

- **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 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 (Al-Ismael F. S., 2021), el control jerárquico de la M-CC puede implementarse combinando estrategias de control centralizadas, descentralizadas y distribuidas (Ahmad, G. *et al.*, 2025). 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 (Shafullah M. *et al.*, 2022). 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 (Alidrisi Y. *et al.*, 2021; Li F. *et al.*, 2025). 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 (Lee H. *et al.*, 2021; Panda M. *et al.*, 2025). 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 (Elmorshedy M. F. *et al.*, 2023); 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 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 (Stennikov V. *et al.*, 2022); en comparación con estrategias de control centralizada y descentralizada, 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 (Altin N. *et al.*, 2023).

El sistema para la gestión de consumo propuesto en este trabajo, forma parte del sistema de supervisión de la M-CC en estudio y también constituye un sistema multiagente, pero dedicado a controlar la carga de la misma. La Figura 1 muestra que el sistema para la gestión de consumo de energía (SGC) está conformado por el Agente de Carga (AC) y los Nodos de Consumo con los cuales interactúa. El AC está conectado a los demás agentes del sistema de supervisión, mediante un bus de comunicación serie que opera con protocolo CAN (del inglés *Controller Area Network*). Se ha seleccionado este protocolo debido a que ofrece alta inmunidad a las interferencias y permite el “diálogo” entre los agentes sin necesidad de una estructura maestro/esclavo para la comunicación entre los mismos (Di Natale M. *et al.*, 2012).

A continuación, se presenta la operación y los componentes del Sistema para la Gestión del Consumo de Energía (SGC), incluyendo el firmware y el hardware, así como el Agente de Carga (AC) y los Nodos de Consumo (NC). Posteriormente, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos del sistema y, finalmente, se exponen las conclusiones junto con trabajos futuros posibles.

2. METODOLOGÍA

2.1. Funcionamiento del Sistema de Gestión de Consumo

El sistema propuesto plantea un esquema distribuido para la gestión de las cargas en la microrred en estudio, 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 2 muestra los elementos que componen al SGC propuesto en este trabajo. 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 corrien-

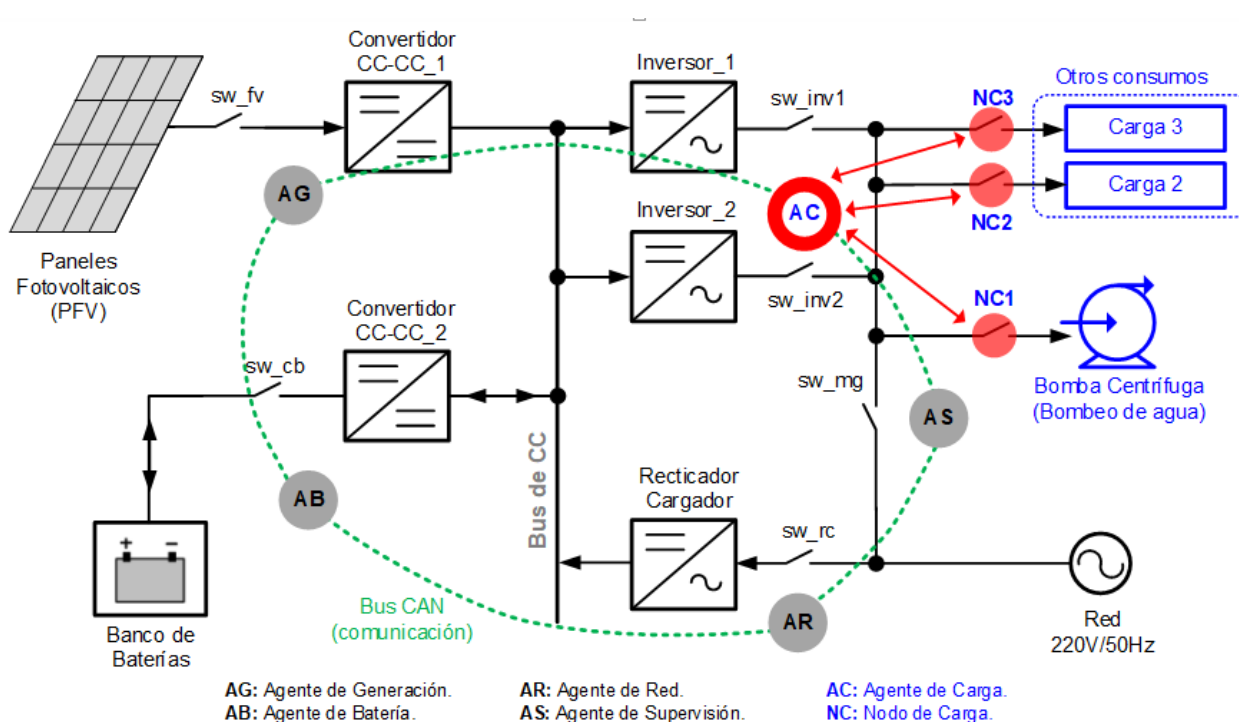


Fig. 1. Esquema de la microrred con sistema de supervisión y sistema para gestión del consumo de energía.

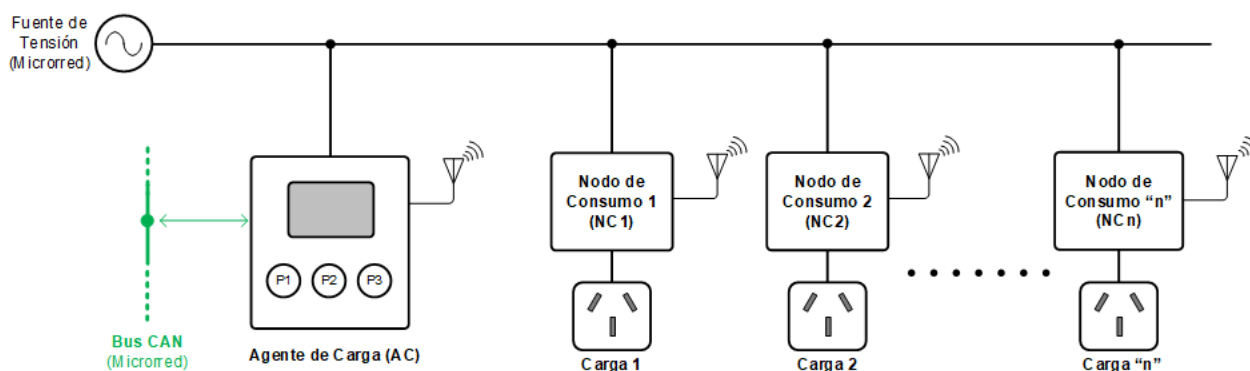


Fig. 2 Esquema general del Sistema Autónomo para la Gestión del Consumo de Energía.

te 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.

2.2. Agente de Carga (AC)

Funcionamiento

El AC actúa como la interfaz entre la microrred y los NC. Su función principal es calcular y distribuir el valor de corriente eficaz disponible para el consumo en la microrred y notificar periódicamente esta información a los NC, de modo que éstos puedan ejecutar la lógica distribuida de conexión /desconexión de cargas, según las prioridades establecidas para cada una de ellas. Para cumplir con esto, el AC realiza dos tareas esenciales:

- Muestreo de la tensión de línea para calcular su valor eficaz.
- Recepción de la potencia disponible proveniente del sistema de supervisión de la microrred (vía bus CAN).

A partir de estos dos valores, el AC calcula la corriente eficaz y luego publica este valor disponible para consumo a los NC mediante mensajes periódicos de difusión (broadcast). 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 (Lasseter et al., 2002; Uddin et al., 2023).

Hardware

El AC está desarrollado con una placa de desarrollo ESP32, basada en un microcontrolador (uC) de 32 bits, la cual fue seleccionada debido a que posee prestaciones acordes a la aplicación, hay una amplia disponibilidad en el mercado nacional y también existe una vasta cantidad de recursos en la web que facilitan su programación. Esta placa cumple con las funciones de adquisición de datos, cálculo y comunicación tanto con la microrred como con los NC. En la Figura 3 puede observarse los bloques principales que componen al AC. En primer lugar, se tiene una fuente de alimentación que adecua el voltaje de corriente alterna provisto por microrred para energizar todo el circuito. La tensión de salida de la fuente de alimentación debe de ser lo más estable posible ante variaciones en la corriente consumida por el circuito del AC, para evitar variaciones puedan causar errores en las mediciones que realiza este agente.

Para medir la tensión de corriente alterna proveniente de la microrred, debido a sus especificaciones técnicas adecuadas y la disponibilidad en el mercado nacional, es seleccionado un módulo sensor de voltaje basado en el transformador de señal ZMPT101B. Este módulo proporciona una señal sinusoidal montada en una componente de continua (offset), con amplitud proporcional a la tensión medida. Esta señal pasa por una etapa de adecuación an-

tes de ingresar a la entrada analógica del uC, con esto se evita sobrepasar los valores máximos que admite la misma (0 a 3,3V).

Para la comunicación con los demás agentes que intervienen en el control de la microrred, el circuito del AC posee un módulo CAN basado en el controlador MCP2515. Este módulo es un transceptor que permite tanto la recepción como el envío de mensajes, actuando como puente físico entre el uC y la línea diferencial del bus CAN. En este caso es importante destacar la colocación de una resistencia de terminación de línea de 120 Ω para evitar reflexiones de señales en el bus. La salida del módulo CAN es vinculada al uC mediante la interfaz de comunicación serie SPI que posee este último, donde las señales de control (CS, INT) son activadas indicando, por ejemplo, la recepción un mensaje.

El intercambio de información entre el AC y los NC, es implementado con la placa ESP32 a través de una comunicación en la banda de frecuencia Wi-Fi con ESP-NOW, que es un protocolo de comunicación inalámbrica basado en la capa de enlace de datos, el cual reduce las cinco capas del modelo OSI a una sola. Además, no requiere de una red Wi-Fi existente, encabezados ni desempaquetadores en cada capa, lo que permite una respuesta rápida y reduce el retraso causado por la pérdida de paquetes en redes congestionadas. Estudios experimentales muestran que el protocolo ESP-NOW puede ofrecer menores tasas de consumo y una tasa de éxito de paquetes superior a la de Wi-Fi en entornos interiores de alcance corto a medio, lo que lo hace particularmente adecuado para topologías distribuidas sin infraestructura preexistente. Sin embargo, la literatura advierte que el rendimiento en escenarios de alta densidad de nodos aún requiere evaluación adicional, por lo que es recomendable validar el desempeño en despliegues mayores antes de su uso en instalaciones a gran escala (Urazayev D. et al., 2023).

Por último, para la interacción local con un usuario, el AC dispone de un display que ofrece retroalimentación visual inmediata. Este dispositivo recibe la información a mostrar mediante una interfaz de comunicación serie I2C que lo conecta con el uC. El AC también posee un conjunto de pulsadores que permiten la navegación por las distintas pantallas y la configuración de parámetros operativos del SGC.

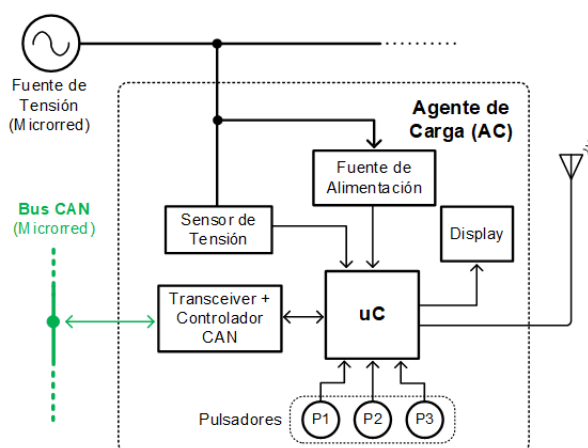


Fig. 3 Diagrama de bloques del Agente de Carga.

Firmware

La estructura del firmware desarrollado para el AC es cooperativa, los eventos de alta prioridad y baja latencia (como ser la lectura del conversor analógico-digital y temporizadores del uC),

son manejados en contextos de interrupción o en los *callbacks* provistos por las librerías utilizadas, mientras que la lógica de más alto nivel (como ser el envío de mensajes CAN y la actualización de las pantallas del display) corre en el bucle principal sin bloquear a la ejecución del programa. Esta separación permite mantener un muestreo de señales determinista a alta frecuencia evitando que el procesamiento “pesado” degrade la adquisición de la señal voltaje medida en el AC.

La medición del voltaje de corriente alterna (CA) proveniente de la microrred es realizada con un muestreo síncrono y de alta frecuencia, utilizando para esto la rutina de servicio a la interrupción de un temporizador que desborda con una frecuencia de 50 kHz. Cada vez que el temporizador interrumpe, es iniciada la conversión analógico-digital en el uC. De esta forma, la frecuencia de muestreo es de 50 kHz, siendo la misma múltiplo de la frecuencia fundamental de la señal medida (voltaje CA de la microrred) a modo que la cantidad de periodos muestreados de esta señal resulte en un valor entero para evitar el efecto no deseado de “ventaneo” en la medición.

Antes de iniciar la ejecución del bucle principal del programa, el firmware desarrollado incorpora un procedimiento de determinación del valor medio o componente de continua (offset) de la señal que proporciona el módulo sensor de voltaje. Este procedimiento consiste en el llenado de un buffer de memoria con sucesivas muestras que se promedian para obtener el offset presente en la entrada analógica del uC.

En el procedimiento mencionado y también durante la operación del AC, las muestras son convertidas a milivoltios a través de una rutina de calibración del conversor analógico-digital del uC con su tensión de referencia interna, restándose el offset para obtener la componente de alterna pura muestreada. El valor eficaz discreto estimado, es calculado a través de la media de los cuadrados de las tensiones corregidas y aplicando la raíz cuadrada. Este cálculo se corresponde con la Ecuación 1, donde N es la cantidad total de muestras y a_i representa los valores de las sucesivas muestras obtenidas a partir de la señal de salida del módulo sensor de voltaje utilizado.

$$V_{eficaz} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2} \quad (1)$$

El resultado de la Ecuación 1, afectado por un factor de sensibilidad (dado por el circuito de adecuación de la señal) representa el valor de tensión eficaz entregado por la microrred. Este valor, en conjunto con la potencia proporcionada por el sistema de supervisión, permite obtener la corriente eficaz máxima disponible a ser utilizada por el conjunto de cargas, como se explicó en la subsección 2.2.

La capa de comunicación está dividida en dos dominios. Uno local inalámbrico a través de ESP-NOW para comunicar al AC con los NC y otro mediante el bus CAN (MCP2515) para la integración de este agente con la supervisión de la microrred.

En el firmware desarrollado, tanto para el AC como para el NC, se definen dos estructuras de mensaje ESP-NOW, una de disponibilidad y otra de consenso. El mensaje de disponibilidad transporta la corriente eficaz calculada por el AC (disponible para ser utilizada por el conjunto de cargas) y el mensaje de consenso contiene la medición de corriente local y la prioridad de cada NC conectado al SGC.

La gestión de los NC a través del firmware del AC es simple y robusta,

ante cada llegada de un mensaje de consenso se actualiza o añade la información del NC emisor, incluyendo su dirección MAC (identificador único que posee cada uC), el último consumo de corriente reportado y un valor en segundos desde el último mensaje recibido. Periódicamente el AC elimina de su registro de comunicación a los NC que no enviaron mensajes en un lapso de tiempo determinado para evitar que datos antiguos influyan en el cálculo del consumo total de corriente con el que está operando el SGC.

El consumo total reportado por el AC es calculado como la suma de las contribuciones activas de los NC siendo transmitido por el bus CAN al resto de los agentes y también publicado en su display para una rápida visualización e indicación del consumo de las cargas frente a la disponibilidad de la microrred.

La lógica de transmisión realizada mediante el bus CAN por el AC para informar de su estado al resto de los agentes del sistema de supervisión, es no bloqueante. Es decir, el envío de datos es realizado con un límite de reintentos, cualquier fallo incrementa un contador y al sobrepasar este un umbral, se reinicia el controlador MCP2515, buscando recuperar la operación sin requerir intervención manual o reinicio total del AC.

La interfaz de usuario del AC se apoya en un display OLED y en un conjunto de pulsadores. Para minimizar carga computacional en el uC y evitar parpadeos innecesarios, la actualización del display es condicional. Es decir, se marca una bandera cuando cambia algún dato relevante y es forzada la rescritura del display sólo cuando la diferencia supera un umbral o cuando el usuario navega entre las diferentes pantallas de visualización de datos. La navegación soporta múltiples vistas, una pantalla principal con la potencia/corriente/tensión y consumo de corriente total de las cargas conectadas; también una vista paginada con el listado de NC activos; y una vista de diagnóstico CAN que muestra el estado de este bus de comunicación, último intervalo de envío y conteo de fallas de comunicación mencionado anteriormente.

Siguiendo con la lógica cooperativa, los pulsadores implementan una detección no bloqueante con técnicas antirrebote para evitar múltiples detecciones al efectuar una pulsación y distinción entre pulsaciones cortas y largas (esta última usada para reinicio del uC del AC).

2.3. Nodo de Consumo (NC)

Funcionamiento

La Figura 4 muestra la estructura del circuito del NC, el cual está construido en base a un uC, encargado de comandar los compo-

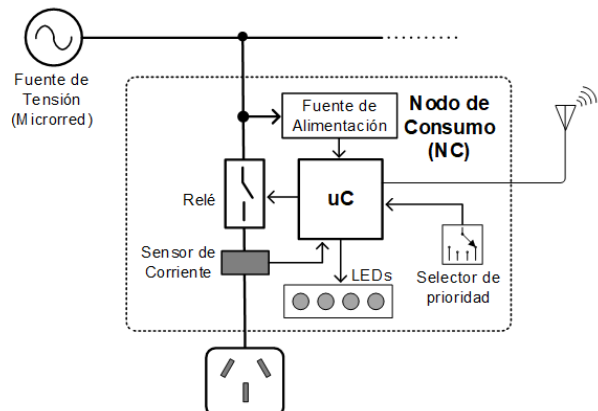


Fig. 4 Diagrama de bloques de los Nodos de Consumo

nentes para conectar y desconectar a la carga que tiene asociada. El circuito del NC también incorpora un sensor de corriente para realizar la medición del consumo de la carga conectada, un relé para actuar a la conexión o desconexión en base a la información disponible, una fuente de alimentación, LEDs indicadores y un selector de prioridad.

Cada NC mide la corriente consumida por la carga y comparte esta información tanto con sus pares como con el AC. A través de estos datos y con la información recibida, el nodo evalúa el estado de la microrred y, en función de su prioridad y del consumo total, decide de manera autónoma si la carga asociada debe permanecer conectada o desconectarse.

Hardware

Al igual que el AC, el circuito del NC está implementado en base a una placa de desarrollo ESP32 (uC), que cumple las funciones de adquisición de datos, cálculo de corriente y comunicación tanto con el AC como con los demás NC mediante el protocolo ESP-NOW.

A partir de la Figura 4 puede apreciarse que el NC dispone de una fuente de alimentación, mediante la cual son energizadas las demás partes del circuito, incluyendo el uC, el relé y el sensor de corriente.

Para la medición de corriente consumida por la carga que posee el NC, se utiliza un sensor de efecto Hall ACS712, que puede medir en el rango de ± 20 A de corriente alterna. Este sensor, al igual que el sensor de tensión usado en el AC, entrega un voltaje sinusoidal montado en una componente de continua (offset) con amplitud proporcional a la corriente medida (amplitud máxima de 5 V). A fin de adecuar la señal al rango de entrada del conversor analógico-digital del ESP32 (0 – 3,3 V), la señal de salida del sensor de corriente es reducida en amplitud mediante un divisor de tensión resistivo, evitando así la saturación o daño de la entrada analógica del uC.

En lo referente a la actuación sobre la carga, el NC cuenta con un relé electromecánico de 5 V/12 A, el cual permite conectar o desconectar la carga asociada de acuerdo con las decisiones tomadas por el firmware desarrollado para el uC del NC. El control del relé es realizado a través de una etapa de potencia diseñada con un transistor BC337.

Para la interacción y visualización local del usuario, el NC incorpora seis LEDs indicadores en forma de barra distribuidos en tres pares de colores (rojo, amarillo y verde) con los cuales es representada la cantidad de corriente que puede suministrar el nodo en las condiciones de carga actual de la microrred. De esta forma, la barra de LEDs proporciona información al usuario para tomar la decisión de conectar o no la carga que desea energizar.

Cada NC también dispone de un *dipswitch* de dos llaves, el que puede ser utilizado por el usuario para configurar la prioridad relativa del nodo dentro de la distribución de cargas de la microrred. Esta configuración resulta fundamental en el proceso de decisión distribuida, ya que define qué NC debe desconectar su carga primero cuando la corriente disponible no resulta suficiente.

Firmware

El algoritmo desarrollado para el NC fue diseñado considerando la gestión de cargas mediante un enfoque integral que con-

templa múltiples variables de entrada. Su objetivo es adecuar la utilización de la carga a la energía disponible en la microrred. A continuación, se describe en detalle la estructura del firmware implementado, su lógica de funcionamiento y las variables clave consideradas en la toma de decisiones de control.

La principal variable utilizada por cada NC en la toma de decisión relacionada a la conexión/desconexión de su carga, es la corriente medida con su sensor. Debido a que este proporciona una señal semejante al caso del módulo sensor de voltaje utilizado en el AC, el firmware desarrollado para el NC aplica las mismas estrategias de muestreo y cálculo del valor eficaz de la tensión de salida del sensor de corriente (ACS712).

Para la comunicación, tanto con el AC como con los demás NC, el firmware define un *callback* de recepción de mensajes, ejecutado cada vez que llega un mensaje. Si es un mensaje de disponibilidad proveniente del AC, el firmware almacena la información de corriente eficaz máxima disponible y, en base a ella los LEDs indican la disponibilidad de corriente para el consumo en el NC. Si el mensaje proviene de un NC, se verifica si el mismo está registrado. En caso afirmativo, son actualizados los datos de consumo de corriente, prioridad y tiempo desde el último mensaje; en caso contrario, se incorpora a la lista de NC conocidos junto con la información recibida.

En este contexto se identifican dos escenarios principales: cuando la carga asociada al NC está conectada y cuando desea conectarse. En ambos casos el firmware comprueba el estado del relé. Cuando el relé está activado, se trata del primer escenario y para determinar si debe continuar en este estado, el NC primero calcula el consumo de corriente de la carga asociada. Si es la primera medición (identificada mediante una bandera), se espera un intervalo de tiempo para contemplar las cargas que presentan picos transitorios de corriente. Luego es iniciado el muestreo descrito previamente y es calculada la tensión eficaz en base a las muestras almacenadas de la señal provista por el sensor de corriente. A partir de esta tensión y de la sensibilidad del sensor, es obtenida la corriente eficaz consumida por la carga asociada al NC en cuestión.

El valor de corriente eficaz calculado es compartido con los demás NC del sistema y se emplea para calcular la corriente total consumida en el SGC. Seguidamente, el NC verifica si tiene asociada una carga crítica; si se cumple esta condición, el NC no evalúa si debe desconectarse. Por otro lado, si la carga asociada no es crítica, la corriente total consumida por los NC se compara con el valor de corriente disponible recibido del AC. Si la corriente total consumida es menor, el proceso se repite. Por el contrario, si el consumo total excede la corriente disponible, el NC aplica la siguiente secuencia:

1. Verifica cuál es la prioridad más baja entre todos los NC conectados y cuenta cuántos comparten la misma prioridad que el nodo actual.
2. Determina si el NC en cuestión posee la menor prioridad. Si no es así, mantiene conectada la carga e inicia nuevamente el muestreo. Si tiene la menor prioridad, continúa con el siguiente paso.
3. Comprueba si es el único NC con la menor prioridad. De ser así, guarda el consumo de corriente propio y desconecta la carga. En caso contrario continúa.

4. Compara su consumo de corriente con el de los demás nodos de igual prioridad. Si presenta el menor consumo, desconecta la carga registrando el último valor. De lo contrario mantiene conectada su carga.

Si la carga asociada al nodo está desconectada, corresponde al segundo escenario. En este caso, para decidir la reconexión, el firmware calcula la corriente total de la red considerando el último consumo más un porcentaje adicional como margen de seguridad, y activa la bandera de primera medición. Este margen evita oscilaciones de conexión/desconexión causadas por variaciones pequeñas en la medición o en la corriente disponible. La “corriente total estimada”, que incluye la carga desconectada, se compara con la corriente disponible. Si resulta menor, el nodo reconecta la carga, regresando al primer escenario. Si resulta mayor, permanece desconectada.

Toda la lógica de funcionamiento del firmware del NC explicada anteriormente, queda resumida en el diagrama mostrado por la Figura 5.

3. RESULTADOS

En esta etapa del trabajo se avanzó principalmente en la implementación y validación del hardware de los Nodos de Consumo (NC) y el Agente de Carga (AC), así como en las primeras pruebas de funcionamiento del SGC en condiciones controladas. Es importante destacar que, si bien el AC incluye la interfaz de comunicación CAN, esta parte aún no ha sido implementada del todo, solo se comprobó el envío de mensajes a otro microcontrolador de la firma Texas Instruments (LAUNCHXL-F28377S) que posee dos puertos CAN.

La Figura 6a presenta el AC y el NC construidos. Cabe mencionar que para este último se implementaron cinco dispositivos, a través de los cuales fueron realizadas las pruebas del SGC. Se logró alojar la placa del AC en una caja plástica de 10×10 cm, mientras que para el NC fue utilizada una caja plástica de 5×10 cm. El uso de cajas de embutir para instalaciones eléctricas, responde al objetivo de facilitar el montaje de las mismas.

En la Figura 6b el NC está constituido por dos placas de circuito impreso (PCB) apiladas para maximizar el uso del volumen disponible, la placa inferior posee los circuitos de potencia, de sensado de corriente y acondicionamiento de señal y fuente de alimentación; mientras que la placa superior aloja al ESP32, los LEDs y el selector de prioridad. Esta separación física busca reducir el acoplamiento térmico y electromagnético entre las etapas de potencia y las de control.

Además de facilitar reparaciones y futuras modificaciones (por ej. intercambiar la placa de potencia sin modificar la capa de control).

En la Figura 6b también se muestra la composición interna del AC, donde la distribución de los elementos principales (fuente de alimentación, sensor de tensión, transceptor CAN e interfaz de usuario) ha sido organizada para que el cableado de entrada/salida quede orientado hacia los lados de la caja, simplificando así la conexión a la canalización existente y al bus CAN de la microrred.

Tanto los LEDs indicativos del NC como los pulsadores y el display del AC, fueron montados en la cara accesible de cada caja para que la visualización e interacción de los usuarios con el SGC sean claramente visibles sin abrir la tapa. En el caso del NC el dipswitch para la selección de prioridad de carga, fue ubicado en la placa superior para permitir la configuración manual in situ. Estas elecciones de montaje y accesibilidad facilitan la adaptación del prototipo del SGC a instalaciones existentes.

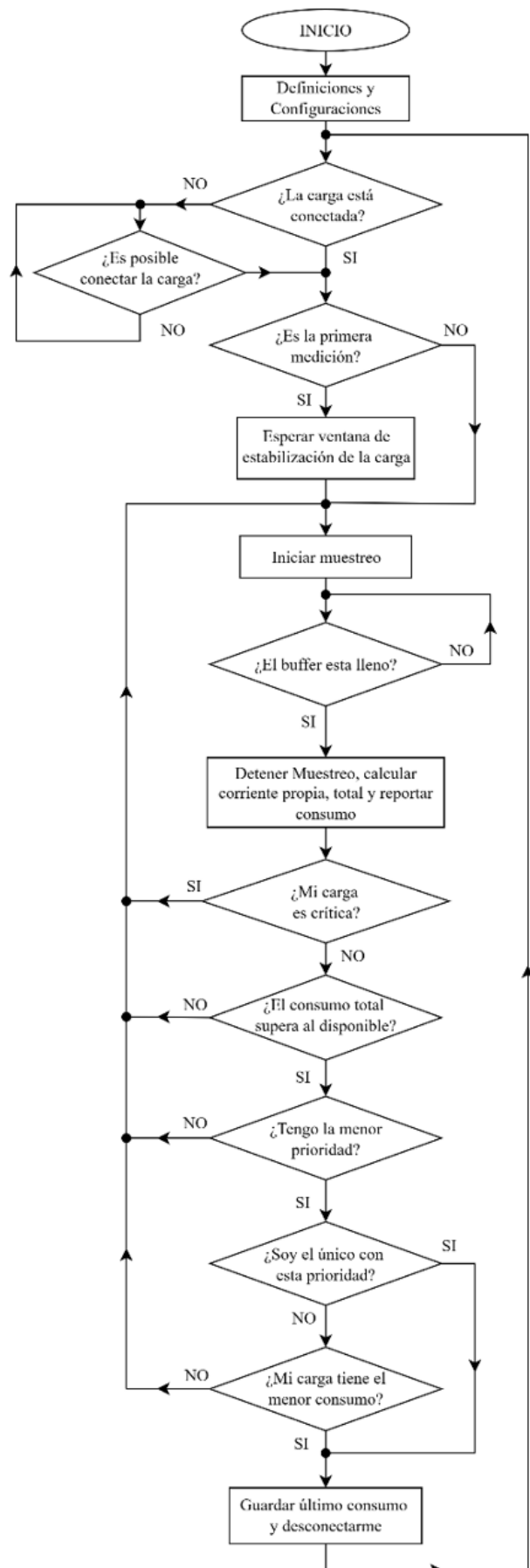


Fig. 5. Diagrama de flujo del algoritmo de decisión del Nodo de Consumo.

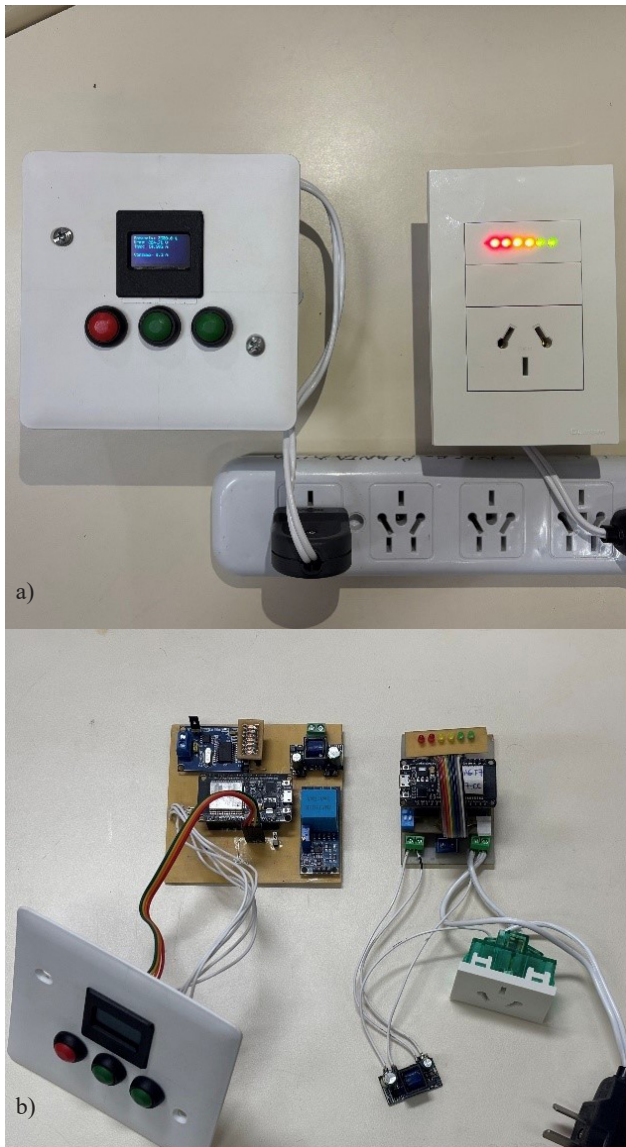


Fig. 6 Agente de Carga (izq.) y Nodo de Consumo (der.) del SGC: a) Vista exterior; b) Vista interior

Las pruebas realizadas estuvieron centradas en el comportamiento de los NC en relación con la medición de corriente, el cálculo de consumos y la lógica de conexión/desconexión de cargas. Para ello, se emplearon cargas tales como: lámparas incandescentes, estufas, pavas eléctricas, entre otras. Esto permitió verificar la respuesta del SGC ante variaciones de cargas de consumo conocido.

Además, con el objetivo de evaluar la robustez del sistema desarrollado, se llevaron a cabo pruebas con cargas no lineales. Estos ensayos permitieron observar que, si bien aparecen variaciones más marcadas en la forma de onda de la corriente, el sistema mantiene la capacidad de detección y cálculo de la corriente eficaz. Esto valida la viabilidad de la solución propuesta frente a distintos tipos de cargas.

La Figura 7 complementa esto último mostrando en una captura de osciloscopio la señal medida con una punta de corriente, para una carga no lineal. La punta fue ajustada a una sensibilidad 100 mV/A, obteniéndose un consumo de 0,477 A de corriente eficaz.

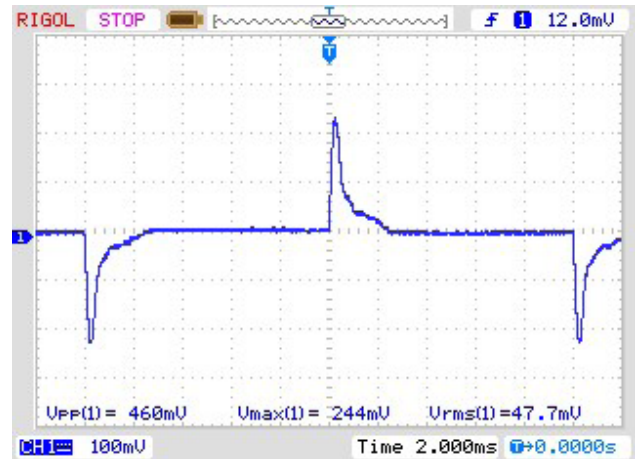


Fig. 7. Tensión obtenida con punta de corriente para un consumo no lineal (fuente de notebook).

El valor de corriente medido efectivamente por un nodo con la carga no lineal de la Figura 7, puede observarse en NC3 de la Figura 8. Esta última muestra los resultados de los ensayos que serán explicados más adelante, pero puede observarse a priori que reporta un consumo de 0,482 A, una diferencia de 5 mA con lo medido a través de la punta de corriente. Esto corrobora el error reducido en la medición de corriente cuando el SGC opera con cargas no lineales típicas en las instalaciones eléctricas actuales.

Para facilitar la visualización y el análisis del ensayo sobre el SGC completo (el AC más los cinco NC construidos), se incorporó un ESP32 adicional que opera como colector pasivo de mensajes. Este dispositivo no participa en la lógica de control distribuido del SGC, solo escucha los mensajes (tanto de disponibilidad del AC como de consenso de los NC) y agrega las mediciones en una base temporal que es publicada en una página web local con el fin de mostrar la interacción de los NC a partir de la disponibilidad de corriente reportada por el AC.

Para evaluar el funcionamiento del SGC, se programaron en el AC tres valores arbitrarios de potencia (4400 W, 3300 W y 2200 W) a modo de simular diferentes disponibilidades para las cargas de la microrred. Con esta información y la tensión medida, el AC calcula la corriente eficaz total disponible y comunica la misma a todos los NC conectados, dando como resultado una variación escalonada de 20 A, 15 A y 10 A aproximadamente. Estos valores de corriente son alternados en forma cíclica a intervalos de 30 s, para verificar como responde el SGC ante estos cambios.

Los NC se configuraron de la siguiente manera:

- NC1: Carga crítica con un consumo de aprox. 4,5 A.
- NC2: Carga no crítica de prioridad baja (aprox. 8,0 A).
- NC3: Carga no crítica de prioridad alta (aprox. 0,5 A).
- NC4: Carga no crítica de prioridad baja (aprox. 4,2 A).
- NC5: Carga no crítica de prioridad media (sin consumo).

En la Figura 8 aparecen los resultados de los ensayos realizados con las configuraciones anteriores. En el mismo puede apreciarse que las cargas fueron conectándose en una secuencia determinada

Gestión de consumos en la Microrred

Corriente Disponible (AC): 10.070 A

Corriente Total (suma de NC): 9.370 A

Nodo de Consumo	Dirección MAC	Corriente (A)	Prioridad	Último mensaje(ms)
NC1	24:71:EC	4.646	0	1567
NC2	24:77:CC	7.998 (Sin Datos)	3	22096
NC3	24:F4:68	0.482	1	722
NC4	2E:D5:50	4.242	3	1466
NC5	A5:0B:A0	0.000	2	987

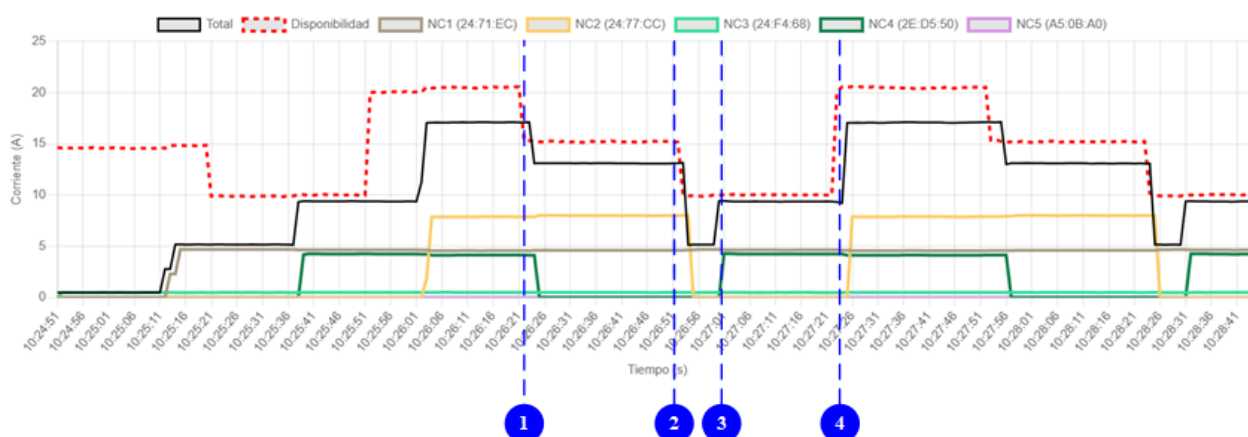


Fig. 8 Visualización en página web (local) de los resultados de la operación del SGC.

para que estuvieran todas conectadas en el momento de mayor disponibilidad, al llegar al instante “1” la disponibilidad para la carga disminuye de 20 A a 15 A, y la carga no crítica de prioridad baja con menor consumo es desconectada (NC4). Luego, en el instante 2, vuelve a reducirse la disponibilidad hasta los 10 A y se desconecta la carga no crítica de prioridad baja restante (NC2); seguidamente, debido a la desconexión de esta última carga queda disponible aproximadamente 5 A de los 10 A totales, por ello en el instante 3 es reconectada la carga no crítica de prioridad baja (NC4). Finalmente, en el instante 4 la corriente total disponible para la carga de la microrred, asciende nuevamente a 20 A y por este motivo la otra carga no crítica de prioridad baja (NC2) es reconectada y el ciclo descrito vuelve a repetirse.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos, puede observarse que la conexión y desconexión de las cargas sigue una evolución que cumple con la configuración establecida para los NC, validando la efectividad de las decisiones de control distribuido tomadas por los mismos. Esto permite decir que el sistema propuesto cumple con la gestión del consumo ante variaciones en la disponibilidad de energía de la microrred, manteniendo siempre energizada a la carga crítica de la misma.

4 .CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado demuestra la factibilidad de implementar un sistema distribuido de gestión de consumo para microrredes basado en agentes. La arquitectura propuesta, integrada por un Agente de Carga (AC) y múltiples Nodos de Consumo (NC), permite estimar y difundir la corriente máxima disponible para uso de las cargas y también posibilita que cada NC tome decisiones autónomas de conexión y desconexión en función de su prioridad y consumo de corriente. Los ensayos mostraron que el sistema opera correctamente frente a perfiles de carga estacionarios y a escenarios con variantes de disponibilidad de potencia impuestas de forma escalonada. En los ensayos, el control distribuido logró preservar el suministro a las cargas

clasificadas como críticas mientras desconectaba aquellas no críticas con menor prioridad, validando así el comportamiento funcional de la estrategia propuesta.

La adquisición de la señal de voltaje para el cálculo de la tensión eficaz mediante muestreo de alta frecuencia y la difusión periódica de la corriente eficaz total disponible a través del protocolo ESP-NOW en el Agente de Carga, constituyen una solución práctica y de bajo costo para la gestión local de la demanda. Los resultados preliminares con cargas no lineales indican que el esquema de sensado y el algoritmo de decisión mantienen la capacidad de detección y control.

Si bien el sistema demostró un funcionamiento adecuado en escenarios con cargas resistivas y no lineales, se identificaron posibles mejoras futuras orientadas a incrementar su eficiencia y adaptabilidad, para lograr que el sistema responda de manera más rápida y anticipada a situaciones de baja disponibilidad de energía en la microrred. Entre las posibles mejoras se destacan:

- En el contexto de la decisión de desconexión de un NC con una prioridad superior a la más baja dentro del conjunto de NC conectados en ese momento, se pretende incorporar una lógica que contemple casos en los que la suma del consumo de las cargas de menor prioridad no sea suficiente para reducir el consumo total por debajo del umbral de corriente disponible. En tales situaciones, se propone que el NC cuya carga represente la siguiente en la línea de desconexión, proceda a desconectarse, aun cuando posea una prioridad superior. Con esto se busca que el sistema evite estar por encima del umbral disponible por más tiempo que mínimo necesario.
- Implementar un mecanismo de coordinación mediante el cual, si una carga de mayor prioridad se encuentra desconectada, por motivos de variaciones en la disponibilidad, pero la misma podría reconectarse en caso de que una carga de menor prioridad se desactive, el NC de mayor prioridad pueda enviar un mensaje

solicitando la desconexión de dicha carga de menor prioridad. Este esquema permitiría garantizar un uso más eficiente de la corriente disponible en función de la prioridad relativa asignada a cada carga.

- Completar la implementación y validación de la interfaz de comunicación mediante el bus CAN, a modo de habilitar la integración plena del Agente de Carga con el resto de los agentes que controlan la microrred y así consolidar el sistema como una red híbrida cableada–inalámbrica para validar el funcionamiento del SGC en condiciones más reales de operación.

- En cuanto a la comunicación en la microrred, se debe continuar realizando pruebas para satisfacer requisitos de calidad de servicio, como ser: latencia, tasa de entrega de mensajes (PDR) y escalabilidad de la red de comunicación ante la inclusión de una mayor cantidad de Nodos de Consumo.

REFERENCIAS

- Adegboyega A. W., Sepasi S., Howlader H. O. R., Griswold B., Matsuura M. and Roose L. R. (2025). DC Microgrid Deployments and Challenges: A Comprehensive Review of Academic and Corporate Implementations. *Energies*, 18 (5).
- Ahmad G., Hassan A., Islam A., Shafiullah M., Abido M. A. and Al-Dhaifallah M. (2025). Distributed control strategies for microgrids: A critical review of technologies and challenges. *IEEE Access*, vol. 13, 60702–60719.
- Alidrisi Y., Ouladsine R., Elmouatamid A., Bakhouya M., El Kamoun N. and Zine-Dine K. (2021). An energy management strategy for DC microgrids with PV/battery systems. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 16 (3), 1285–1296.
- Al-Ismail F. S. (2021). DC Microgrid Planning, Operation, and Control: A Comprehensive Review" in *IEEE Access*, vol. 9, 36154–36172.
- Allan G., Eromenko I., Gilmartin M., Kockar I. and McGregor P. (2015). The economics of distributed energy generation: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, 543–556.
- Altin N., Eyimaya S. E. and Nasiri A. (2023). Multi-Agent-Based Controller for Microgrids: An Overview and Case Study. *Energies*, 16(5), 2445.
- Di Natale M., Zeng H., Giusto, P. and Ghosal A. (2012). Understanding and Using the Controller Area Network Communication Protocol: Theory and Practice (1.^a ed.). Springer Science+Business Media.
- Elmorshedy M. F., Subramaniam U., Mohamed Ali J. S. and Al-makhles D. (2023). Energy Management of Hybrid DC Microgrid with Different Levels of DC Bus Voltage for Various Load Types. *Energies*, 16(14), 5438.
- Kim T-G., Lee H., An C-G., Yi J. and Won C-Y. (2023). Hybrid AC/DC Microgrid Energy Management Strategy Based on Two-Step ANN. *Energies*, 16 (4), 1787.
- Lasseter R., Akhil A., Marnay Ch., Stephens J., Dagle J., Guttromson R., Meliopoulos A. S., Yinger R. and Eto J. (2002). Integration of Distributed Energy Resources - The CERTS MicroGrid Concept. Consortium for Electric Reliability Technology Solutions.
- Lee H., Kang J.-W., Choi B.-Y., Kang K.-M., Kim M.-N., An C.-G., Yi J. and Won C.-Y. (2021). Energy Management System of DC Microgrid in Grid-Connected and Stand-Alone Modes: Control, Operation and Experimental Validation. *Energies*, 14(3), 581.
- Lei Y., Yang F., Ren J., Yang Z., Wang X., Chen Q., Jin X., and Wang S. (2025). Research on a Novel AC/DC Hybrid Microgrid Based on Silicon Controlled Converters and Polarity Reversal Switches. *Sensors*, 25 (6), 1766.
- Li F., Shi Z., Zhu Z. and Gan Y. (2025). Energy Management Strategy for Direct Current Microgrids with Consideration of Photovoltaic Power Tracking Optimization. *Energies*, 18(2), 252.
- Mehigan L., Deane J.P., Gallachóir B. P. Ó. and Bertsch V. (2018). A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems. *Energy*, Volume 163, 822–836.
- Mittal A., Rajput A., Kamya J. and Kandari R. (2022). Chapter 1 - Microgrids, their types and applications. Editor(s): Guerrero J. M., Kandari R. *Microgrids: Modeling, Control and Applications*. 3–40. Academic Press.
- Olivera Fujiwara, E. (2010). Energía y medio ambiente. *Revista Mexicana de Opinión Pública*, nº 9, 51–65.
- Olulope P. K., Odetoye O. A. and Olanrewaju M. O. (2022). A review of emerging design concepts in applied microgrid technology. *AIMS Energy*, vol. 10, nº 4, 776–800.
- Panda M., Chankaya M., Mohanty S. and Sandeep S. D. (2025). State-of-charge-based energy management strategy for hybrid energy storage system in DC microgrid. *IEEE Access*, 13, 77353–77364.
- Shafiullah M., Refat A. M., Haque M. E., Chowdhury D. M. H., Hosain M. S., Alharbi A. G., Alam M. S., Ali A. and Hossain S. (2022). Review of Recent Developments in Microgrid Energy Management Strategies. *Sustainability*, 14(22), 14794.
- Shaukat N., Islam R., Rahman M., Khan B., Ullah B. and Ali S. M. (2023). Decentralized, Democratized, and Decarbonized Future Electric Power Distribution Grids: A Survey on the Paradigm Shift From the Conventional Power System to Micro Grid Structures. in *IEEE Access*, vol. 11, 60957–60987.
- Shuai Z., Fang J., Ning F. and Shen Z. J. (2018). Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 82(3), 3670–3682.
- Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G. and Sokolov D. (2022). Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach. *Applied Energy*, 309, 118487.
- Uddin M., Mo H., Dong D., Elsayah S., Zhu J. and Guerrero J. M. (2023). Microgrids: A review, outstanding issues and future trends. *Energy Strategy Reviews*, 49, Article 101127.
- Urazayev D., Eduard A., Ahsan M. and Zorbas D. (2023). Indoor performance evaluation of ESP-NOW. En *SIST 2023 – 2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies*, Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Zidane T. E. K., Muis Z. A., Ho W. S., Zahraoui Y., Aziz A. S., Su Ch., Mekhilef S. and Campana P. E. (2025). Power systems and microgrids resilience enhancement strategies: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 207, 114953.