

GESTIÓN ENERGÉTICA BASADA EN SISTEMAS MULTI-AGENTE PARA MICRO-REDES EN MODO ISLA

Alfredo Sánchez Silvera

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería Electrónica
Bogotá, Colombia
2020

GESTIÓN ENERGÉTICA BASADA EN SISTEMAS MULTI-AGENTE PARA MICRO-REDES EN MODO ISLA

Alfredo Sánchez Silvera

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Electrónica

Director (a):

Ph.D. José Guillermo Guarnizo Marín

Codirector (a):

Dr (C.) Edwin Francisco Forero García

Ph.D. Davis Montenegro Martínez

Universidad Santo Tomás

Facultad de ingeniería

Maestría en Ingeniería Electrónica

Bogotá, Colombia

2020

Agradecimientos

A Dios que me acompaño y me ayudo a superar las diferentes dificultades que se presentaron a lo largo del proyecto de grado.

A mi familia: en especial a mis padres que me han apoyado durante toda mi vida a quienes admiro y valoro.

A mi Asesor Ph.D. José Guillermo Guarnizo Marín, por su apoyo continua y orientación durante todo el proyecto de grado. Además, me gustaría agradecer al Dr (C.) Edwin Francisco Forero García, por la revisión realizada al documento y por sus valiosos comentarios.

Al Ph.D. Davis Montenegro Martínez por proporcionar información valiosa del software OpenDss-G.

Resumen

Las micro-redes eléctricas han tomado gran importancia en los últimos años debido a los retos que presenta el cambio climático, buscando alternativas de generación eléctrica a partir de fuentes renovables de energía. Las micro-redes brindan ventajas como suministrar energía eléctrica en zonas aisladas o de difícil acceso, facilitando la interconexión con otras micro-redes o eventualmente con la red eléctrica, permitiendo inyectar energía eléctrica a la red o absorber de la misma cuando sea necesario.

Uno de los objetivos más importantes en una micro-red eléctrica es la protección de las baterías que componen los sistemas de almacenamiento, siendo este tipo de baterías de plomo ácido donde descargas muy profundas o sobrecargas pueden afectar el tiempo de vida de la batería, teniendo en cuenta que el transporte de bancos de baterías puede incrementar los costos y el impacto ambiental. Una forma de proteger las baterías es mediante el control del modo de operación con el fin de mantener el balance de potencia en la micro-red.

En este proyecto de grado de maestría se propone el control del modo de operación de un conjunto de micro-redes eléctricas interconectadas entre sí mediante un bus común, pero aisladas de la red eléctrica principal, esto con el fin de proteger la vida útil de las baterías. Para este propósito se propone el diseño de una arquitectura basada en sistemas multi-agente; dado al extenso uso que tiene este tipo de modelos en gestión energética de micro-redes, facilitando su modelado y el diseño de sistemas de control. La tecnología de Sistema Multi-Agente (MAS) tiene muchas propiedades deseables como autonomía, habilidad social, reactividad y proactividad. Es ampliamente aceptada como plataforma tecnológica para implementar procesos de automatización y monitoreo dentro del ambiente de una micro-red. Este documento propone una la simulación de varias micro-redes y un sistema multi-Agente utilizando OpenDSS-G y python. Esta simulación demostrará los beneficios de emplear un Sistema Multi-Agente (MAS por sus siglas en inglés), como una plataforma para estudiar las tecnologías de comunicación, monitorización y control de micro-red en tiempo real.

Palabras claves: Micro-redes eléctricas, sistemas multi-agente, gestión de energía, sistema distribuido.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	V
Lista de figuras	VIII
Lista de tablas.....	X
Lista de abreviaturas.....	XI
1. Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 General.....	3
1.3.2 Específicos	3
1.4 Estado del Arte.....	3
1.5 Principales resultados	6
2. Concepto y diseño	7
2.1 Simulación de las micro-redes.....	7
2.2 Sistemas multi-agentes (MAS).....	9
2.2.1 Arquitectura para Agentes Inteligentes.....	10
2.3 OpenDSS- G.....	11
2.3.1 Modelos de simulación en OpenDSS-G	11
2.3.2 Co-simulación con Python	14
3. Implementación del modelo	17
3.1 Parámetros para las Micro-redes.....	17
3.2 Arquitectura y diseño del Sistema multi-agente (MAS).....	19
3.3 Algoritmo del Sistema multi-agente (MAS)	21
4. Análisis de resultados	25
4.1 Caso de prueba 1: Operación en modo Isla.....	25
4.2 Caso de prueba 2: Interacción entre MG(s)	31
4.3 Caso de prueba 3: Modificación en los perfiles de generación.	39
5. Conclusiones y futuros trabajos	45
5.1 Conclusiones.....	45
5.2 Futuros trabajos.....	46

A. Anexo: Interconexión de interruptores estático (ISS).....	47
B. Anexo: Otros resultados	49
Bibliografía	51

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Micro-redes para estudio de simulación.....	8
Figura 2: Micro-redes modelo de simulación en OpenDSS-G.....	8
Figura 3: Funcionamiento de un agente en su entorno[37].	9
Figura 4: Diagrama de bloques de un sistema PV en OpenDSS-G [40].....	12
Figura 5: Concepto básico del modelo de almacenamiento en OpenDSS-G [41].	13
Figura 6: Simulación de un Generador eólico en OpenDSS-G [39].....	14
Figura 8: Topología de las Micro-redes (MG-i) y Arquitectura de los Agentes.....	19
Figura 9: Arquitectura del Sistema Multi-Angetes (MAS)	20
Figura 10: Algoritmo Agente Fotovoltaico. (MG-1,2,3).....	22
Figura 11: Algoritmo Agente gestión de energía GE.....	23
Figura 12: Algoritmo Agente Eólico.....	24
Figura 13: Resultados de potencia MG-1, para caso de prueba en Isla.	25
Figura 14: Voltaje Carga Ld_1 en la MG-1, para caso de prueba en Isla.....	26
Figura 15: SOC Batería_1 en la MG-1, para caso de prueba en Isla	26
Figura 16: Resultados de potencia MG-2, para caso de prueba en Isla	27
Figura 17: Voltaje Carga Ld_2 en la MG-2, para caso de prueba en Isla.....	27
Figura 18: SOC Batería_2 en la MG-2, para caso de prueba en Isla	28
Figura 19: Resultados de potencia MG-3, para caso de prueba en Isla	28
Figura 20: Voltaje Carga Ld_3 en la MG-3, para caso de prueba en Isla.....	29
Figura 21: SOC Batería_3 en la MG-3, para caso de prueba en Isla	29
Figura 22: Resultados de potencia en la MG-4, para caso de prueba en Isla	30
Figura 23: Voltaje en el bus principal del sistema, para caso de prueba en Isla	30

Figura 24: Resultados de potencia MG-1, para caso de prueba de interconexión.....	32
Figura 25: Voltaje Carga Ld_1 en la MG-1, para caso de interconexión.....	32
Figura 26: SOC Batería_1 en la MG-1, para caso de prueba de interconexión.....	33
Figura 27: Resultados de potencia MG-2, para caso de prueba de interconexión.....	33
Figura 28: Voltaje Carga Ld_2 en la MG-2, para caso de interconexión	34
Figura 29: SOC Batería_2 en la MG-2, para caso de prueba de interconexión.....	34
Figura 30: Resultados de potencia MG-3, para caso de prueba de interconexión.....	35
Figura 31: Voltaje Carga Ld_3 en la MG-3, para caso de interconexión	35
Figura 32: SOC Batería_3 en la MG-3, para caso de prueba de interconexión.....	36
Figura 33: Resultados de potencia en la MG-4, para caso de prueba de interconexión.....	36
Figura 34: Conexión de una micro-red (MG-3) al Bus principal.....	37
Figura 35: Interacción de todas las micro-redes <i>MG-i</i>	37
Figura 36: Resultados de potencia MG-1, para caso de prueba de variación de perfiles.	39
Figura 37: Voltaje Carga Ld_1 en la MG-1, para caso de prueba de variación de perfiles	39
Figura 38: SOC Batería_1 en la MG-1, para caso de prueba de variación de perfiles	40
Figura 39: Resultados de potencia MG-2, para caso de prueba de variación de perfiles	40
Figura 40: Voltaje Carga Ld_2 en la MG-2, para caso de prueba de variación de perfiles	41
Figura 41: SOC Batería_2 en la MG-2, para caso de prueba de variación de perfiles	41
Figura 42: Resultados de potencia MG-3, para caso de prueba de variación de perfiles	42
Figura 43: Voltaje Carga Ld_3 en la MG-3, para caso de prueba de variación de perfiles	42
Figura 44: SOC Batería_3 en la MG-3, para caso de prueba de variación de perfiles	43
Figura 45: Resultados de potencia en la MG-4, para caso de prueba de variación de perfiles	43
Figura 46: Voltaje en el bus principal del sistema, caso de prueba para variación de perfiles	44

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Parámetros de operación en las Micro-redes.	18
Tabla 2: Comportamiento de los Agentes.....	20

Lista de abreviaturas

BESS	<u>S</u> istemas de almacenamiento basado en baterías 'Battery Energy Storage Systems'
Bt_i	Batería
C₁	Carga eléctrica del sistema
DER	Fuente de energía renovable
DSTCP	Protocolo de comunicación de OpenDSS-G
GE	Gestión de energía
IGBT	Transistor bipolar de puerta aislada
ISS	Interconexión de interruptor estático
Ld_i	Carga eléctrica del sistema
MAS	Sistema Multi-Agente
MG	Micro-red
Pe	Sistema de generación eólica
Pld	Potencia de la Carga
Pv_i	Sistema fotovoltaico
SOC	Estado de carga de las baterías
TCP	Protocolo de Control de Transmisión

1.Introducción

Este capítulo presentara la problemática que rodea la idea de investigación y la importancia de desarrollar la actual investigación. También se describirán las metas y objetivos del proyecto. Finalmente se presenta algunas investigaciones en torno al tema y los resultados obtenidos.

1.1 Planteamiento del problema

La comunidad mundial ha reconocido los problemas del calentamiento global y la energía renovable se plantea como una solución prometedora para reducir las emisiones de efecto invernadero. El uso de fuentes de energía renovable presenta un enorme potencial para muchas aplicaciones, y en particular, los sistemas autónomos sin conexión a la red eléctrica tienen muchos beneficios. Alimentar zonas remotas con fuentes renovables implica el uso de dispositivos de almacenamiento debido a la naturaleza fluctuante de la producción de energía [1].

Durante las últimas décadas el consumo energético mundial se ha incrementado y las redes eléctricas han experimentado cambios importantes debido a la influencia de nuevas tecnologías usadas en la planeación del sistema de potencia eléctrica a nivel de generación, transmisión y distribución. Las aplicaciones tecnológicas relacionadas con comunicaciones e informática han dado paso a las redes eléctricas inteligentes conocidas Smart Grid, y contribuyendo a su vez con el desarrollo de las micro-redes eléctricas para ser autónomas.

Una micro-red tiene la facilidad de operar conectada a la red eléctrica o en modo aislado, en cuyo caso se necesita un sistema de almacenamiento de energía para compensar la variabilidad de las fuentes renovables que sean utilizadas. En los casos en los que la micro-red se encuentra aislada, es necesario que alguno de los sistemas distribuidos de energía realice la regulación del bus común, asegurando que la frecuencia, la forma de onda y la tensión pico de la señal alterna del bus posean valores adecuados. Al tener distintos sistemas distribuidos de energía operando en paralelo, se hace posible la cooperación en estos procesos de regulación del bus común en la micro-red, teniendo en cuenta sus condiciones de operación. Esto hace importante la regulación de la energía almacenada en los sistemas de almacenamiento de energía evitando con eso sobrecargas o descargas profundas en las baterías, con el fin de alargar la vida útil de las mismas. Si bien existen trabajos al respecto, estos se orientan en una micro-red [2]–[5], sin atender los casos de distintas micro-redes que si bien están

desconectadas de las redes eléctricas, comparten un bus común permitiendo la gestión energética entre ellas. En estos casos, es posible que una micro-red pueda suplir las necesidades energéticas de otras micro-redes cuyas fuentes renovables no suministren la energía suficiente, y sus sistemas de almacenamiento estén llegando a niveles críticos de descargas.

Teniendo en cuenta lo anterior se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Es viable la gestión de la energía entre distintas micro-redes eléctricas interconectadas entre sí y aisladas de la red eléctrica principal, con el fin de mantener la correcta regulación del bus común y evitando sobrecargas y descargas profundas en las baterías, mediante sistemas multi-agente?

1.2 Justificación

El desarrollo de este proyecto de grado de maestría tiene como objetivo principal el diseño de una arquitectura basada en sistemas multi-agente que permita el control del modo de operación de un sistema de micro-redes distribuidas en un entorno aislado, la cual permita cooperación entre las micro-redes con el fin de mantener un adecuado estado de carga de las baterías que conforman los distintos sistemas de almacenamiento de energía.

Con este proyecto de grado de maestría se busca estudiar el comportamiento de las micro-redes en modo isla, y proporcionar a comunidades aisladas y autoridades la opción de una fuente de electricidad, independiente de la red eléctrica. Esto mediante un modelo simulado de micro-redes interconectadas, la elección del software para el desarrollo del modelo fue OpenDSS-G. Desde esta simulación se aporta un esquema de control del modo de operación de las micro-redes aisladas, que pueda ser usado tanto para comunidades rurales, como para distribución de energía en diversas aplicaciones comerciales y residenciales. Para lograr esto es necesario estudiar y comprender el comportamiento de los sistemas de almacenamiento de energía, que pueden ser bancos de baterías que permitan la conversión eléctrica; los cuales están formados por baterías de plomo ácido que además de representar costos elevados, contaminan el medio ambiente. Dado esto es necesario e importante preservar las baterías con el fin de alargar su vida útil, tanto desde el punto de vista económico como de protección al medio ambiente y para esto es necesario evitar descargas profundas como sobrecargas. Para este propósito existen trabajos en los que se regula el control del modo de operación de una micro-red eléctrica aislada basada en sistemas multi-agente [6], centrándose en una única micro-red, sin tener en cuenta la posibilidad de coordinar distintas micro-redes interconectadas pero desconectadas de la red eléctrica, como puede ser el caso de comunidades aisladas.

La investigación es viable porque se tiene accesos a herramientas de simulación, diversas investigaciones en el área de las micro-redes y datos de escenarios reales para validación del comportamiento de los bancos de baterías. La investigación tiene aportes desde la ingeniería Electrónica, ya que brinda una solución eficaz y optima a las necesidades energéticas, en

términos de diseño, modelado e implementación de equipos y dispositivos en el campo de los sistemas eléctricos y electrónicos.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

- Diseñar una arquitectura basada en sistemas multi-agente que permita la gestión del modo de operación de un sistema de micro-redes distribuidas en un entorno aislado. Con el fin de mantener la correcta regulación del bus común y evitando sobrecargas y descargas profundas en las baterías.

1.3.2 Específicos

- Analizar los modelos teóricos de micro-redes eléctricas que permitan simulaciones de estas.
- Revisar distintos modelos de gestión energética con sistemas multi-agente para micro-redes aisladas.
- Diseñar la arquitectura para el control del modo de operación de micro-redes basadas en sistemas multi-agente, para mantener un apropiado estado de carga de los sistemas de almacenamiento de energía.
- Validar el modelo propuesto mediante simulación.

1.4 Estado del Arte

Las micro-redes eléctricas han presentado un creciente interés dado el auge que han tenido las fuentes renovables de energía (*renewable energy sources* RESs), tales como las fuentes fotovoltaicas (*photovoltaic* PV) y los aerogeneradores eléctricos (*wind turbine* WT). En este panorama las micro-redes eléctricas se presentan como una alternativa para la integración de las RESs, ya que estas pueden operar en modo aislado de la red eléctrica como interconectada a esta misma [7]. Cuando la micro-red se encuentra interconectada, la red eléctrica determina la frecuencia y la tensión del bus común, mientras que las fuentes de energía distribuidas (*distributed energy resources* DERs) pueden absorber e inyectar potencia a la red [8]. Dado esto, la red eléctrica es responsable de mantener el balance de potencia entre la generación y el consumo eléctrico [9].

En el caso de la operación en modo aislado, es necesario usar sistemas de almacenamiento de energía (*energy storage systems* ESSs) con el fin de mantener el balance de potencia entre la generación y el consumo, así como se deben corregir comportamientos impredecibles de las

RESs. Para esto es necesario el control del balance de potencia, el cual es uno de los problemas más complejos en micro-redes aisladas, ya que requiere que al menos una de las unidades DERs (ESSs o RESs) asuma el rol de formación de red (*grid-forming*), convirtiéndose en responsable de fijar la amplitud y la frecuencia de la tensión de la red local [10]. Para esto, dos principales aproximaciones han sido usadas para definir la tensión y la frecuencia de la red local: Maestro único (una unidad en modo de operación *grid-forming*), o multimaestro (distintas unidades conectadas en paralelo trabajando todas en modo de operación *grid-forming*) [8]. En el modo multimaestro la potencia es distribuida entre las diferentes unidades de almacenamiento de energía las cuales operan en modo de operación *grid-forming* [11]. Normalmente en modo de operación aislado las unidades ESSs asumen el rol de *grid-forming*. En este caso las RESs pueden ser integradas a la micro-red en modo seguidor de red, llamado en adelante *grid-following*, como unidades de seguimiento de red usando control para el seguimiento del punto de máxima transferencia de potencia (maximum power point tracking MPPT) con el fin de obtener la máxima potencia posible [12].

Para una operación confiable en una micro-red aislada, es importante definir una adecuada arquitectura de control que permita operaciones coordinadas entre las DERs. Esta arquitectura de control debe considerar la demanda de la carga, la potencia disponible de las RESs y la capacidad de almacenamiento de energía de los ESSs. De hecho, el estado de la carga (SoC) de un ESSs es probablemente el principal factor en la arquitectura de control. Esto se da principalmente para prevenir profundas descargas o sobrecargas de las ESSs, permitiendo con esto prolongar el tiempo de vida de las unidades de almacenamiento de energía, ya que principalmente estas se basan en baterías [13].

La mejor forma de cargar las baterías es mediante un procedimiento de dos etapas. Inicialmente limitando la intensidad de corriente, seguido por una carga constante de tensión. En esta última etapa la tensión permanece constante mientras que la corriente de la batería llega a sus niveles de carga máxima [14], adicionalmente, se recomienda que las baterías sean completamente cargadas después de iniciar sus ciclos de descarga. Dado lo anterior una operación de control de corriente es requerida con el propósito de asegurar una carga apropiada de la batería, implicando con esto que los ESSs deben cambiar su modo de operación de fuente de tensión a carga de potencia. Como consecuencia de esto la operación de las otras DERs debe ser coordinada para asegurar que al menos una unidad asuma la regulación de la tensión y la frecuencia del bus común y para esto, estrategias de coordinación distribuidas que consideran los diferentes escenarios de carga de los ESSs han sido considerados en [15], donde la tensión y la frecuencia del bus AC es utilizada para disparar los cambios en los modos de operación de las DERs. Esta propuesta tiene el problema que cualquier perturbación o ruido puede causar cambios abruptos en los modos de operación, y la tensión y frecuencia deseadas para el bus finalmente no son alcanzadas.

Dado que en años recientes tecnologías basadas en sistemas multi-agente son aplicadas en sistemas de potencia [16], distintos trabajos han utilizado este tipo de arquitecturas en aplicaciones relacionadas con micro-redes eléctricas. Por ejemplo utilizando estrategias basadas en teoría de juegos para integrar la energía producida por redes eléctricas inteligentes [17], con propósitos de integración y resolución de conflictos de intereses alcanzados entre agentes productores y consumidores, y la red de agentes. Una arquitectura basada en sistemas

multi-agente para la gestión y predicción en redes eléctricas inteligentes aplicadas a centrales eléctricas virtuales es presentada en [18], incluyendo un conjunto de agentes embebido combinados con Redes Neuronales para la predicción colaborativa de demandas energéticas desagregadas para usuarios domésticos. En [19] es presentado un algoritmo basado en agentes para la restauración del servicio con almacenadores distribuidos de energía incluyendo detección de fallos, localización y aislamiento. Sistemas Inmunes Artificiales son utilizados como algoritmos de optimización en redes eléctricas inteligentes como se puede encontrar en [20], para asegurar operaciones rentables en el mercado energético. Micro-redes eléctricas han sido modeladas como equipos de agentes cooperativos en [21], donde cada micro-red puede intercambiar potencia con otras micro-redes y la red eléctrica, sin necesidad de un control centralizado. En [22] sistemas multi-agente son usados para la gestión energética y control en una red compuesta por múltiples micro-redes eléctricas. El estándar IEC/ISO 62264 es presentado en [23] para adaptar el control jerárquico y el almacenamiento de energía en micro-redes eléctricas y centrales eléctricas virtuales.

Más específicamente, los sistemas multi-agente han sido usados en aplicaciones relacionadas con el control de la operación en una micro-red eléctrica. Por ejemplo en [24] se propone una estrategia basada en sistemas multi-agente descentralizados, para el control de frecuencia para una micro-red autónoma con restricciones en las comunicaciones. En [25] es presentado un método de control basado en sistemas multi-agente descentralizados para micro-redes aisladas, con una estructura de control de dos capas, siendo la capa baja la de distribución eléctrica, y la capa alta la red de comunicaciones. Un sistema híbrido de control basado en sistemas multi-agente es presentado en [26], para micro-redes inteligentes con el propósito de buscar la seguridad en la tensión suministrada, buscando maximizar beneficios económicos y ambientales. En [27] un sistema multi-agente basado en arquitecturas de coordinación de fútbol de robots con percepción global y control centralizado es utilizado para controlar el modo de operación de una micro-red eléctrica aislada, no obstante el trabajo no contempla la coordinación de múltiples micro-redes interconectadas entre sí.

En [28] se revisó las aplicaciones de sistemas multi-agente en micro-red, desde las operaciones del mercado hasta la protección de micro-red y las reposición de servicios. Arquitectura distribuida, flexibilidad y resiliencia. Las tres ventajas de la arquitectura de sistemas multi-agente son la elección adecuada para modelar la red, especialmente incorporando la expansión de las fuentes de energía renovables distribuidas. En [29] se presentó una prueba de concepto para suavizar la curva de carga utilizando un BESS, por su nombre en inglés 'Battery Energy Storage Systems'. Se propuso un enfoque basado en la lógica difusa en [30] para una mejor utilización de los sistemas de almacenamiento de micro-redes, y en [31] se investigó el impacto del sistema de almacenamiento en el costo operacional de una micro-red típica. La utilización de los beneficios de los sistemas multi-agente fue de un interés primordial en la gestión del almacenamiento de energía de las micro-redes. En [32] se propuso un control basado en el agente del almacenamiento de energía de la batería utilizando múltiples agentes para controlar la salida de los DER. En [3] también se centran en un agente de batería (y sus estrategias de administración de batería) que opera dentro de un marco de administración de micro-red basado en sistemas multi-agente utilizando datos mínimos comunicados entre los componentes (agentes) de la red y sin usar predicción a largo plazo. Todos los trabajos

mencionados no contemplan la coordinación de baterías para múltiples micro-redes interconectadas. En los últimos años se viene realizando investigaciones sobre la gestión de energía, en escenarios donde las micro-redes no están conectadas a la red principal en [33]–[35] se propuso este enfoque basados en sistemas multi-agente para una mejor gestión de la energía. Esta temática se encuentra en un estado reciente y puede generar nuevos enfoques de investigaciones sobre gestión de energía, y la interconexión de micro-redes.

1.5 Principales resultados

Este trabajo ha producido los siguientes resultados de investigación:

- Diseño de una arquitectura para el control del modo de operación de micro-redes interconectadas y aislada de la red, basada en sistemas multi-agente.
- Modelo(s) de gestión energética con sistemas multi-agente para micro-redes aisladas, para un apropiado estado de carga de los sistemas de almacenamiento de energía.
- Resultados de simulación de los modelos desarrollados.

2. Concepto y diseño

En este capítulo se describirán los diferentes softwares que constituyen para la simulación del modelo de pruebas. Primero, se explicará la micro-red implementada en OpenDSS-G. Luego, se introducirá el concepto de Sistema Multi-Agente. Por último, se describirá el software OpenDSS-G y como el software realiza simulación en conjunto con Python.

2.1 Simulación de las micro-redes

En esta tesis se analizará la simulación de cuatro micro-redes. Utilizando un enfoque de agente inteligente, se espera que una micro-red suministre su demanda local de forma independiente; sin embargo, la carga y la intermitencia de la generación pueden provocar un exceso o falta de energía temporal de una micro-red. Se sugiere en la literatura que este problema se puede mitigar almacenando energía en bancos de baterías y/o importando la energía requerida de una o más micro-redes vecinas, después de su acoplamiento temporal [34], [33]. Esta gestión de la energía se puede realizar a través de la implementación de múltiples agentes. El desempeño de la estrategia desarrollada se evalúa mediante simulación en OpenDSS-G /Python.

Para propositos de este estudio el sistema multi-agente es independiente de las arquitecturas de agrupamiento de las micro-redes [33]–[35]. En la Figura 1, se observa el modelo de simulación a realizar.

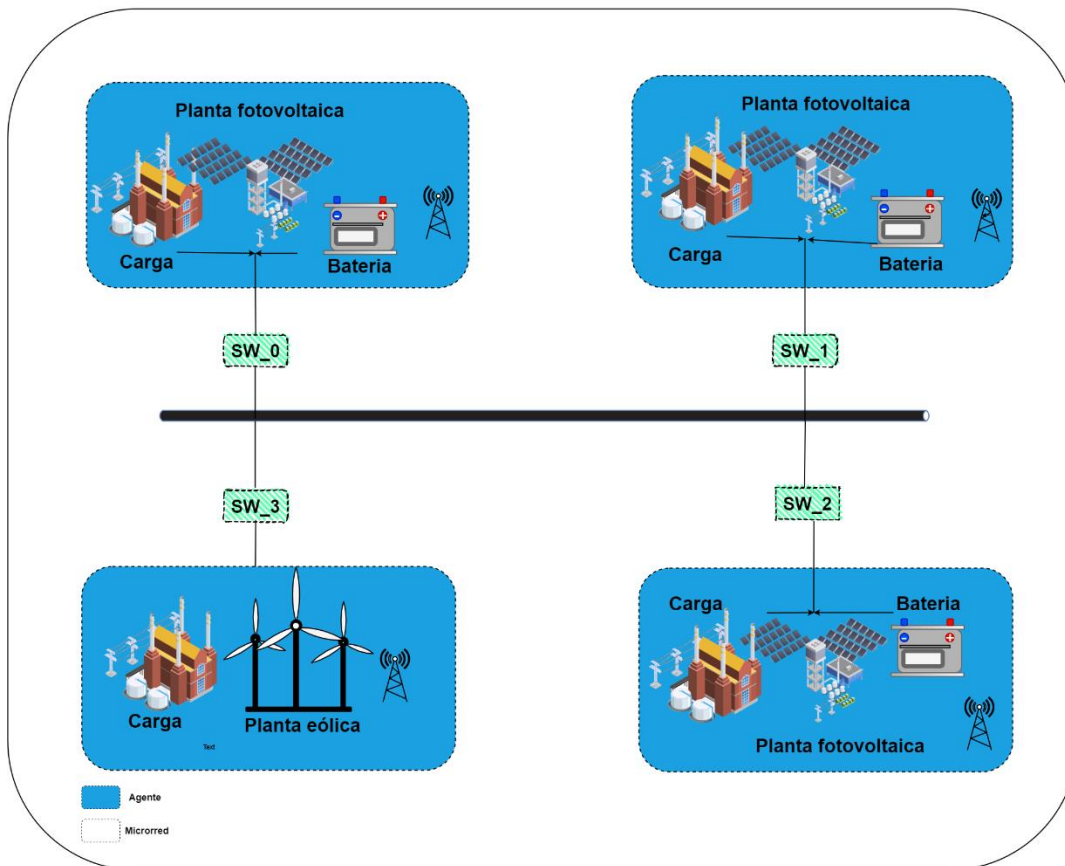


Figura 1: Micro-redes para estudio de simulación.

En la Figura 2, se observa el modelo una vez realizado en OpenDSS-G. En capítulo 3 se tratan más detalles del modelo.

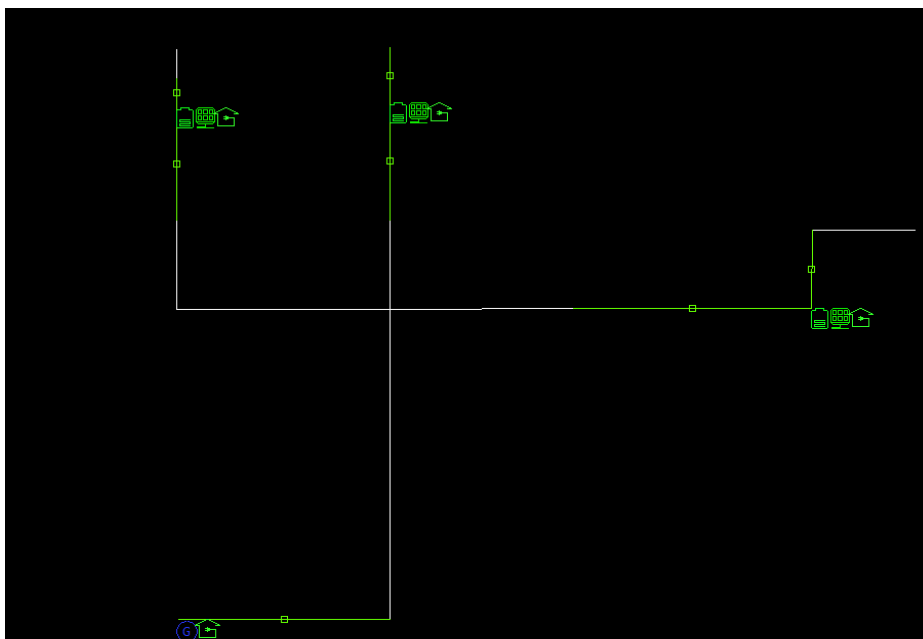


Figura 2: Micro-redes modelo de simulación en OpenDSS-G.

2.2 Sistemas multi-agentes (MAS)

Muchas aplicaciones computacionales utilizan agentes inteligentes en el desarrollo de sus tareas. Actualmente los agentes inteligentes, se utiliza en campos como los sistemas eléctricos, en bases de datos, la inteligencia artificial, redes informáticas, entre otras. Muchas áreas de la ciencia y la ingeniería realizan investigaciones que utilizan la inteligencia artificial para resolver problemas complejos.

“Un agente es un sistema informático que se ubica en un entorno determinado y que es capaz de actuar de forma autónoma en dicho entorno para lograr los objetivos señalados” esta definición está tomada de [36].

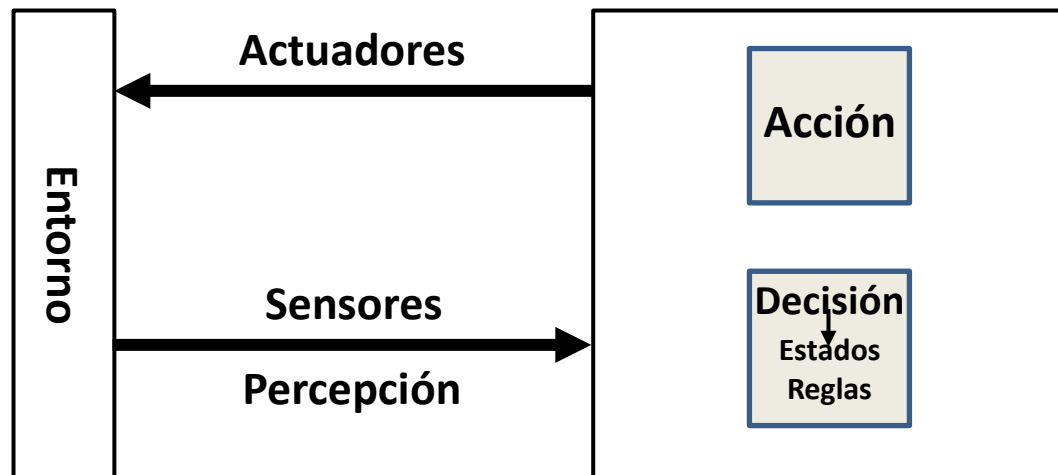


Figura 3: Funcionamiento de un agente en su entorno[37].

Un agente inteligente es una entidad autónoma que monitorea el entorno a través de sensores y actúa sobre él mediante el uso de actuadores. Dirige su actividad al logro de los objetivos del agente. El agente inteligente procesa la información recibida, hace comparaciones con reglas definidas, investiga posibles decisiones y finalmente selecciona la solución apropiada mientras se comunica con otros agentes en un entorno específico. En la Figura. 3 se presenta el funcionamiento de un agente inteligente[37], [38].

En varios casos el agente no tiene un control total sobre el entorno en el que interactúa, es decir, el agente solo tiene el control parcial sobre el entorno y solo puede influir en él. Este tipo de comportamiento no determinista implica que una misma acción puede generar resultados diferentes en el entorno, en circunstancias aparentemente iguales, incluso generando

resultados no deseados. Por lo tanto, los agentes que interactúan en estas circunstancias deben estar preparados para reacciones adversas del entorno.

Para que un agente se considere como un agente inteligente este debe mostrar los siguientes tipos de comportamiento para cumplir con sus objetivos establecidos[36].

- Proactividad: los agentes inteligentes son capaces de presentar un comportamiento dirigido a un objetivo al tomar la iniciativa para satisfacer sus objetivos encargados.
- Reactividad: los agentes inteligentes son capaces de percibir su entorno y responder oportunamente a los cambios que se producen en él para satisfacer sus objetivos encargados.
- Habilidad social: los agentes inteligentes son capaces de interactuar con otros agentes para cumplir sus objetivos de diseño.

2.2.1 Arquitectura para Agentes Inteligentes

Hay cuatro arquitecturas de agentes según su grado de percepción, inteligencia y capacidad, son[36]–[38]:

- Agentes basados en la lógica: en los que la decisión sobre qué acción realizar se realiza mediante deducción lógica.
- Agentes reactivos: en los que la toma de decisiones se implementa en alguna forma de mapeo directo de la situación a la acción.
- Agentes de creencia-propósito-intención: en los que la toma de decisiones depende de la manipulación de estructuras de datos que representan las creencia, propósito e intención del agente.
- Arquitecturas por capas: en las que la toma de decisiones se realiza a través de varias capas de software, cada una de las cuales razona más o menos explícitamente sobre el entorno en diferentes niveles de abstracción.

2.3 OpenDSS- G

OpenDSS-G es la interfaz gráfica del simulador de sistema de distribución de código abierto de EPRI, llamado OpenDSS. Debido a que OpenDSS ha evolucionado hacia un software de procesamiento paralelo OpenDSS V8, se identificó la necesidad de desarrollar una interfaz para evaluar los futuros requisitos de redes inteligentes para estudios de planificación y operación. OpenDSS-G es una interfaz integral para facilitar el uso de las funciones avanzadas de OpenDSS, proporcionando un entorno de desarrollo que imita una sala de control rodeada de herramientas gráficas que pueden ser interpretadas intuitivamente por los usuarios.

La versión original de OpenDSS-G, es DSSim-PC, fue desarrollada como parte del Ph.D. de Davis Montenegro [39]. Inicialmente, había varias versiones de DSSim: -PC, -RT y -MT. La mayor parte del trabajo se realizó en la versión RT para crear un simulador en tiempo real para estudios de distribución e interconexión con equipos externos. El simulador se basó en OpenDSS, que proporcionó todas las matrices utilizadas para el simulador en la versión RT. Debido a que era importante que DSSim-PC fuera fácilmente operativo, se desarrolló una interfaz gráfica [40].

2.3.1 Modelos de simulación en OpenDSS-G

- **Modelo de simulación de planta solar fotovoltaica:** PVSystem es un elemento de conversión de energía que tiene como objetivo replicar el comportamiento de un generador fotovoltaico. La salida del modelo dependerá de la irradiancia solar, la temperatura del panel y la eficiencia del panel y del inversor. Los valores nominales de irradiancia y temperatura del panel pueden modificarse mediante varios multiplicadores, incluida la forma de la carga anual, la forma de la carga diaria y la forma de la carga del ciclo de trabajo. Los principales parámetros se presentan en la Figura 4.

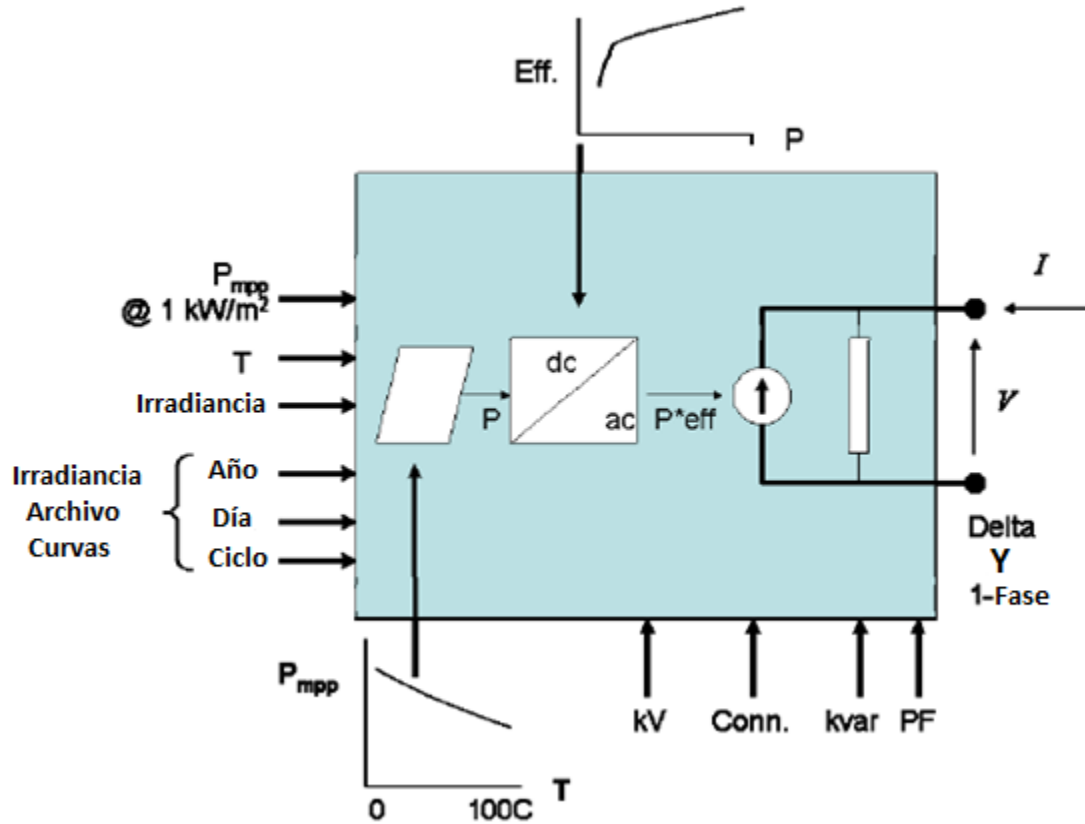


Figura 4: Diagrama de bloques de un sistema PV en OpenDSS-G [41].

Variables de estado: Como otros elementos de conversión de potencia (PC) del programa, el *PVsystem* tiene variables de estado internas que se pueden consultar y observar. Los nombres de las variables actuales son:

1. **Irradiancia:** Irradiancia neta después de aplicar el factor de forma de carga para el modo de simulación actual.
2. **PanelkW:** Es la potencia neta, kW, que sale del panel teniendo en cuenta la irradiancia y la temperatura.
3. **P_TFactor:** factor interpolado de la curva de potencia-temperatura para la presente solución. Esto se aplica a la base P_{mpp} en referencia a la temperatura para calcular los kW del panel.
4. **Eficiencia:** El factor de eficiencia del inversor.

Los datos básicos del modelo son:

1. La variación con respecto a la unidad de P_{mpp} frente a la temperatura por cada $\frac{1 \text{ KW}}{m^2}$ de irradiancia.
 2. La potencia media por panel en $\frac{1 \text{ KW}}{m^2}$ de irradiancia a una temperatura entre 25° y 50 °C.
 3. Una curva de eficiencia característica del inversor. Unidad de eficiencia por unidad de potencia.
- **Modelo de Baterías:** El *Storage Element* o elemento de almacenamiento es esencialmente un generador que puede producir energía (en periodo de descarga) o consumir energía (en periodo de carga) dentro de su capacidad de potencia y su capacidad de energía almacenada. El modelo se desarrolló a partir del modelo del elemento generador. Por lo tanto, ha heredado algunas de las características, como un medidor de energía incorporado. Este elemento de almacenamiento puede actuar de forma independiente o ser controlado por el elemento *StorageController*, o por medio de TCP/IP.

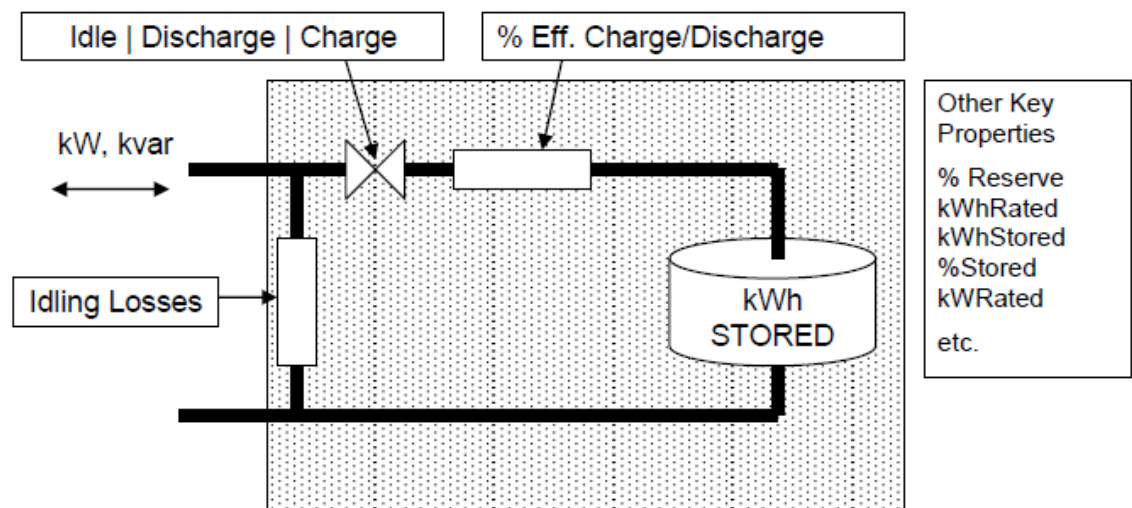


Figura 5: Concepto básico del modelo de almacenamiento en OpenDSS-G, imagen tomada del software [42].

De acuerdo con la documentación del software OpenDSS y artículos [42], se identificaron seis modos de simulación básicos para modelar el almacenamiento. Para la investigación se tienen presente los siguientes modos de simulación.

Modo DEFAULT: Modo por defecto, el estado de almacenamiento se activa para descargar o cargar a la tasa especificada por la curva (Daily, Yearly, Dutycycle) o por el control realizado.

Modo FOLLOW: Modo de seguimiento, la salida de potencia activa (kW) y potencia reactiva (kvar) del elemento de almacenamiento sigue los parámetros de potencia ajustados (KW, Kvar) hasta que el almacenamiento se agota o se completa la carga. El elemento se descarga para valores positivos y carga para valores negativos. Las formas de carga se basan en los valores de kW y kVAr.

Modo EXTERNAL: en este modo, un controlador de almacenamiento externo controla el estado de carga y descarga de la Batería. Este modo se establece automáticamente si este elemento de almacenamiento se incluye en la lista de elementos de un elemento StorageController. Además, este modo de almacenamiento se puede realizar por secuencias de comandos generados desde Matlab, Python o Labview.

Dado que el enfoque de este estudio que es controlar el almacenamiento de las Baterías a través de Python, elegimos el modo externo para controlar el dispositivo de almacenamiento.

- **Modelo para Generador eólico:** En OpenDSS-G, también se pueden modelar un generador eólico, como se presenta en la Figura 6. La turbina eólica se modela como un generador de inducción de jaula de ardilla (SCIG) conectado al circuito de distribución a través de un transformador [43].

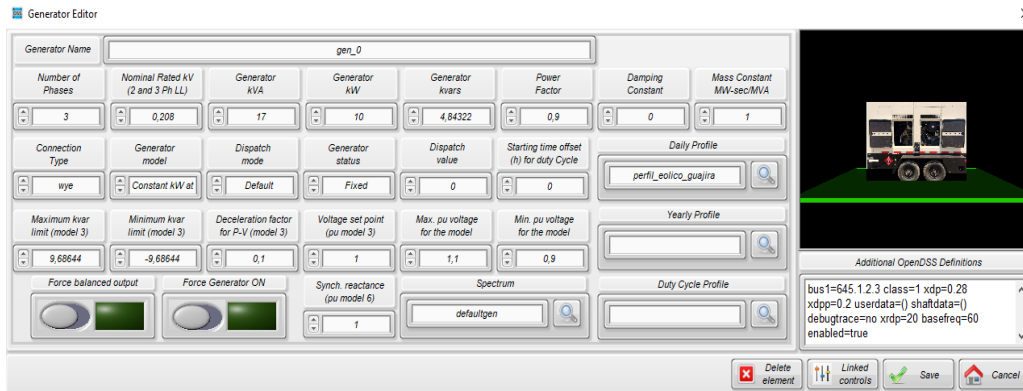


Figura 6: Simulación de un Generador eólico en OpenDSS-G [40].

2.3.2 Co-simulación con Python

En OpenDSS-G, se presenta cuatro componentes principales: el administrador de OpenDSS, la interfaz gráfica de usuario (GUI), el servidor de base de datos y el servidor de Protocolo de Control de Transmisión (TCP). Estos componentes interactúan enviándose mensajes entre sí, organizando y eliminando componentes necesarios para el manejo de datos, lanzando simulaciones, intercambiando datos y manejando las acciones del usuario, entre otras

funcionalidades. La comunicación se maneja con colas para evitar pérdidas de datos cuando varios componentes envían su información.

Cada proceso de OpenDSS es manejado y centralizado por el componente de OpenDSS. Este proceso mantiene la conexión de la simulación con todos los componentes de OpenDSS a través del servidor TCP, incluidos los que están fuera de OpenDSS-G, como las plataformas de co-simulación y sus códigos externos. El protocolo por el cual se realiza la comunicación se llama DSTCP, para conectarse al OpenDSS-G usando una aplicación externa, si está en la computadora local, la dirección IP es 127.0.0.1 (localhost) y el puerto es 6345. Los comandos requeridos para la conexión con aplicaciones externas, están documentados en la interfaz TCP / IP contenida en el manual de OpenDSS-G [40].

- **Python:** Es un lenguaje de programación de código abierto y uno de los más reconocidos dentro de la comunidad de científicos de datos, para esta investigación se trabajó la versión 3.8, que viene instalada en el paquete de ANACONDA.

3.Implementación del modelo

Este capítulo describirá en detalle la implementación de las micro-redes usando OpenDSS-G, los perfiles seleccionados para los escenarios de prueba y el concepto de operación en modo isla. Luego se describirá la Arquitectura del Sistema Multi-Agente (MAS), usando en Python y se explicará el Algoritmo desarrollado para el agente que realiza la gestión de la energía, el agente MG-*i*. También se describirá la interacción de los agentes durante la operación en modo isla.

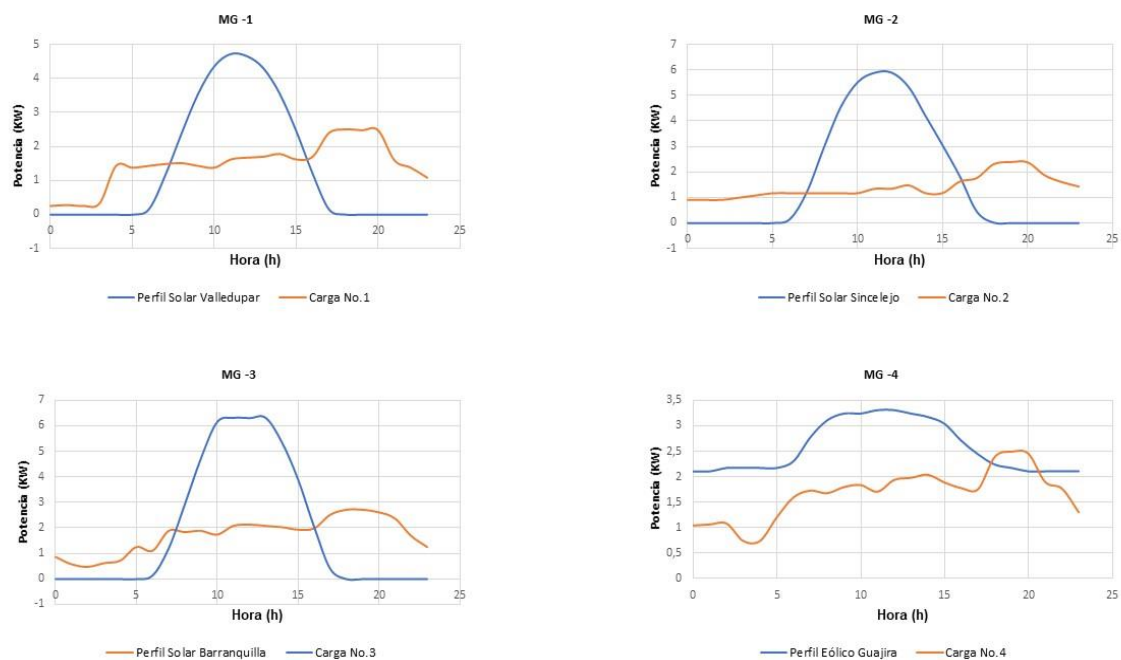
3.1 Parámetros para las Micro-redes.

Para la implementación del modelo de la Figura 1, se toma como micro-red, el sistema conformado por. Paneles solares, Baterías y un tipo de carga (hogar). Este es el caso de las micro-redes 1, 2 y 3. Para la micro-red cuatro, el sistema está conformado por un generador eólico y una carga que simula el consumo de un hogar. Las micro-redes se encuentran interconectadas por medio de un switch a un bus principal, con un voltaje generado por las micro-redes de 120 V AC y frecuencia constante de 60 Hz. El control de los switch se realiza mediante comandos desde Python. Estas estructuras para la interconexión de micro-redes es materia de estudio una opción es mediante Interconexión de switch estático (ISS) [34], [44]. A continuación, en la Tabla 1, se describen los parámetros de potencia para las micro-redes.

Los datos de irradiancia solar, velocidad del viento y demanda de carga, fueron adquiridos y ajustados de [45]–[47]. Los perfiles solares hacen referencias a las ciudades de Valledupar para la MG-1, Sincelejo para MG-2, Barranquilla para la MG-3 y perfil eólico para Guajira MG-4. Con un tiempo de muestreo de una hora durante 24 horas. En las Figura 7, se observa los perfiles obtenidos.

Tabla 1: Parámetros de operación para las Micro-redes.

Variable	Significado de la variable	Valores limites
Pv1	Sistema fotovoltaico de la micro-red 1	$0 \text{ KW} \leq Pv1 \leq 5 \text{ KW}$
Pv2	Sistema fotovoltaico de la micro-red 2	$0 \text{ KW} \leq Pv2 \leq 6 \text{ KW}$
Pv3	Sistema fotovoltaico de la micro-red 3	$0 \text{ KW} \leq Pv3 \leq 6.3 \text{ KW}$
Pe	Sistema de generación eólica	$0 \text{ KW} \leq Pe \leq 3.3 \text{ KW}$
Bt1	Batería 1	$0 \text{ KW} \leq Bt1 \leq 5 \text{ KW}$
Bt2	Batería 2	$0 \text{ KW} \leq Bt2 \leq 7.6 \text{ KW}$
Bt3	Batería 3	$0 \text{ KW} \leq Bt3 \leq 7.7 \text{ KW}$
SOC1	Estado de carga Batería 1	$0.3 \leq SOC1 \leq 0.8$
SOC2	Estado de carga Batería 2	$0.3 \leq SOC2 \leq 0.8$
SOC3	Estado de carga Batería 3	$0.3 \leq SOC3 \leq 0.8$
C1	Carga 1	$0 \text{ KW} \leq C1 \leq 2.5 \text{ KW}$
C2	Carga 2	$0 \text{ KW} \leq C2 \leq 2.4 \text{ KW}$
C3	Carga 3	$0 \text{ KW} \leq C3 \leq 2.7 \text{ KW}$
C4	Carga 4	$0 \text{ KW} \leq C4 \leq 2.5 \text{ KW}$

**Figura 7:** Perfiles de potencia generada y consumida para las Micro-redes (MG-i)

3.2 Arquitectura y diseño del Sistema multi-agente (MAS)

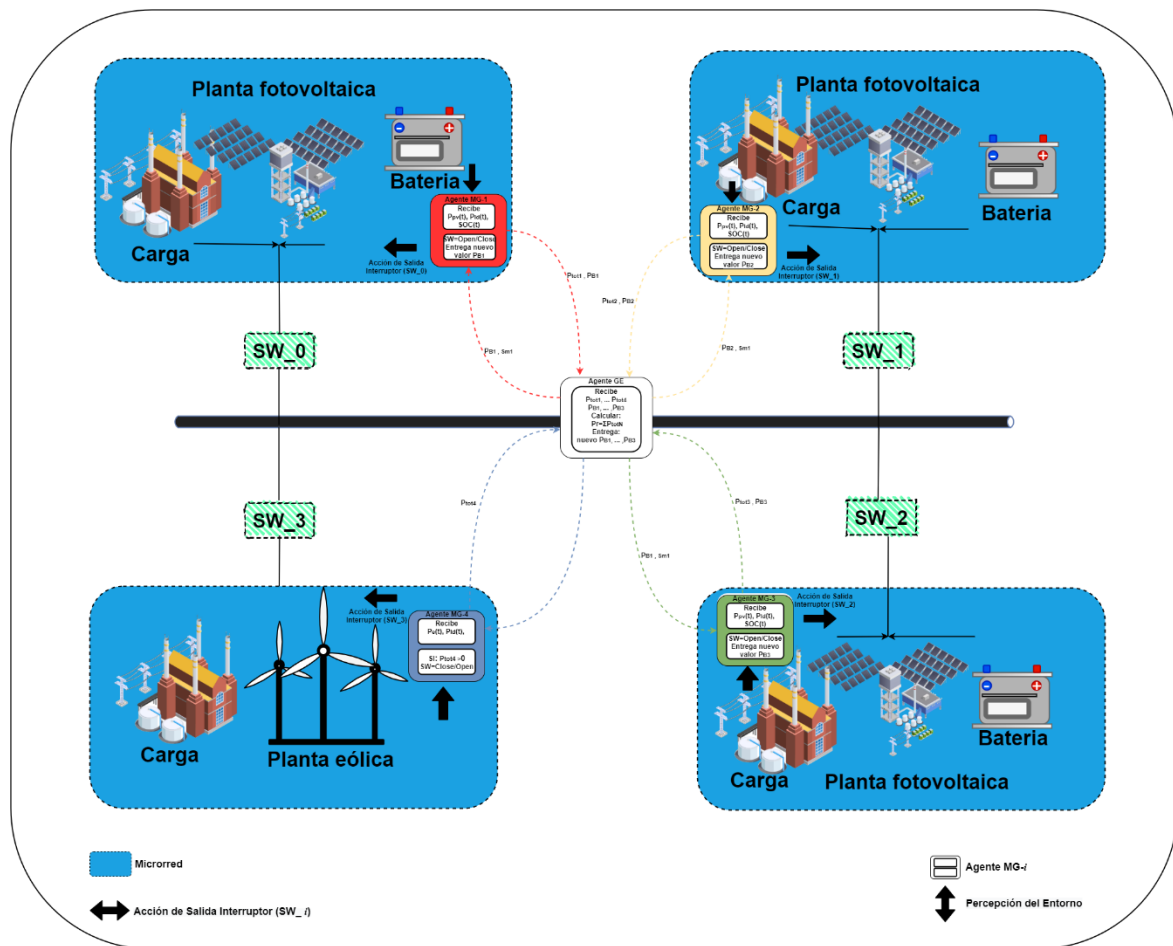


Figura 8: Topología de las Micro-redes (MG-i) y Arquitectura de los Agentes.

En el capítulo 2, se habló sobre el concepto de Multi-Agente y de su arquitectura Figura 3. Apoyados en estos conceptos se organizó el Sistema Multi-Agentes (MAS) de las micro-redes. La arquitectura diseñada está formada por cinco agentes inteligentes uno por cada micro-red y uno en el Bus principal Figura 8. Para describir el MAS es necesario precisar las Percepciones, Acciones, Objetivo, Ambiente y la Acción en la Tabla 2, se describen estos aspectos.

En la Figura 8, se observa que el modelo cuenta con cinco agentes que controlan o monitorean la potencia generada y el estado de las baterías (SOC) de cada micro-red. Estos agentes fueron: el agente MG-1 (Agente Fotovoltaico No1), el Agente MG-2 (Agente Fotovoltaico No2), el Agente MG-3 (Agente Fotovoltaico No3), el Agente MG-4 (Agente Eólico No4) y el Agente GE (Agente Gestión de Energía No5). Los agentes inteligentes del sistema fueron informados sobre el estado de la micro-red a través de monitores instalados, estos pueden asumir el rol de sensores. La topología del sistema de múltiples agentes se presenta en la Figura 8, la forma de comunicación entre todos los agentes es por TCP/IP. Toda la información fue comunicada

entre todos los agentes. Sin embargo, cada agente utilizó solo una parte de esa información, no todas las micro-redes requerían o exportan la misma cantidad de potencia.

Tabla 2: Comportamiento de los Agentes.

Percepciones	Potencia producida y consumida por las unidades de la micro-red (P_v , P_w y SOC), estado de los switch, conexión con las micro-redes, rango de operación de los bancos de baterías.
Comportamiento	Determinar los puntos de operación de los componentes del sistema.
Objetivos	Satisfacer plenamente las demandas de energía, y el estado de carga (SOC) de los bancos de baterías. Con el fin de garantizar una mayor vida útil de las baterías.
Ambiente	Todos los componentes de la micro-red y micro.redes vecinas.
Acción	Apertura y cierre de los switch.

En la Figura 9, se puede apreciar en mayor detalle la arquitectura del MAS. Los agentes Fotovoltaicos (MG- i) tiene el mismo modo de operación estos agentes se conectan con los monitores de potencia de las fuentes de energía renovables, SOC y los consumos de energía de la carga (C_i). Esta información fue utilizada por los agentes No1, No2, No3 y No5.

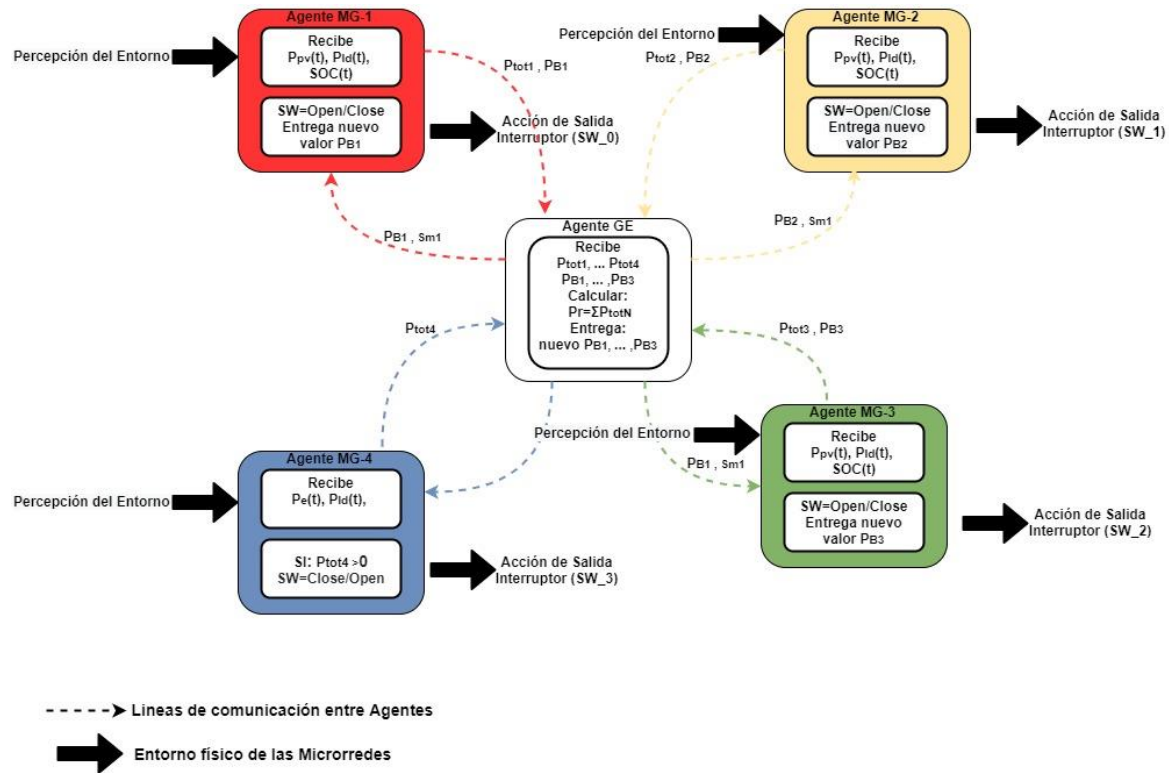


Figura 9: Arquitectura del Sistema Multi-Agents (MAS).

El agente eólico (MG-4), se conecta al bus principal la mayor parte del tiempo para entregar energía excedente, este agente no tiene control para banco de baterías. Tiene autonomía para conectarse al bus si requiere energía. Esta información fue utilizada por los agentes No1, No2, No3 y No5.

El agente GE, este agente realiza gestión de energía toma información de las micro-redes, para conocer la potencia excedente y la potencia actual de las baterías. Envía información para que las micro-redes realicen apertura o cierre de sus interruptores para cargar baterías. Esta información fue utilizada por los agentes No1, No2 y No3.

3.3 Algoritmo del Sistema multi-agente (MAS)

Para el sistema que manipula el agente con los paneles fotovoltaicos presentado en la Figura 10, el algoritmo recibe información de la potencia generada por las DER, la potencia de consumo de la carga y SOC. El primer paso es comparar la diferencia de potencia entre la potencia generada por el panel y la potencia de la carga luego compara el SOC, este debe estar entre el SOC_MIN y el SOC_MAX, para los valores mínimo y máximo de este rango operación (20% - 100%), se tienen en cuenta los trabajados en [33]. Dependiendo del estado de carga (SOC) el algoritmo calcula la potencia total que se está generando en el momento en la MG-*i*, este valor calculado es pasado al agente de gestión de energía (GE) dependiendo del estado de las baterías se le puede indicar al agente de gestión que se necesita cargar o descargar, o mantenerse con la reserva. Si el SOC es mayor al SOC_MAX el agente fotovoltaico no carga batería con el fin de evitar un exceso de carga, caso contrario si es menor indica que requiere energía. Si el SOC es mayor al SOC_MIN, se permite la descarga de la batería, de ser menor la batería no debe seguir descargado esto con el fin de evitar descarga profunda de las baterías ver Figura 10. Después de enviar información al agente de gestión de energía, la información de regreso al agente fotovoltaico es abrir o cerrar su interruptor principal para entregar potencia a la micro-red y condición requerida de la batería (cargar/descargar).

El algoritmo del agente gestión de energía presentado en la Figura 11, es el encargado de generar un balance de energía entre las cuatro micro-redes, permite tener información sobre la cantidad de potencia o excedente que generan las MGs. El algoritmo recibe información de la potencia total excedente de la MG-*i* y la potencia actual de las baterías. Una vez recibida está información realiza el cálculo de la potencia total entregada al bus, de esta potencia se toma un nuevo valor de potencia requeridos por las baterías. Una vez se tiene la información el algoritmo informa al agente micro-red correspondiente que puede abrir o cerrar interruptores para paso de potencia requerida. Este proceso se realiza para las micro-redes teniendo en cuenta el valor actual de potencia en el bus principal.

La Figura 12, describe el algoritmo del agente eólico este algoritmo es más sencillo a los algoritmos anteriores, su objetivo principal es mantener la potencia requerida por la carga No.4, el algoritmo de este agente tiene la autonomía de conectarse al bus principal para entregar energía o para tomar energía requerida. Por las condiciones del perfil la mayor parte del tiempo entrega energía.

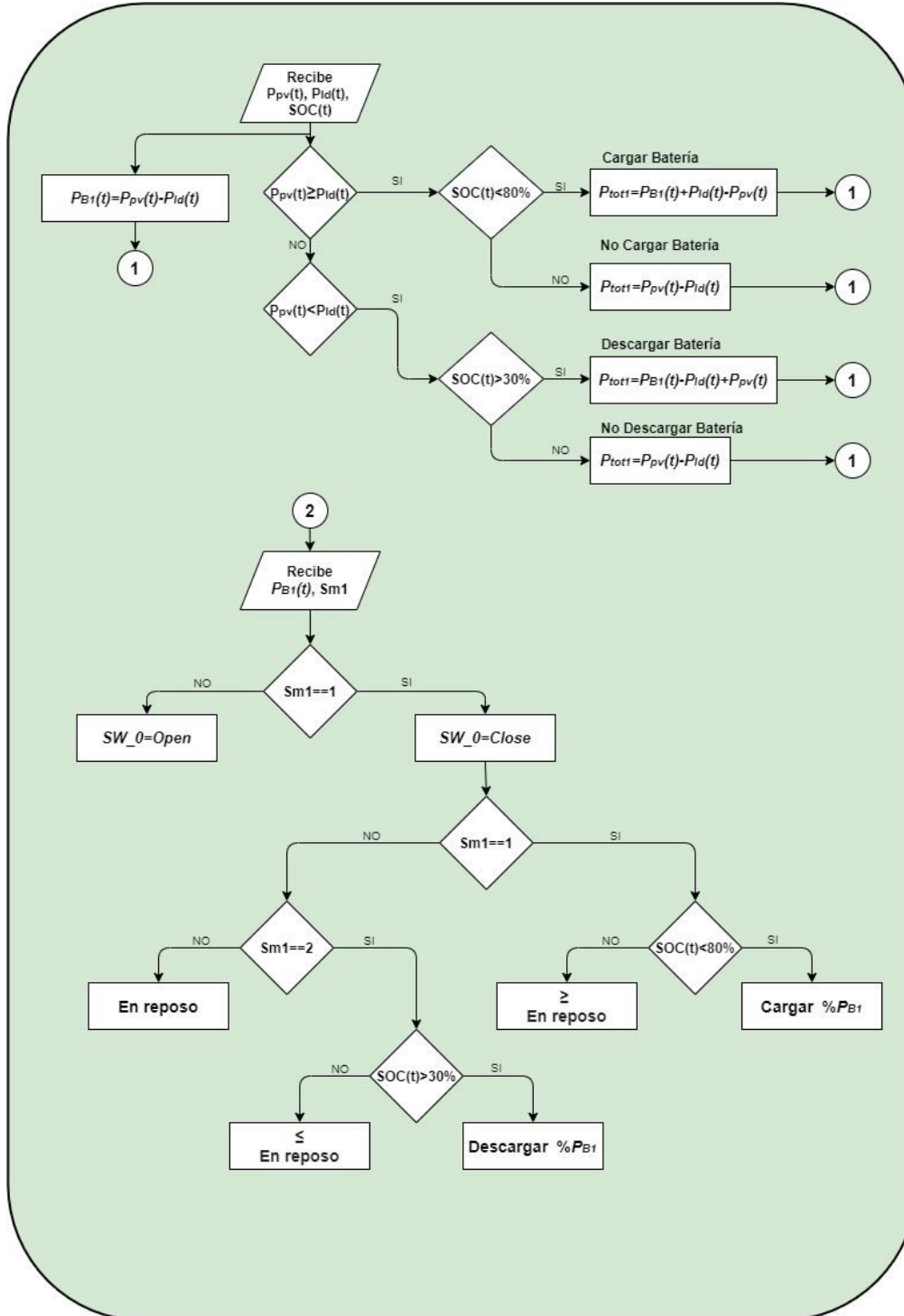


Figura 10: Algoritmo Agente Fotovoltaico. (MG-1,2,3).

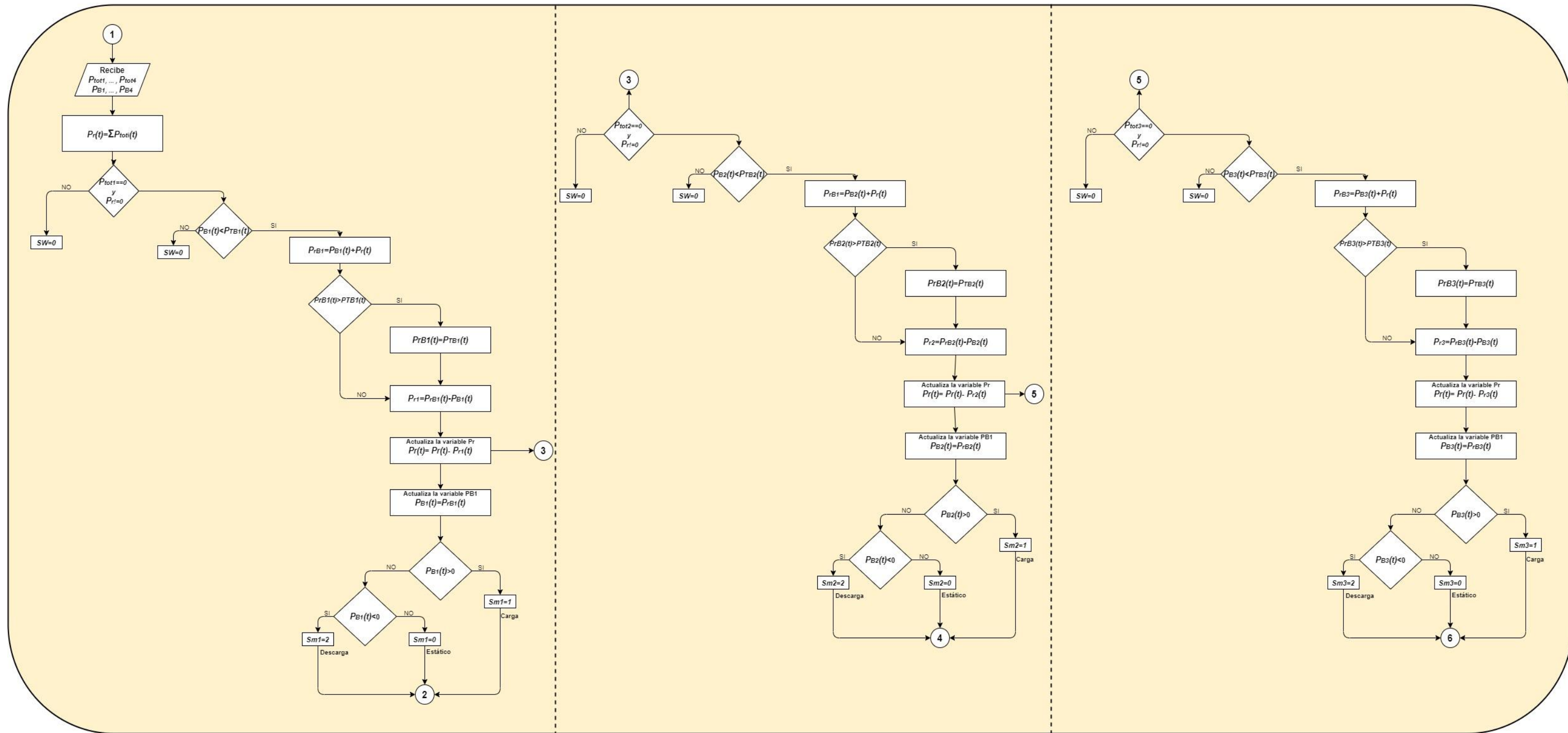


Figura 11: Algoritmo Agente gestión de energía GE.

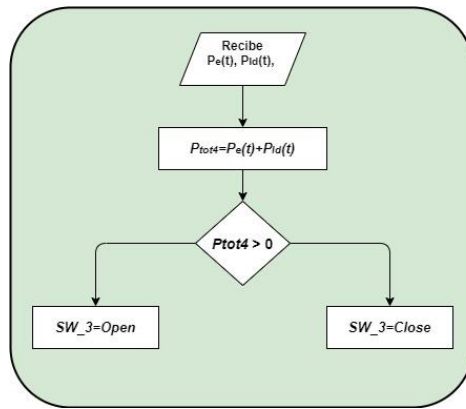


Figura 12: Algoritmo Agente Eólico.

4. Análisis de resultados

Se prueban diferentes combinaciones de DER, Baterías y cargas durante el proceso de gestión de energía. Se realizará la simulación de tres casos para ilustrar en detalle el perfil de carga, el estado de carga de las Baterías y el proceso de despacho de las DER. Estos eventos importantes van acompañados de interruptores Figura 1.

4.1 Caso de prueba 1: Operación en modo Isla

El primer caso ilustra un escenario en la que la energía total producida es mayor que la cantidad total de energía consumida. Este es el escenario ideal para la operación en Isla, en este caso no hay gestión de energía entre las micro-redes. En la Tabla 1 se indica los DER, las baterías y las cargas utilizadas para este caso. Adjunto se observa los perfiles de potencia de las cargas y las potencias de los DER generada, estos fueron tomados de [45]–[47]. El estudio del caso de prueba 1, fue simulado durante 24 horas usando la simulación del circuito de la Figura 1.

Para la MG-1.

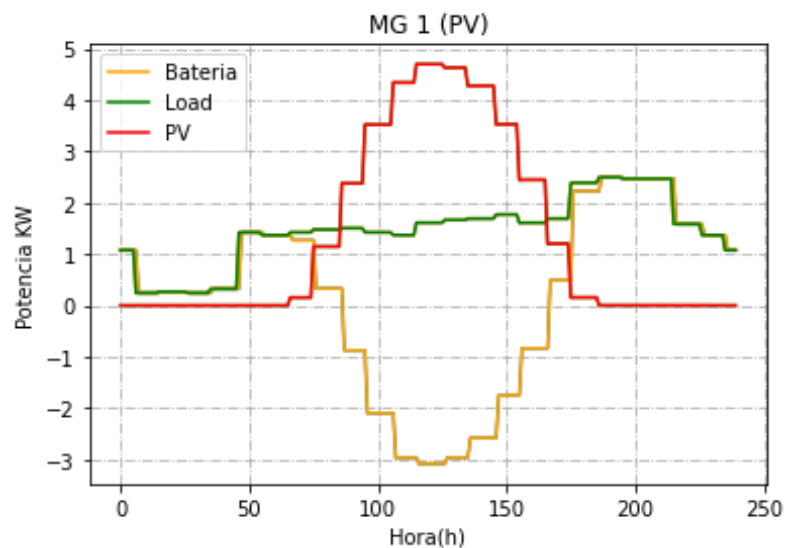


Figura 13: Resultados de potencia MG-1, para caso de prueba en Isla.

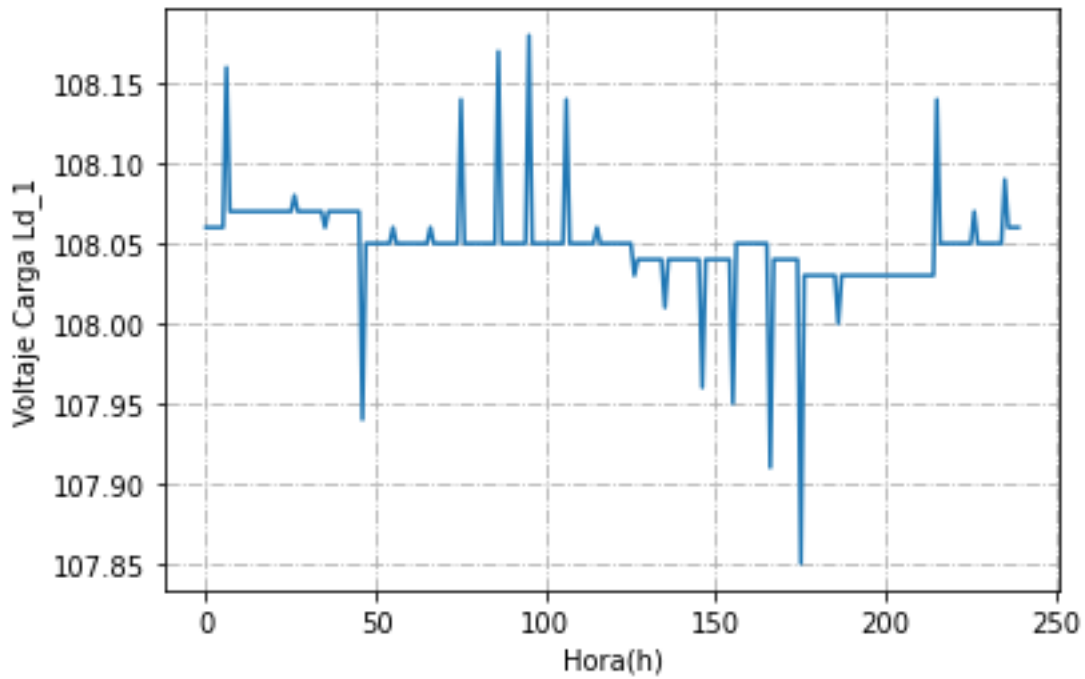


Figura 14: Voltaje Carga Ld_1 en la MG-1, para caso de prueba en Isla.

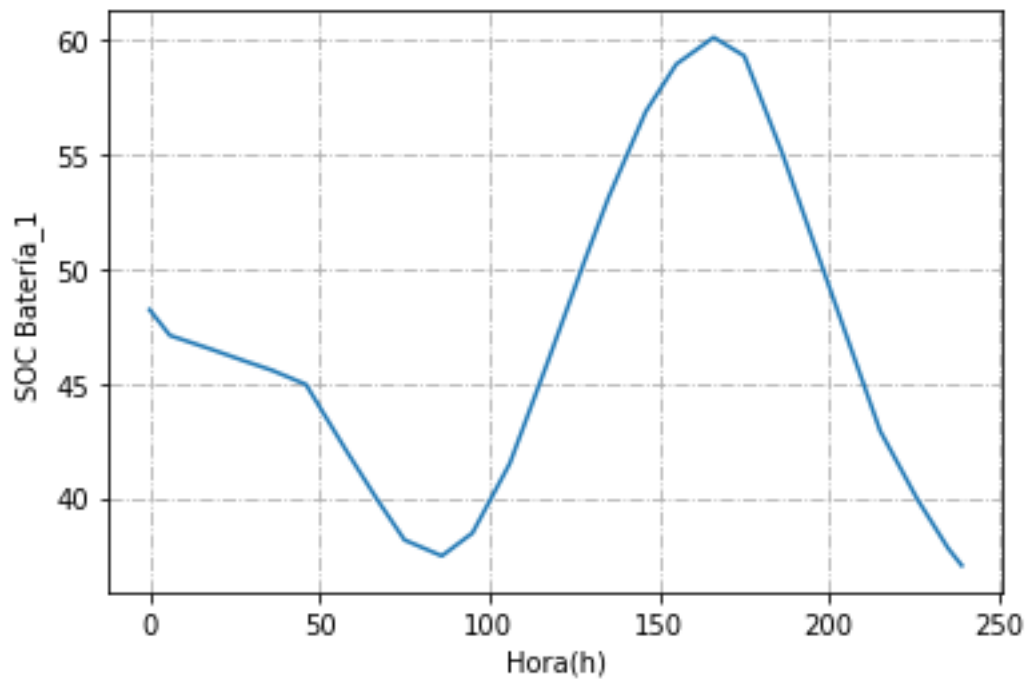


Figura 15: SOC Batería_1 en la MG-1, para caso de prueba en Isla.

Para la MG-2.

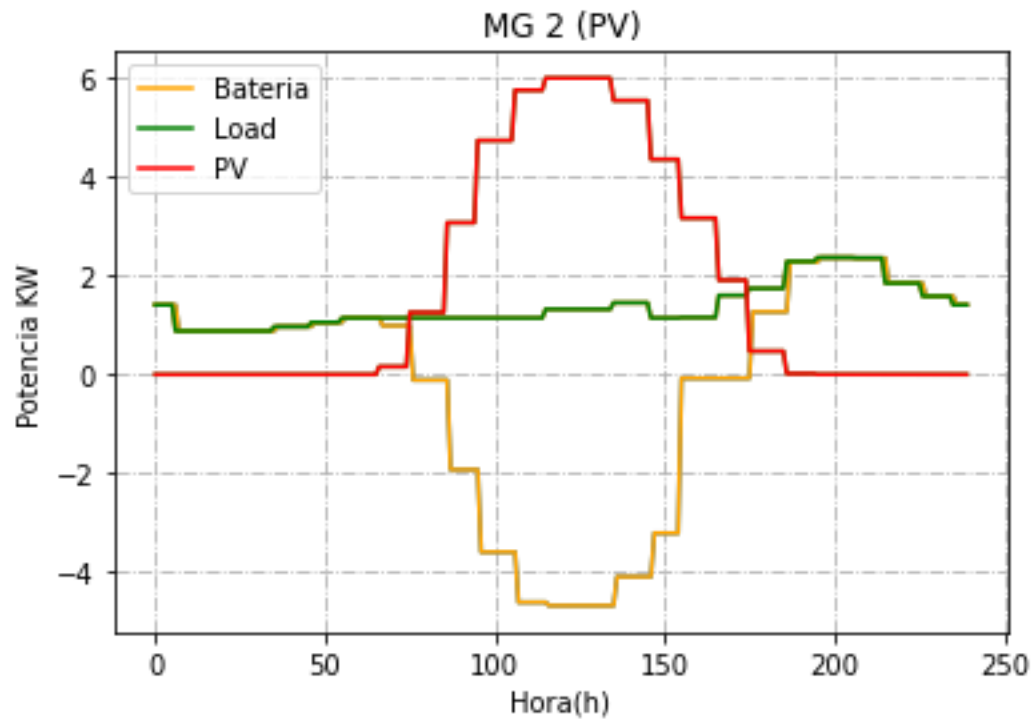


Figura 16: Resultados de potencia MG-2, para caso de prueba en Isla.

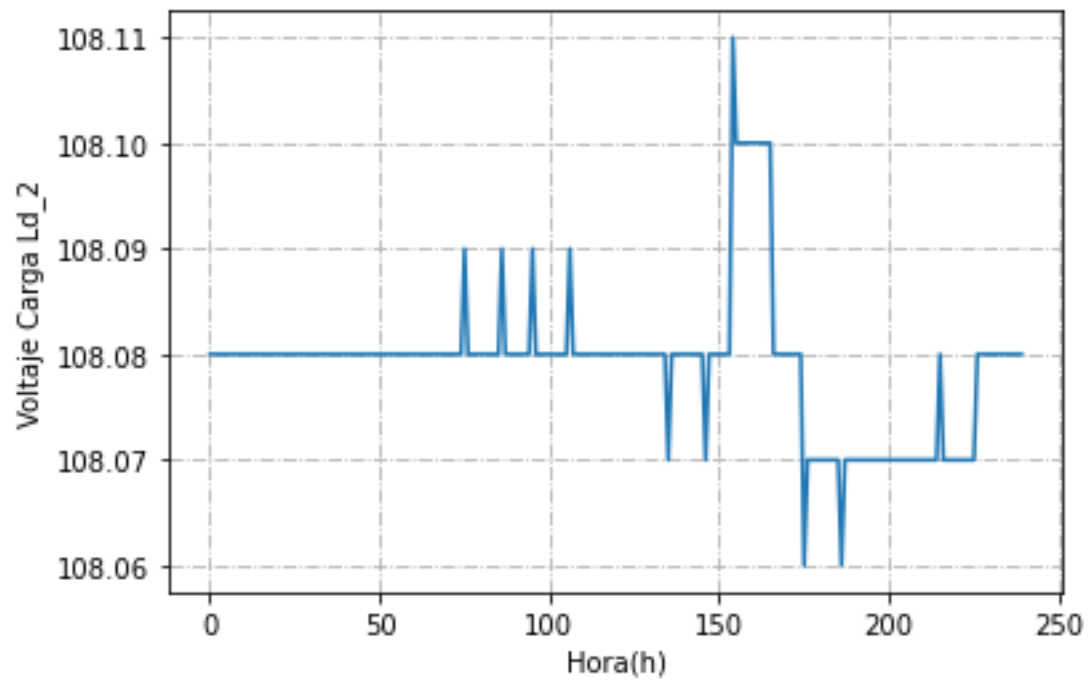


Figura 17: Voltaje Carga Ld_2 en la MG-2, para caso de prueba en Isla.

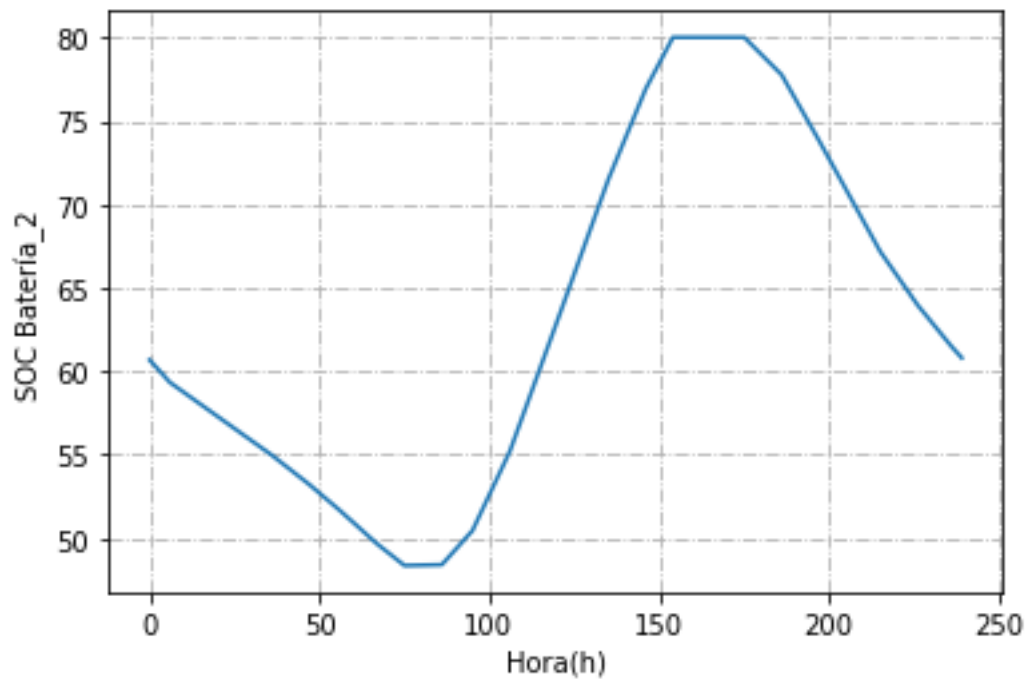


Figura 18: SOC Bateria_2 en la MG-2, para caso de prueba en Isla.

Para la MG-3.

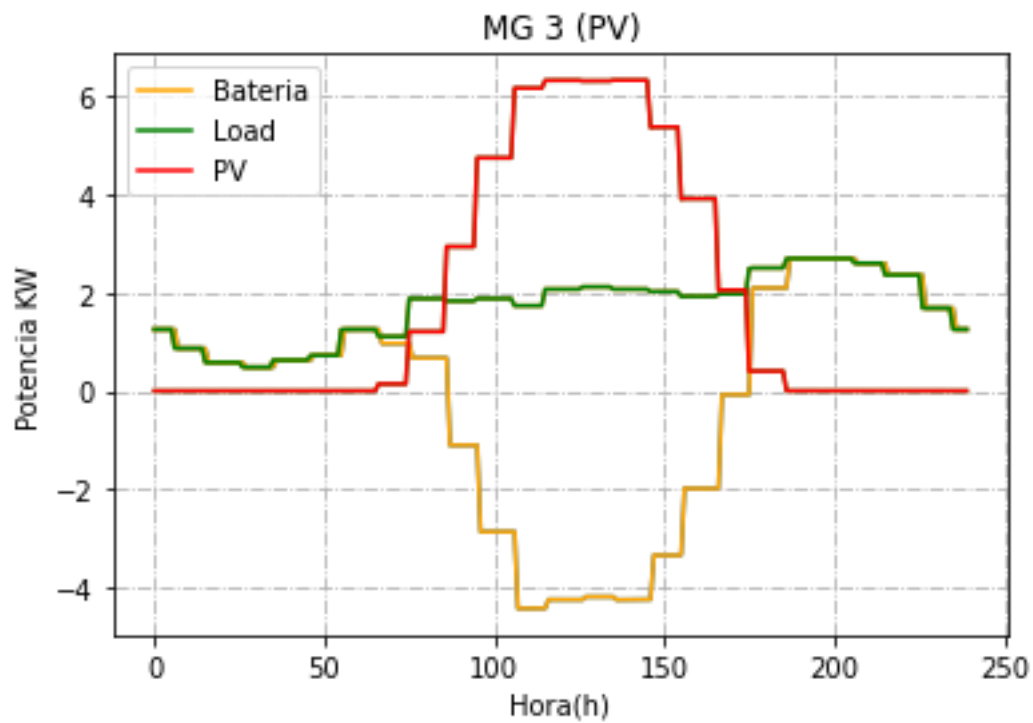


Figura 19: Resultados de potencia MG-3, para caso de prueba en Isla.

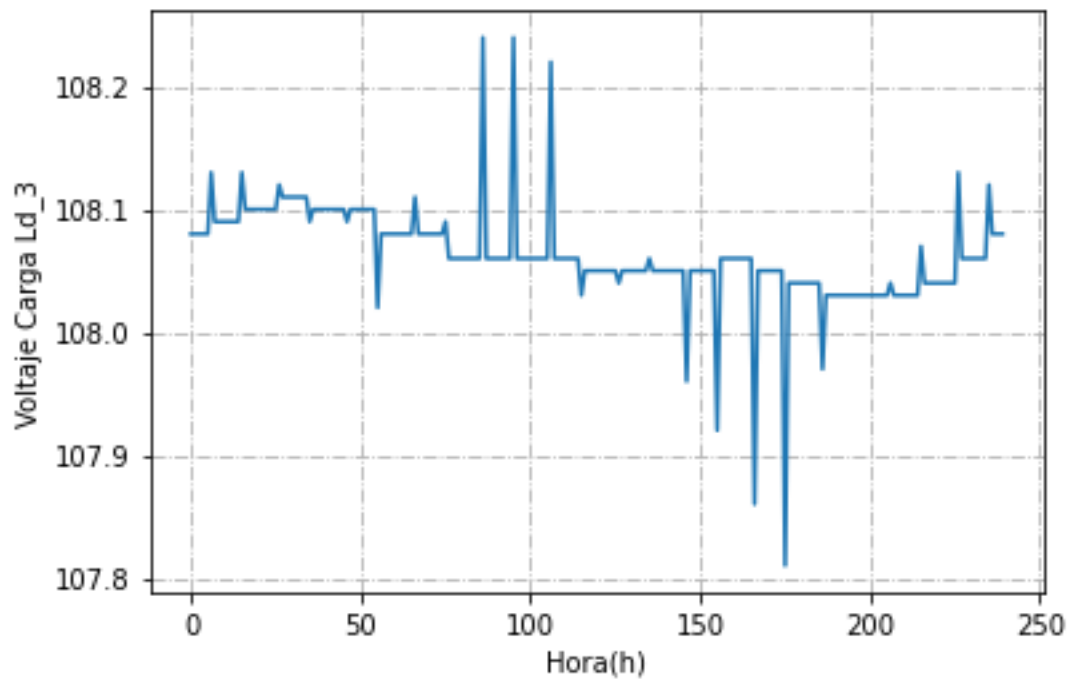


Figura 20: Voltaje Carga Ld_3 en la MG-3, para caso de prueba en Isla.

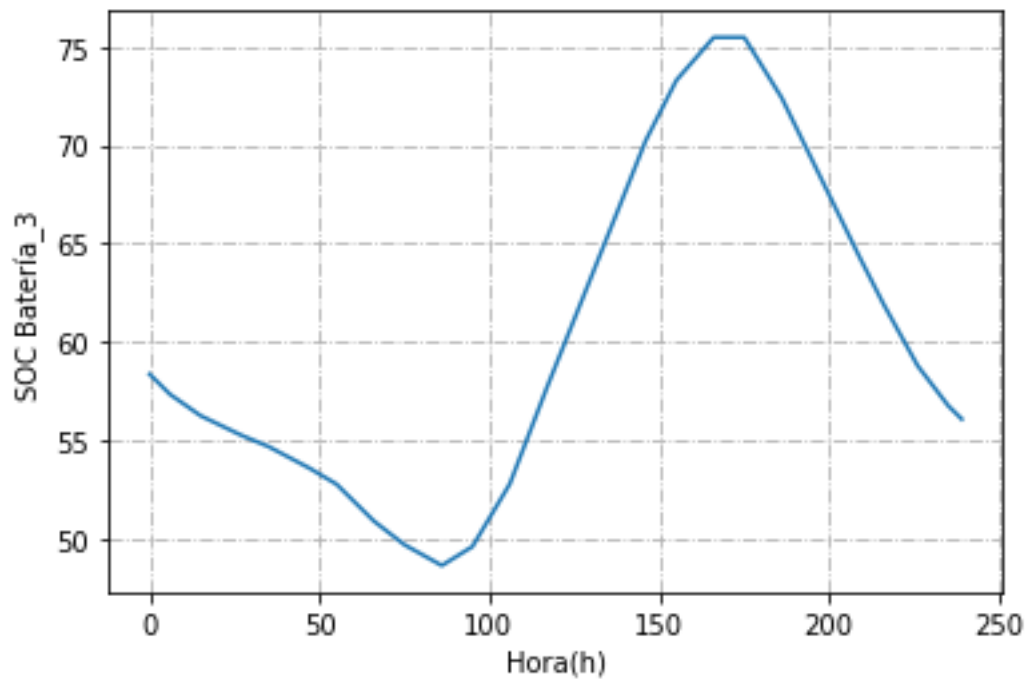


Figura 21: SOC Batería_3 en la MG-3, para caso de prueba en Isla.

Para la MG-4.

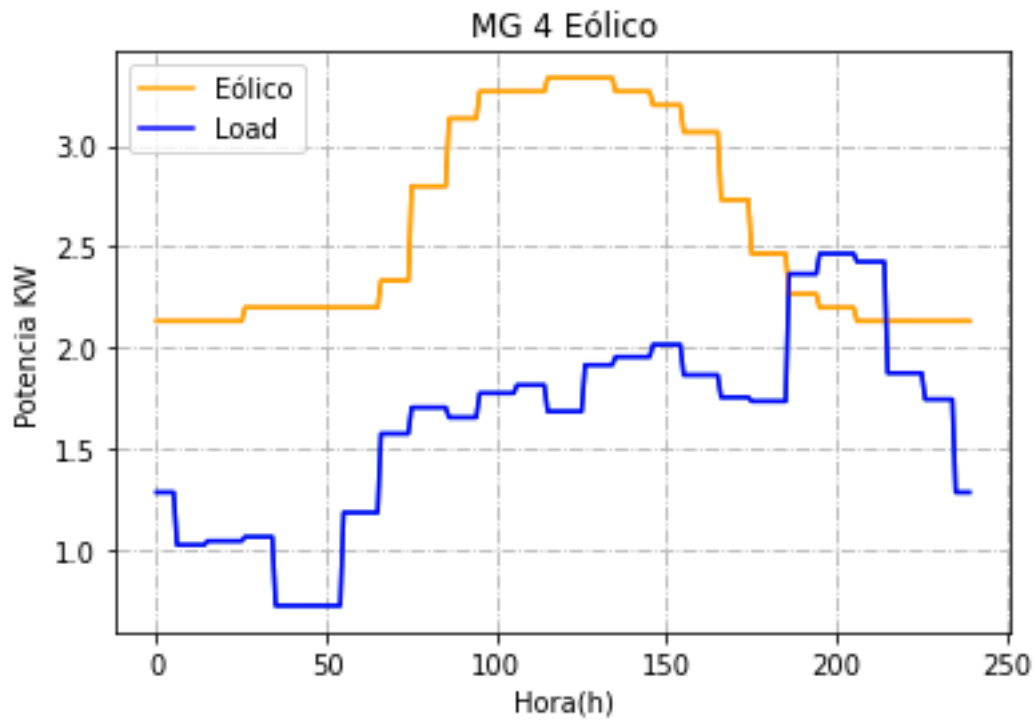


Figura 22: Resultados de potencia en la MG-4, para caso de prueba en Isla.

Voltaje en el Bus principal del sistema.

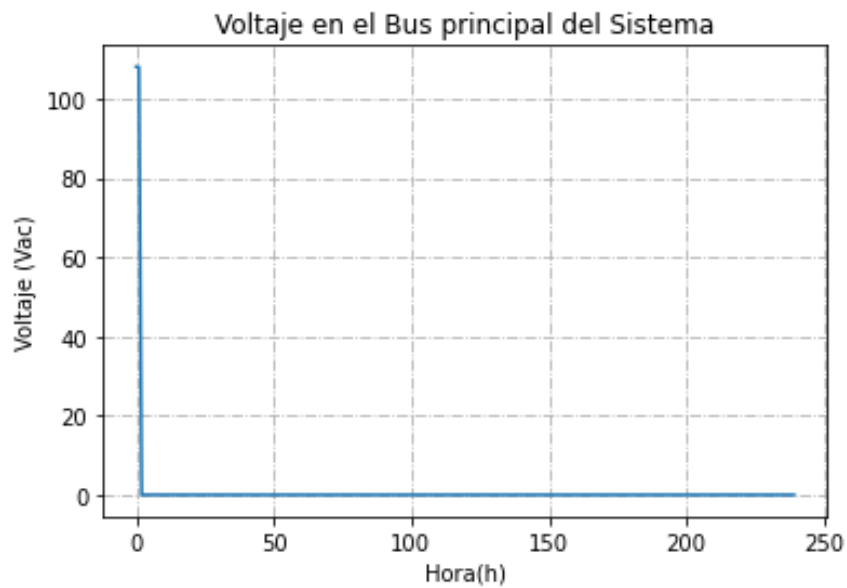


Figura 23: Voltaje en el bus principal del sistema, para caso de prueba en Isla.

Análisis de resultados caso de prueba 1: Operación en modo Isla.

Se tomaron tres resultados por cada una de las micro-redes, la respuesta de potencia de: carga, batería y panel solar. En la Figuras 13, 16 y 19, se observa la respuesta y seguimiento que realizan las baterías para dar respuesta al consumo eléctrico de la carga, en las horas donde los paneles no generan potencia. El comportamiento que tienen las baterías es, para valores negativos están cargado y para valores positivo se descarga. El agente programado para cada micro-red, tiene dentro de sus objetivos que las baterías entreguen potencia de acuerdo al comportamiento del consumo de la carga. En la respuesta de los perfiles de voltaje Figura 14, 17, y 20, se observa que el voltaje sufre variaciones, pero se mantiene dentro del rango de los 108V, a futuro esta variación se puede mejorar para una mayor calidad del voltaje, este tema no está dentro de los objetivos trazados. En las gráficas del estado de carga de las baterías (SOC), Figuras 15, 18 y 21, se observa que las baterías se mantienen entre 30% y el 80% de su capacidad, se puede apreciar en estas graficas que durante las horas 6:00 a.m. hasta las 16:00 p.m. ocurre un incremento en las curvas hasta lograr el máximo de carga permitido esto ocurre en las horas en las que actúa el sistema fotovoltaico. En la Figura 22, muestra los resultados de potencia generada por la fuente eólica y consumo eléctrico de la carga (C_4), está Micro-red (MG), no tiene banco de baterías, abre y cierra el switch (SW_3) de manera autónoma. Por último, la Figura 23, muestra el voltaje en el bus principal 0V al estar las micro-redes en modo isla no hay presencia de voltaje en el bus que interconectada todas las micro-redes.

4.2 Caso de prueba 2: Interacción entre MG(s)

El segundo caso de prueba muestra un escenario en donde hay interconexión de todas las micro-redes; los agentes programados tienen dentro de sus objetivos la apertura o cierre de sus respectivos switches (SW_i), para permitir el paso de potencia hacia el interior o exterior de la micro-red. Como en el caso de prueba anterior en la Tabla 1, se indica los DER, las baterías y las cargas utilizadas para este caso. Adjunto se observa los perfiles de potencia de las cargas eléctricas y las potencias de los DER generada, estos fueron tomados de [45]–[47]. El estudio del caso de prueba 1, fue simulado durante 24 horas usando la simulación del circuito de la Figura 1.

Para la MG-1.

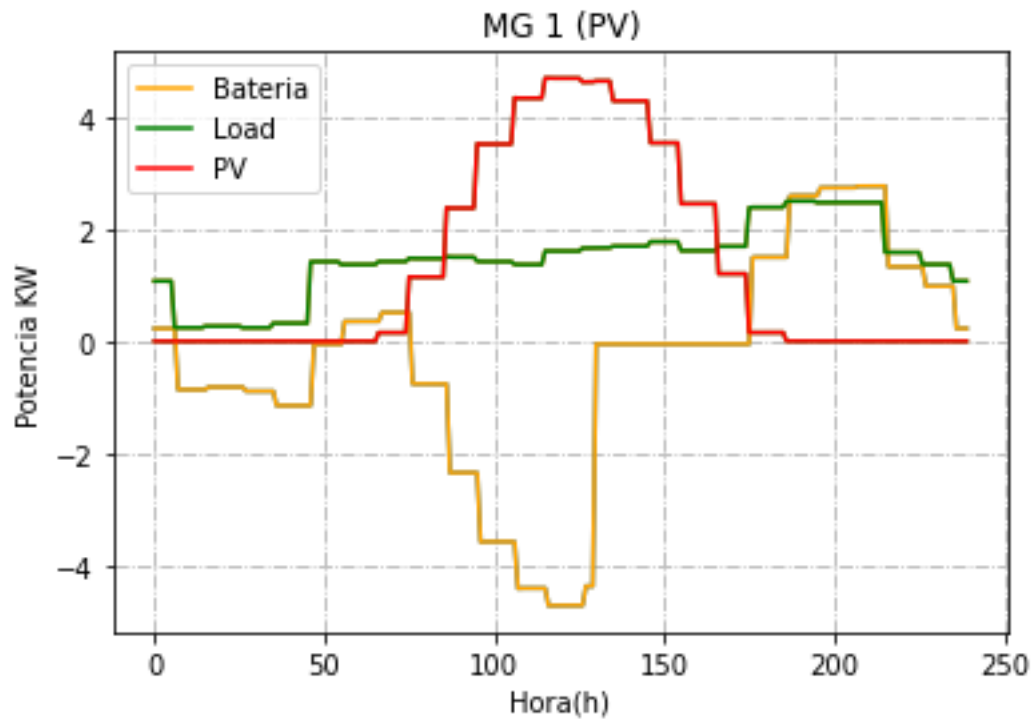


Figura 24: Resultados de potencia MG-1, para caso de prueba de interconexión.

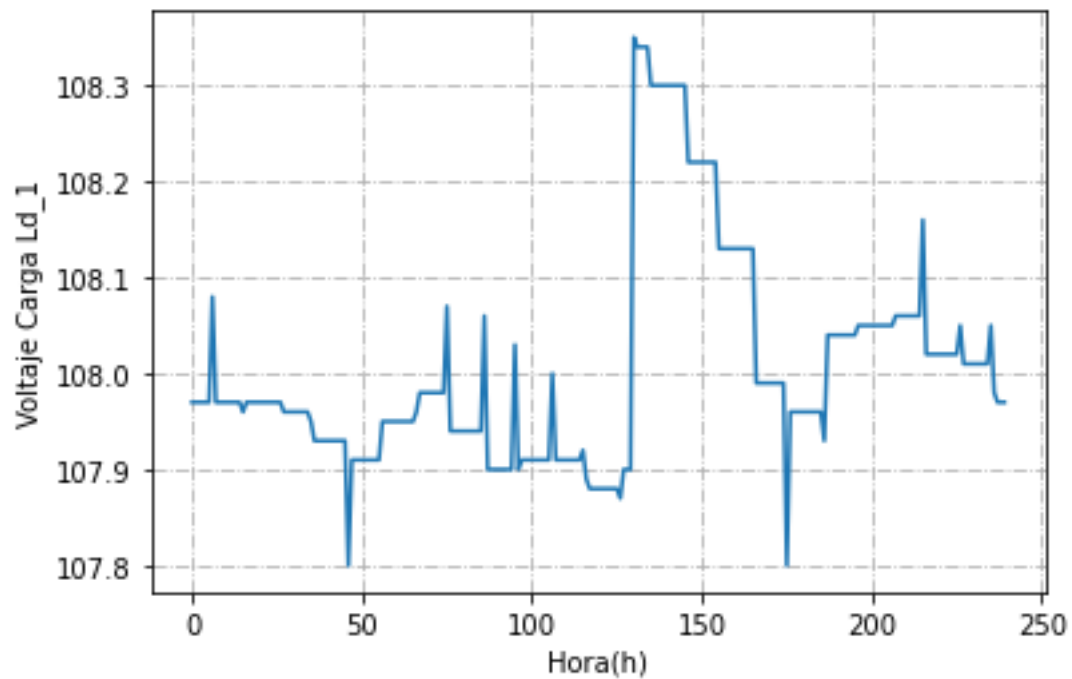


Figura 25: Voltaje Carga Ld_1 en la MG-1, para caso de interconexión.

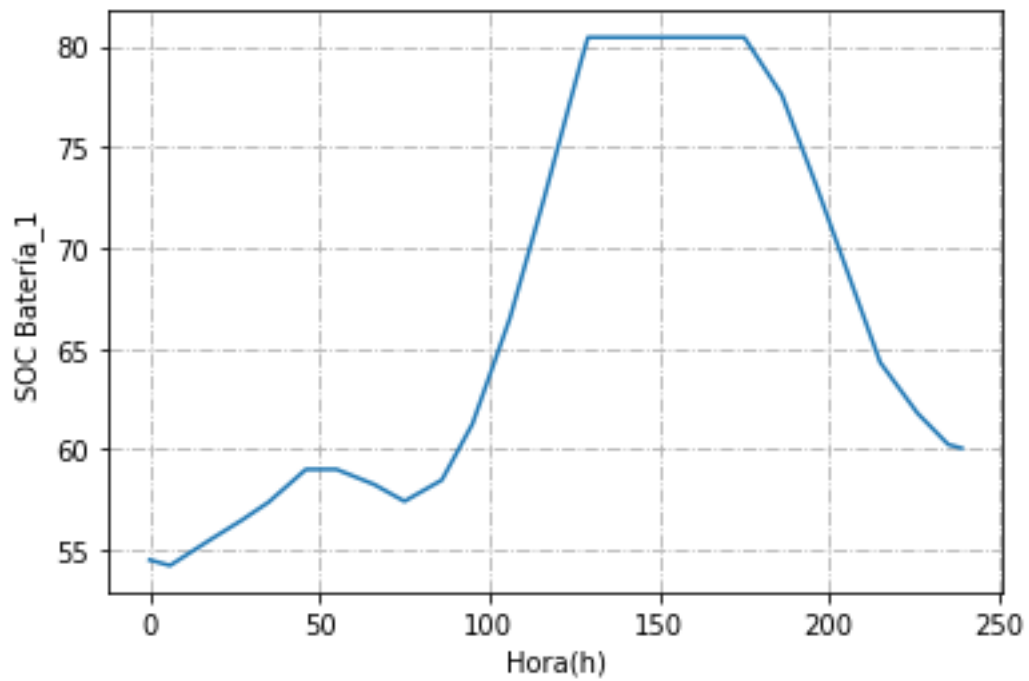


Figura 26: SOC Batería_1 en la MG-1, para caso de prueba de interconexión.

Para la MG-2.

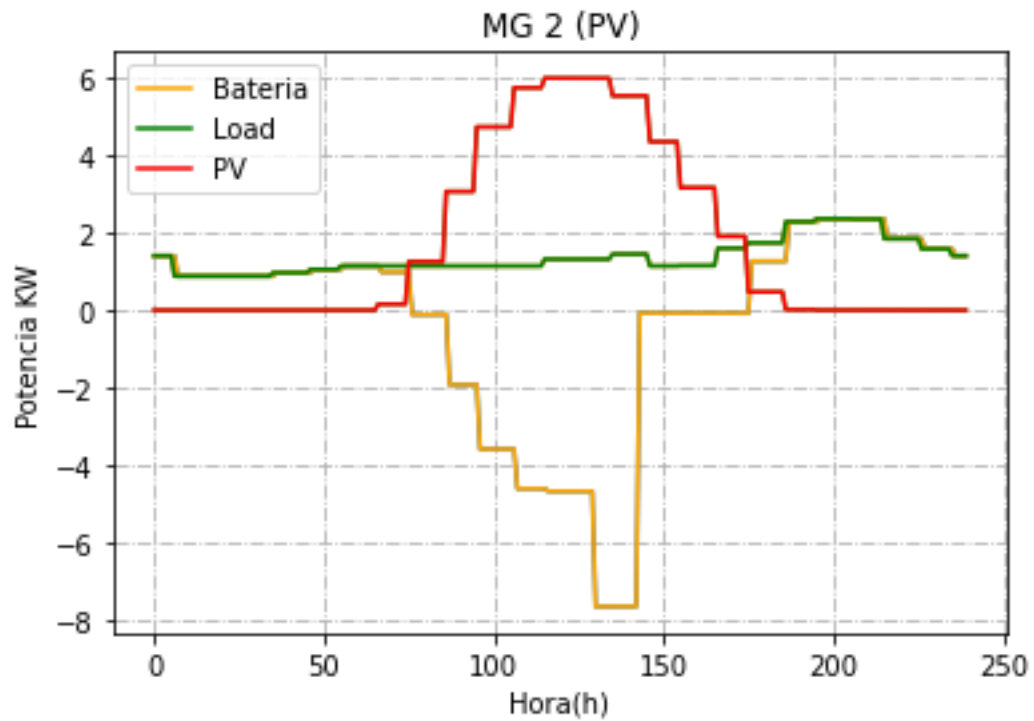


Figura 27: Resultados de potencia MG-2, para caso de prueba de interconexión.

Para la MG-3.

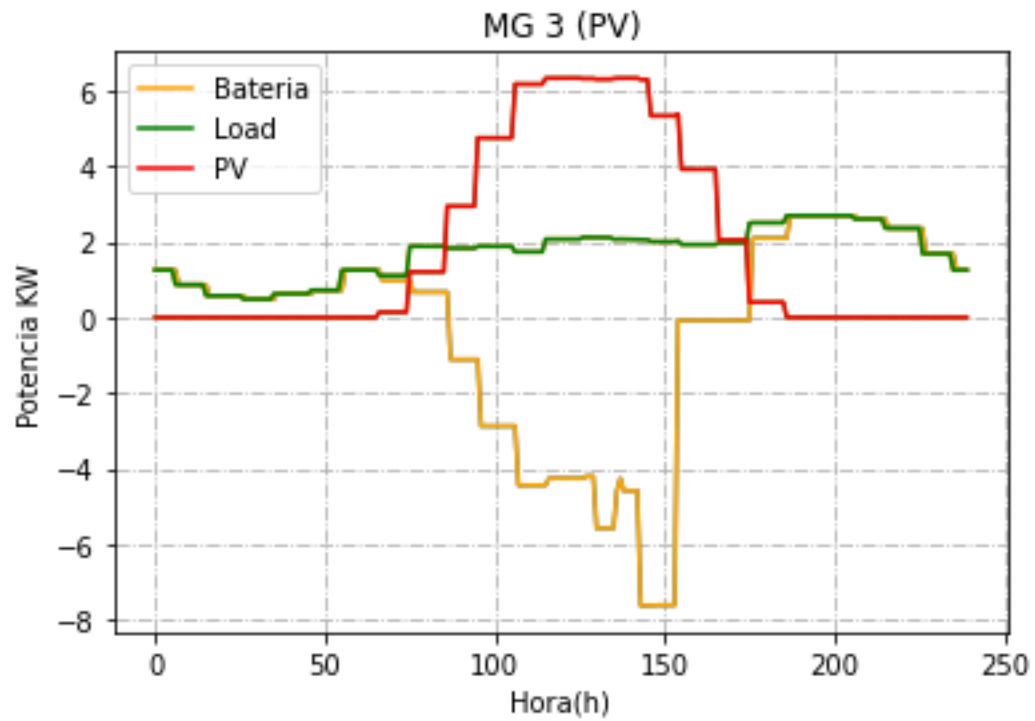


Figura 30: Resultados de potencia MG-3, para caso de prueba de interconexión.

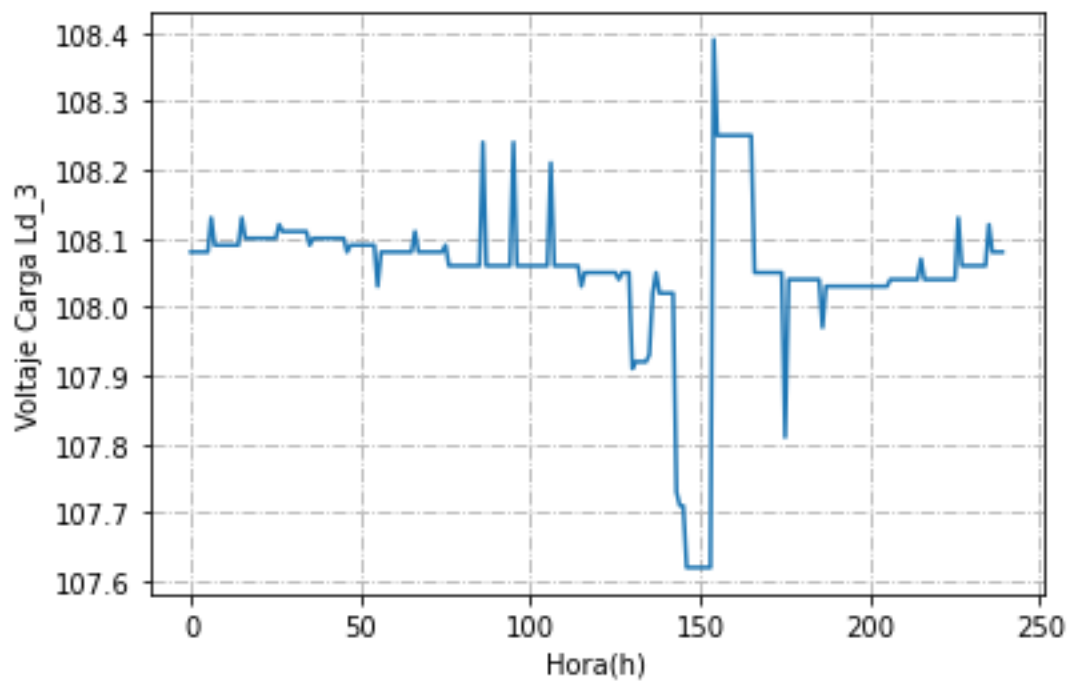


Figura 31: Voltaje Carga Ld_3 en la MG-3, para caso de interconexión.

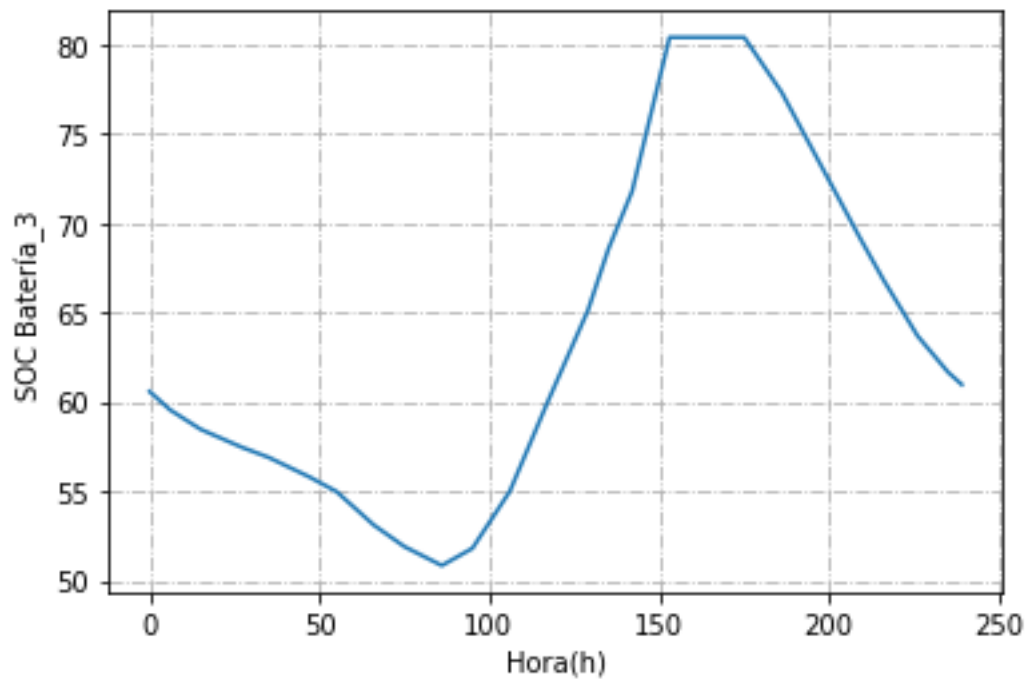


Figura 32: SOC Bateria_3 en la MG-3, para caso de prueba de interconexión.

Para la MG-4.

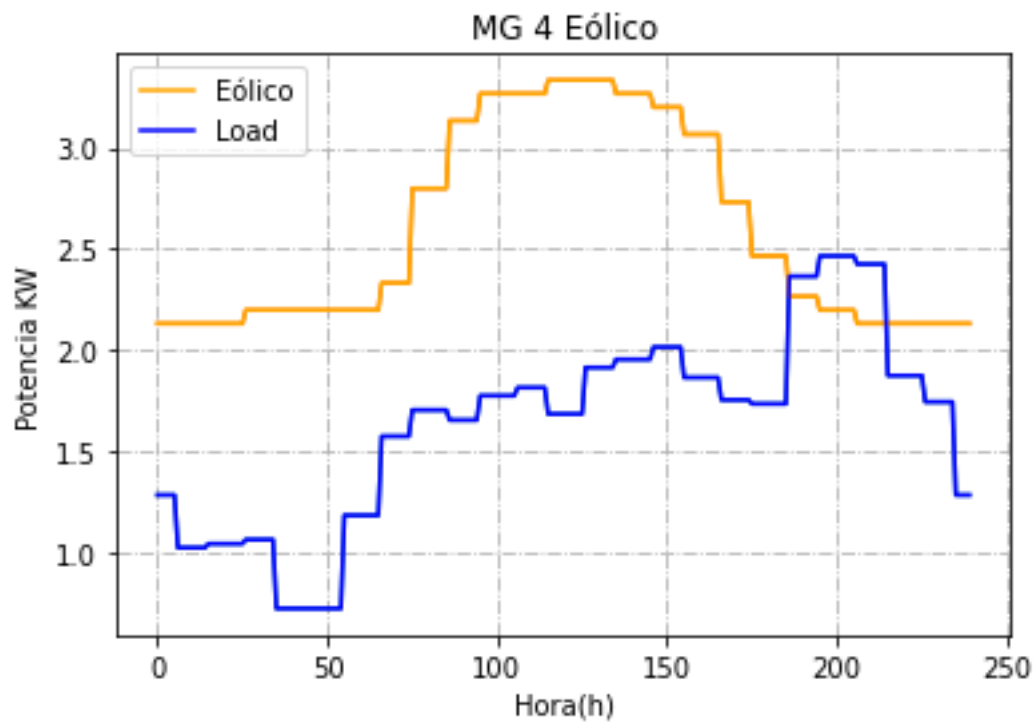


Figura 33: Resultados de potencia en la MG-4, para caso de prueba de interconexión.

Voltaje en el Bus principal del sistema.

- **Conexión de una micro-red, (MG-3) al Bus principal.**

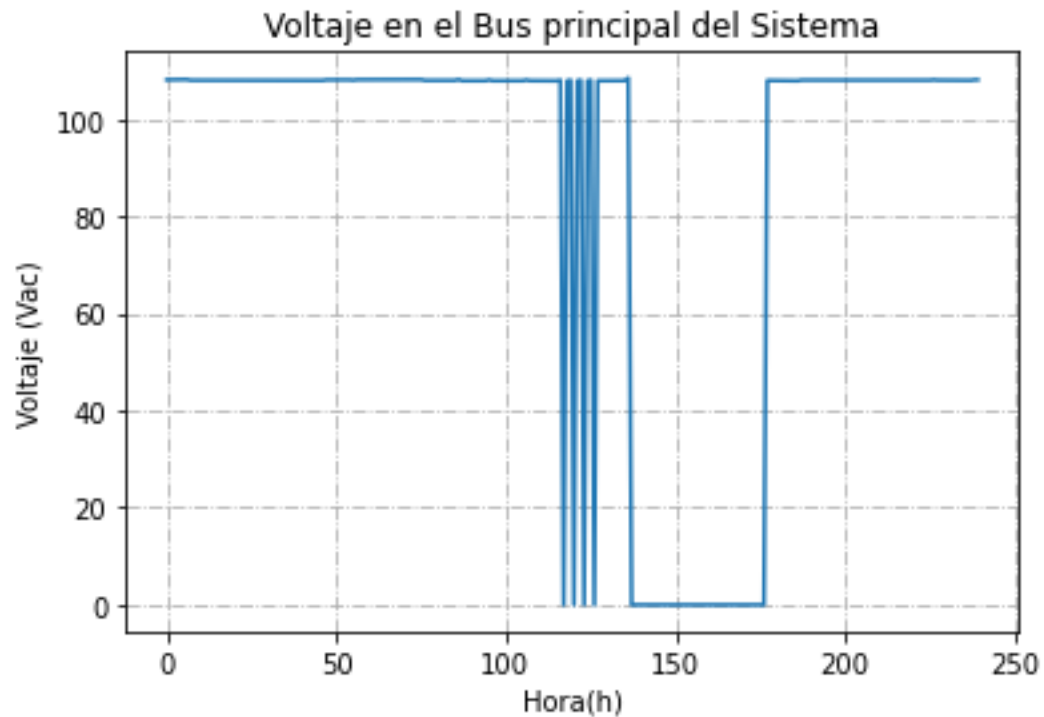


Figura 34: Conexión de una micro-red (MG-3) al Bus principal.

- **Interacción de todas las micro-redes.**

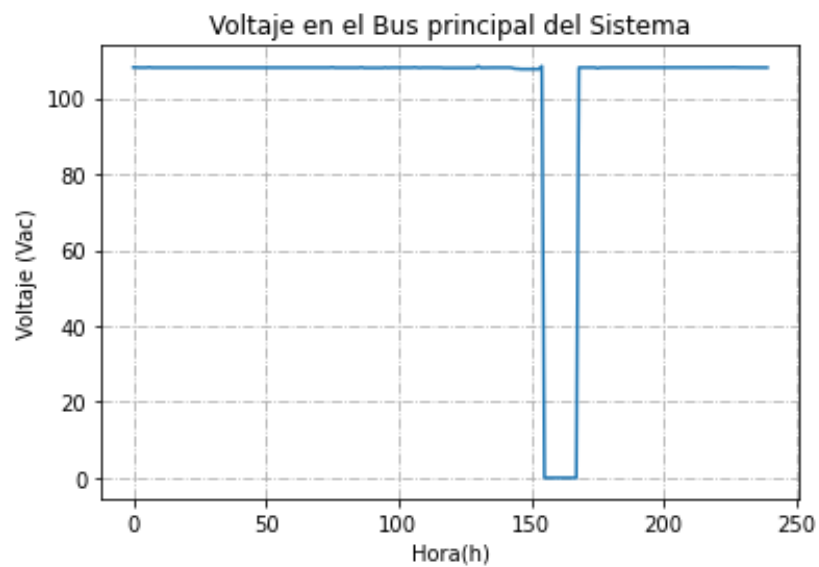


Figura 35: Interacción de todas las micro-redes *MG-i*.

Análisis de resultados caso de prueba 2: Interacción entre micro-redes.

Al igual que en el caso anterior se toman tres resultados por cada micro-red: en las Figuras 24, 27 y 30, se observa el comportamiento de la potencia. En la MG-1, la batería no entrega energía de acuerdo con el consumo de potencia en la carga eléctrica, al estar en interacción con las demás micro-redes aprovecha la energía del bus principal para suplir la demanda de la carga, esto se observa en las horas de 2 a 5 donde la batería está cargando. Para la MG-1 y MG-2 la batería entrega potencia de acuerdo con la necesidad de consumo de la carga eléctrica (C_i). En las Figuras 24, 27 y 30, se puede apreciar que durante las horas donde están operando los paneles solares las baterías logran una estabilidad y luego la gráfica se mantiene en cero este resultado indica que la batería tiene su máxima capacidad de carga programada y debe mantenerse en estado de reposo hasta que se requiera la carga. En las Figuras 25, 28 y 31, se aprecian los perfiles de voltaje estos se mantienen aproximado a los 108 V. En las Figuras 26, 29 y 32, encontramos los estados de carga de las baterías (SOC), se observan cambios con respecto al caso de prueba en modo isla, el SOC para este caso de prueba varía entre el 50% y el 80%, sin pasar su máximo permitido o programado para este caso. Para este caso de prueba las baterías se cargan con mayor velocidad. En la Figura 33, generación eólica se mantiene la respuesta igual que en el caso anterior. Para las Figuras 34 y 35, se observa como varia el voltaje en el bus cuando es conectada una micro-red y cuando están conectadas todas. el voltaje se mantiene en 108 V y 0 V cuando no hay conexión de micro-redes.

4.3 Caso de prueba 3: Modificación en los perfiles de generación.

Para la MG-1.

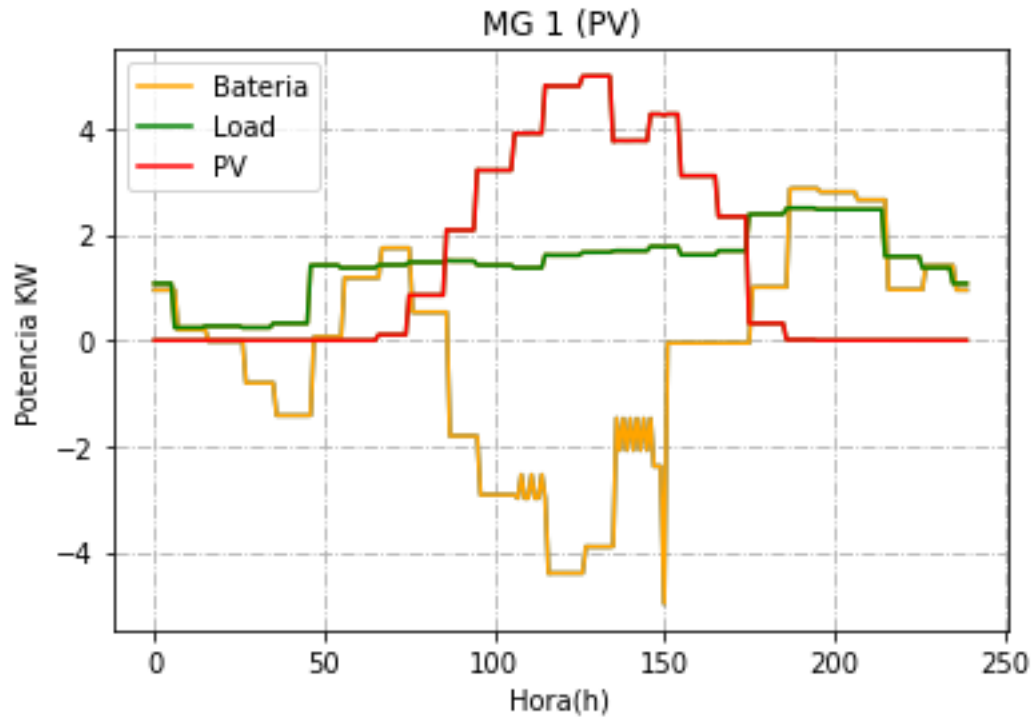


Figura 36: Resultados de potencia MG-1, para caso de prueba de variación de perfiles.

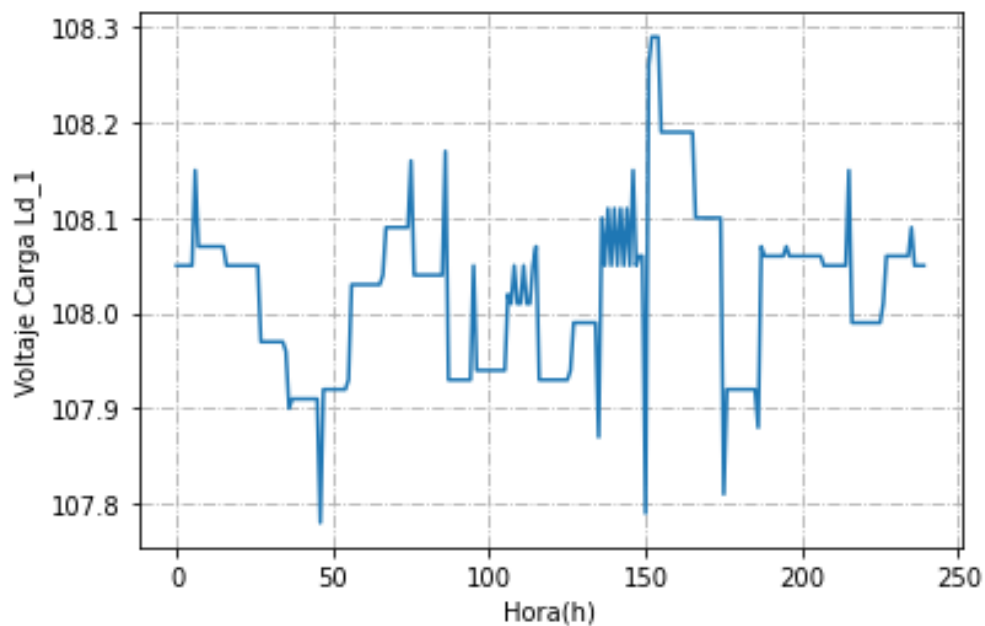


Figura 37: Voltaje Carga Ld_1 en la MG-1, para caso de prueba de variación de perfiles.

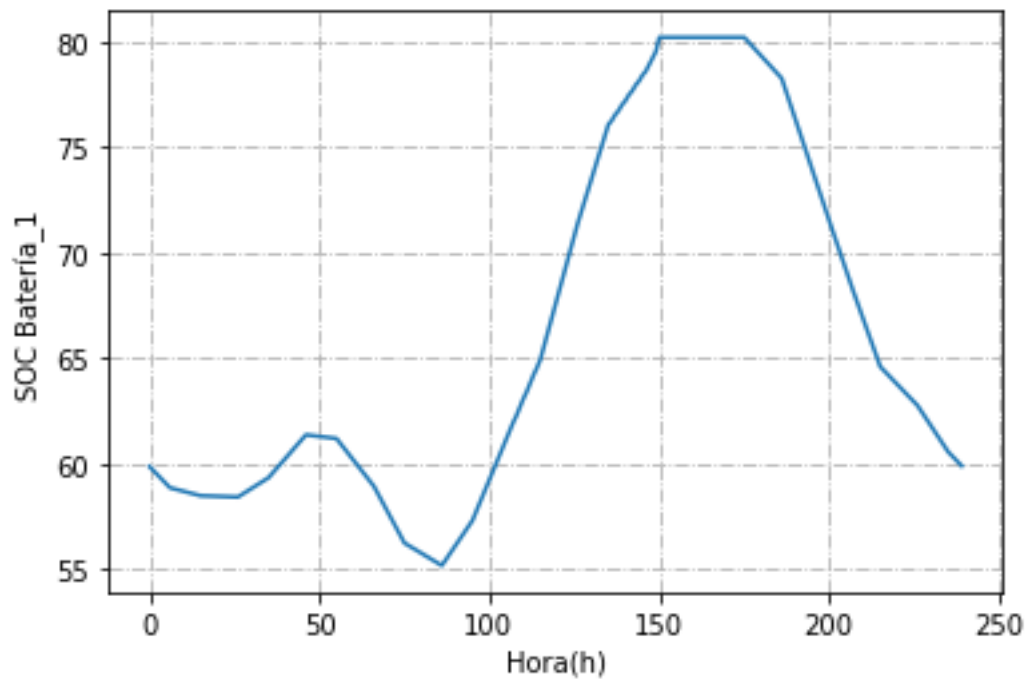


Figura 38: SOC Batería_1 en la MG-1, para caso de prueba de variación de perfiles.

Para la MG-2.

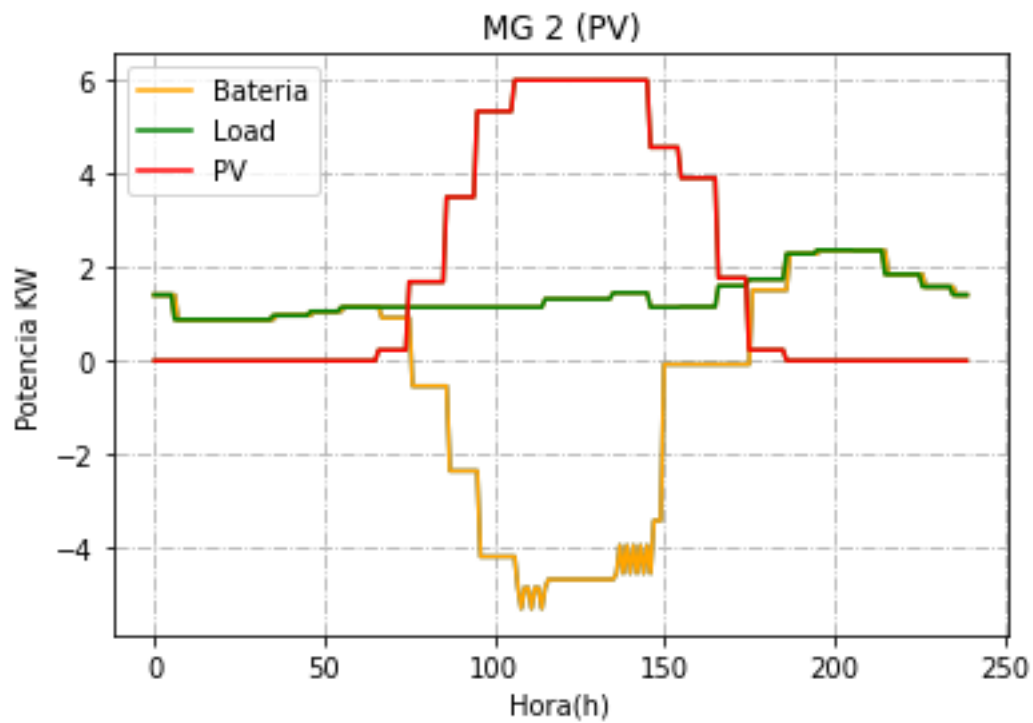


Figura 39: Resultados de potencia MG-2, para caso de prueba de variación de perfiles.

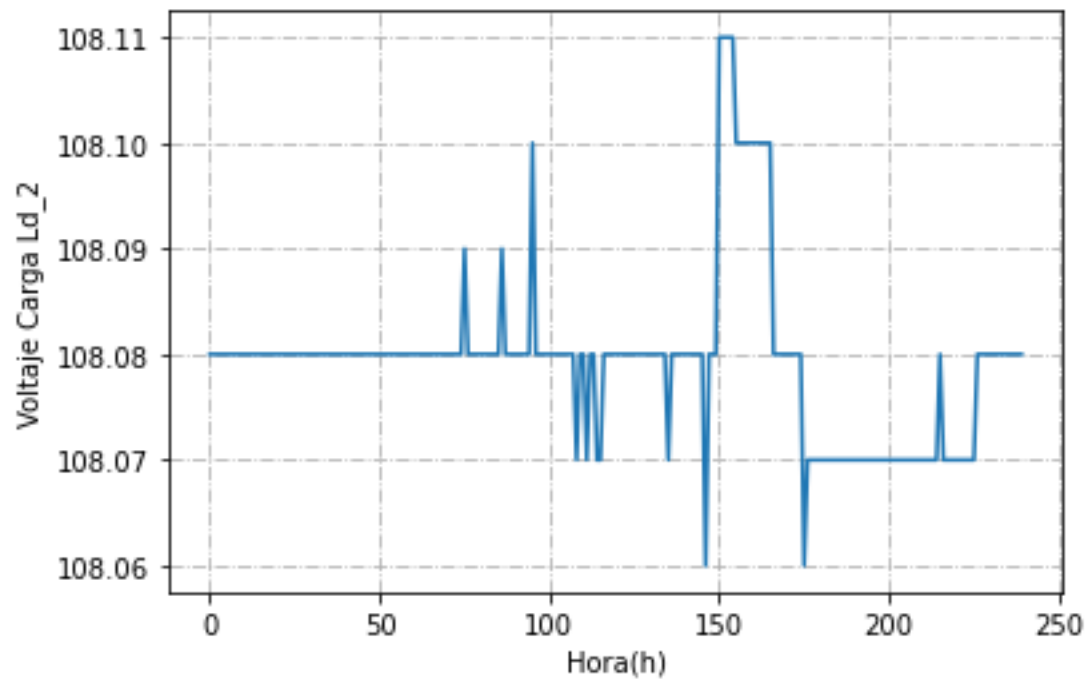


Figura 40: Voltaje Carga Ld_2 en la MG-2, para caso de prueba de variación de perfiles.

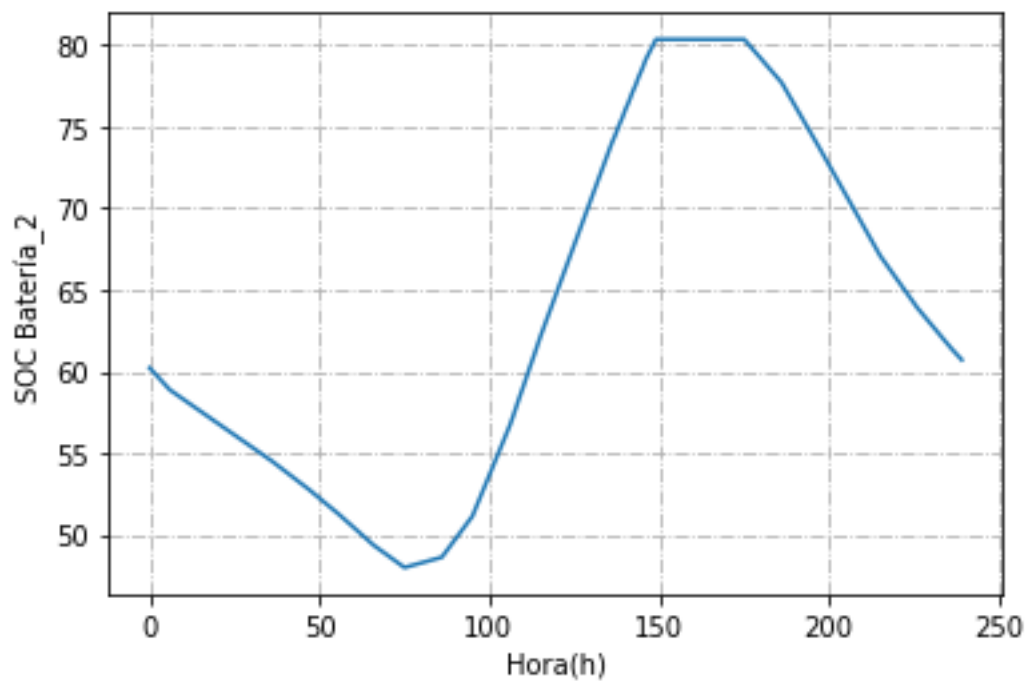


Figura 41: SOC Batería_2 en la MG-2, para caso de prueba de variación de perfiles.

Para la MG-3.

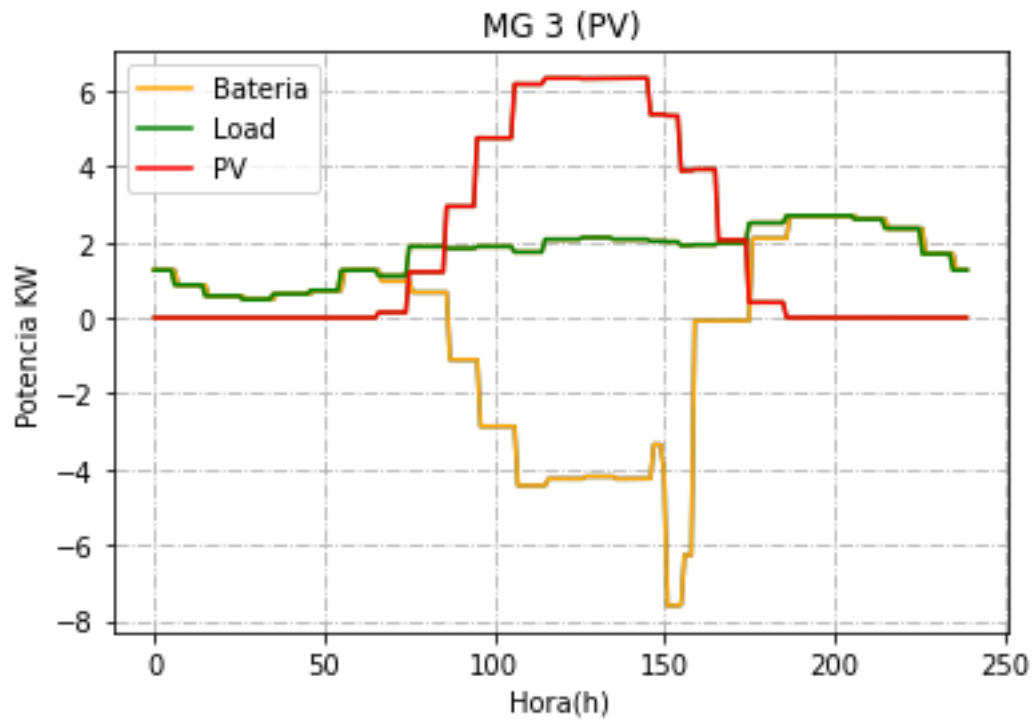


Figura 42: Resultados de potencia MG-3, para caso de prueba de variación de perfiles.

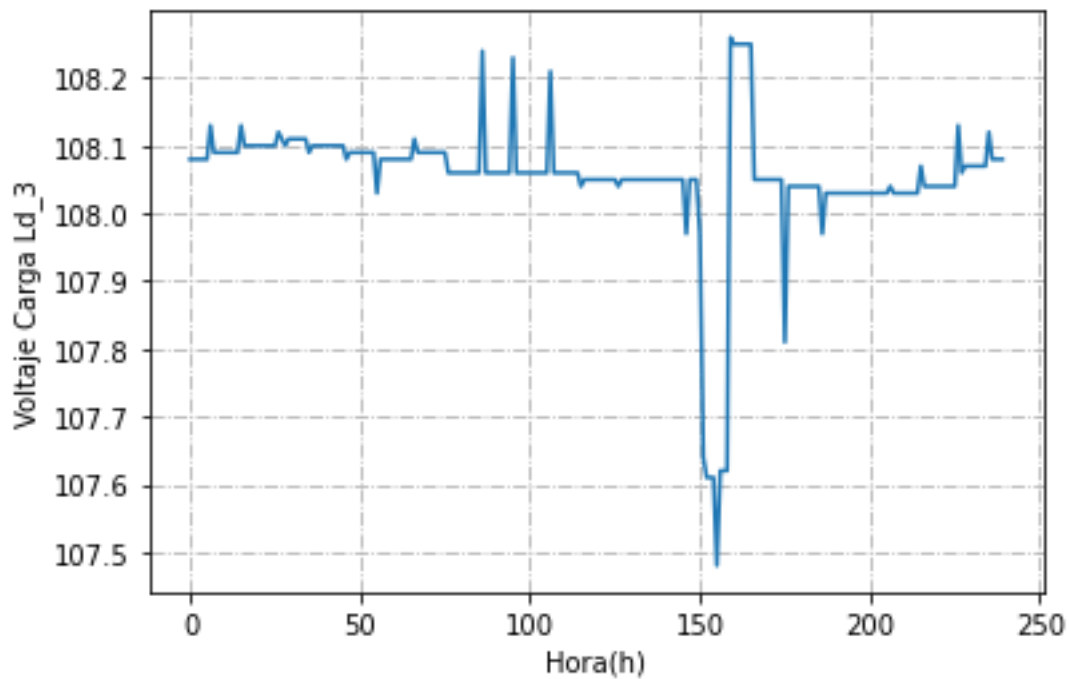


Figura 43: Voltaje Carga Ld_3 en la MG-3, para caso de prueba de variación de perfiles.

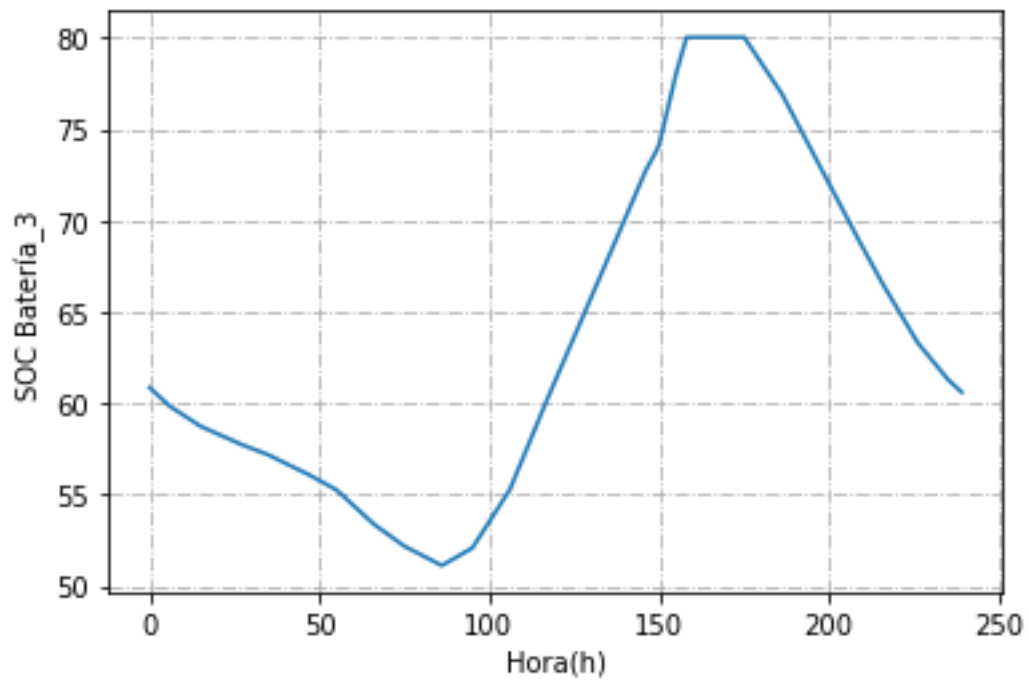


Figura 44: SOC Batería_3 en la MG-3, para caso de prueba de variación de perfiles.

Para la MG-4.

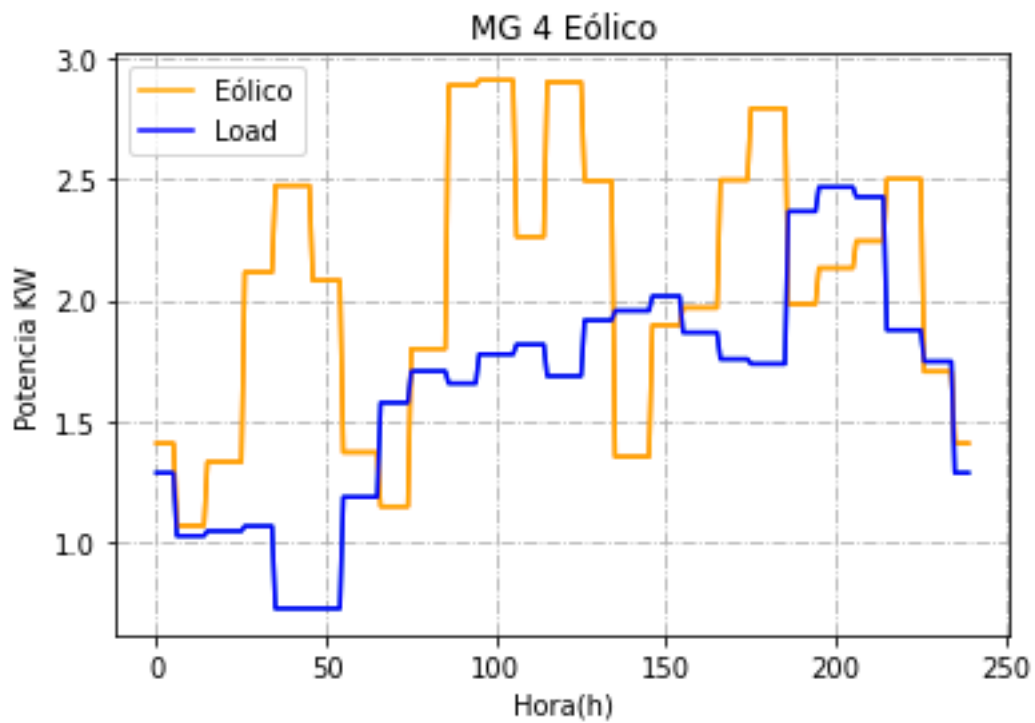


Figura 45: Resultados de potencia en la MG-4, para caso de prueba de variación de perfiles.

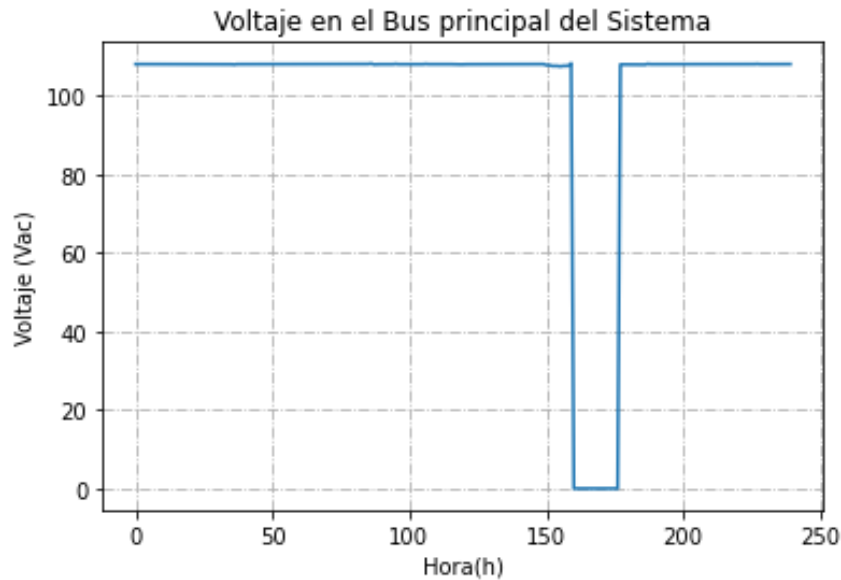
Voltaje en el Bus principal del sistema.

Figura 46: Voltaje en el bus principal del sistema, caso de prueba para variación de perfiles.

Análisis de resultados caso de prueba 3: modificación en los perfiles de generación.

Para este caso se realizaron modificaciones en los perfiles de generación para observar la dinámica del sistema y respuesta de los agentes programados. Como se observa en las gráficas de los paneles solares, generador eólico y curva de potencia para las baterías, en este caso de prueba hay respuestas diferentes a las obtenidas en los casos anteriores. Desde estos resultados se puede demostrar que los agentes se pueden adaptar a las percepciones del ambiente. Para finalizar a partir de los resultados obtenidos en los tres casos de prueba, se puede dar respuesta a la pregunta planteada. Afirmando que, si es viable la gestión de la energía entre distintas micro-redes eléctricas interconectadas entre sí y aisladas de la red eléctrica principal, con el fin de mantener la correcta regulación del bus común y evitando sobrecargas y descargas profundas en las baterías, mediante sistemas multi-agente. Estos resultados mantienen relación al desarrollar el concepto de multi-agente y aplicarlo en la gestión de energía entre micro-redes [33], [48].

5. Conclusiones y futuros trabajos

5.1 Conclusiones

En este trabajo de grado de maestría se desarrolló una arquitectura basada en sistemas multi-agente que permite la gestión del modo de operación de un sistema de micro-redes distribuidas en un entorno aislado. Se describieron los detalles sobre el diseño y desarrollo del sistema de agentes múltiples con el objetivo de evitar sobrecargas y descargas profundas en las baterías. Se han incorporado al sistema funcionalidades para aislar las micro-redes. El sistema multi-agente también implementa un algoritmo para soportar la interacción entre las micro-redes de forma independiente. La simulación del sistema se realizó mediante OpenDSS-G y Python.

Se ha realizado una revisión del estado del arte enfocada principalmente en los trabajos con sistemas multi-agente para la gestión de energía en micro-redes aisladas. Observando que gran parte de las investigaciones se centran en la gestión de energía de manera centralizada y conectadas a la red eléctrica principal. De la revisión realizada al estado del arte se tiene que para la arquitectura se pueden plantear un agente por cada micro-red, a simular y uno para el bus principal que pueda ayudar a tener una percepción completa de la cantidad de potencia a importar o exportar para las MGs vecinas. Se observó que uno de los objetivos de los agentes es que consigan la acción de abrir o cerrar los interruptores para permitir el paso del nivel potencia requerido.

Se validó el modelo propuesto mediante la simulación de tres casos de pruebas obteniendo resultados que permiten dar respuesta a la pregunta generada en el planteamiento del problema. Confirmando que, si es viable la gestión de la energía entre distintas micro-redes eléctricas interconectadas entre sí y aisladas de la red eléctrica principal, con el fin de mantener la correcta regulación del bus común y evitando sobrecargas y descargas profundas

en las baterías, mediante sistemas multi-agente. De los resultados obtenidos se tiene que un sistema descentralizado de gestión de energía basado en la teoría de sistemas de múltiples agentes puede tener importantes beneficios, teniendo en cuenta el carácter autónomo de las micro-redes. Un enfoque descentralizado utiliza los dispositivos mejor que uno centralizado y un sistema descentralizado de gestión energética es económicamente competitivo. La ventaja más importante de usar una arquitectura descentralizada es que la micro-red gestionada tiene muchas más posibilidades de operación parcial en casos de mal funcionamiento y no pueden ocasionar una falla completa del sistema.

5.2 Futuros trabajos

Con el propósito de seguir investigado sobre la gestión de energía y la interconexión de micro-redes aisladas se propone desarrollar un algoritmo inteligente más eficiente para la optimización y coordinación de los agentes múltiples, de tal manera que pueda seleccionar la alternativa más adecuada al momento de realizar conexiones entre las micro-redes y tenga en cuenta el análisis del flujo de potencia (Voltajes y frecuencia).

Realizar el estudio de las micro-redes implementado el modelo de un ISS (Interconnecting Static Switch), para mirar el efecto de las conexiones entre las micro-redes. Anexo A.

Se puede implementar un sistema basado en hardware que recreara aún más las capacidades y el rendimiento del sistema multi-agente propuesto. Los agentes pueden ser programados en sistemas embebidos e interactuar con OpenDSS-G, por medio de su protocolo de comunicación y su capacidad de simulación en conjunto con otras plataformas, en este artículo [49], se puede observar una aplicación de este tipo.

A. Anexo: Interconexión de interruptores estático (ISS)

La siguiente información es tomada del artículo [44].-Las micro-redes se pueden acoplar con la ayuda de ISS. La Figura A.1 ilustra la estructura de dos ISS por fase. En la Figura A.1 (i), Se observa una estructura compuesta por un transistor bipolar (IGBT) dentro de un puente de diodos. Cabe destacar que esta figura ilustra la estructura de un ISS, dependiendo de la capacidad de corriente y voltaje de cada IGBT y los requisitos del sistema, es posible que sea necesario conectar más IGBT y diodos en serie y/o en paralelo. En esta estructura, cuando el IGBT está encendido, una corriente sinusoidal bidireccional puede fluir a través del ISS donde solo dos diodos polarizados para cada semi-ciclo. Las micro-redes se aislarán tan pronto como se apague el IGBT. Por lo tanto, los ISS tiene un sistema de control de conmutación menos complicado que la estructura de la Figura A.1 (ii) que necesita señales continuas de encendido y apagado para cada IGBT por cada medio ciclo. Además, el IGBT en la estructura de la Figura A.1(i) solo tiene pérdidas de conducción y no tiene pérdidas de conmutación continuas. Sin embargo, los diodos tienen pérdidas de conducción y de conmutación.

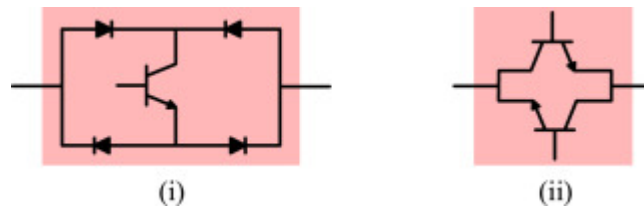


Figura A.1: (i) ISS estructura con un IGBT, (ii) ISS arreglo con dos IGBT [44].

B. Anexo: Otros resultados

En el siguiente apartado se muestran algunas gráficas de los resultados obtenidos al inicio de este trabajo y el avance de la investigación hasta obtener los resultados finales. En los gráficos de la izquierda los perfiles de potencia en el panel solar, carga eléctrica y batería. Las baterías no realizan seguimiento de potencia. En los gráficos de la derecha se presentan los perfiles de voltaje del sistema, estos se ajustaron para trabajar a baja tensión ver Figura B1, B2 y B3.

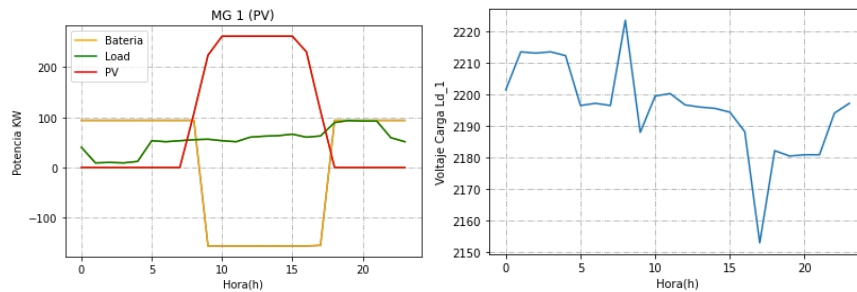


Figura B1: **MG-1**, perfiles de potencia y voltaje en la carga.

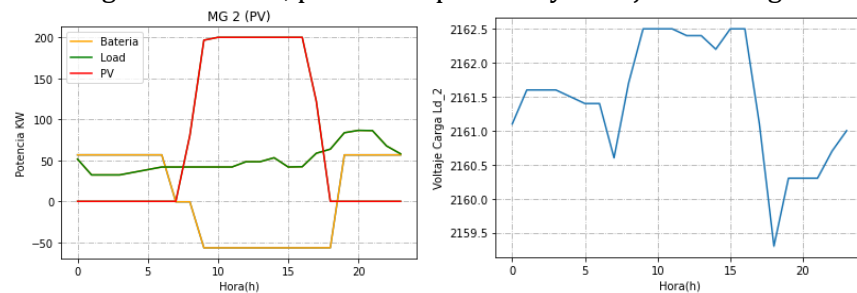


Figura B2: **MG-2**, perfiles de potencia y voltaje en la carga.

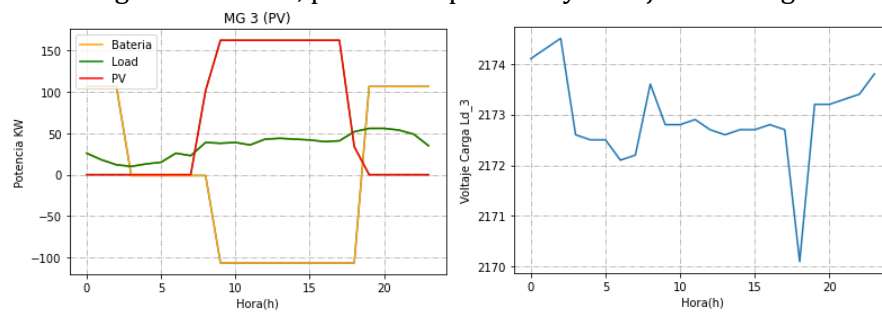


Figura B3: **MG-3**, perfiles de potencia y voltaje en la carga.

Bibliografia

- [1] J. Lagorse, M. G. Simoes, and A. Miraoui, "A Multiagent Fuzzy-Logic-Based Energy Management of Hybrid Systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 6, pp. 2123–2129, 2009.
- [2] C.-H. Yoo, I.-Y. Chung, H.-J. Lee, and S.-S. Hong, "Intelligent Control of Battery Energy Storage for Multi-Agent Based Microgrid Energy Management," *Energies*, vol. 6, no. 10, pp. 4956–4979, 2013.
- [3] R. Morsali, S. Ghorbani, R. Kowalczyk, and R. Unland, "On Battery Management Strategies in Multi-agent Microgrid Management," in *Business Information Systems Workshops*, 2017, pp. 191–202.
- [4] T. Bogaraj and J. Kanakaraj, "Intelligent energy management control for independent microgrid," *Sādhana*, vol. 41, no. 7, pp. 755–769, Jul. 2016.
- [5] M. Ding and K. Luo, "A Multi-Agent Energy Coordination Control Strategy in Microgrid Island Mode," in *Unifying Electrical Engineering and Electronics Engineering*, 2014, pp. 529–536.
- [6] N. L. Diaz, J. G. Guarnizo, M. Mellado, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "A Robot-Soccer-Coordination Inspired Control Architecture Applied to Islanded Microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 4, pp. 2728–2742, Apr. 2017.
- [7] D. Wu, F. Tang, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "A Control Architecture to Coordinate Renewable Energy Sources and Energy Storage Systems in Islanded Microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1156–1166, May 2015.
- [8] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, and A. G. Madureira, "Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 916–

- 924, May 2006.
- [9] H. Mahmood, D. Michaelson, and Jin Jiang, "Strategies for Independent Deployment and Autonomous Control of PV and Battery Units in Islanded Microgrids," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 3, pp. 742–755, Sep. 2015.
 - [10] T. L. Vandoorn, J. C. Vasquez, J. De Kooning, J. M. Guerrero, and L. Vandevelde, "Microgrids: Hierarchical Control and an Overview of the Control and Reserve Management Strategies," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 42–55, Dec. 2013.
 - [11] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodríguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, Nov. 2012.
 - [12] D. Wu, F. Tang, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Autonomous Active Power Control for Islanded AC Microgrids With Photovoltaic Generation and Energy Storage System," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 4, pp. 882–892, Dec. 2014.
 - [13] A. H. Fathima and K. Palanisamy, "Optimization in microgrids with hybrid energy systems – A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 431–446, May 2015.
 - [14] *IEEE Std 1561-2007 : IEEE Guide for Optimizing the Performance and Life of Lead-Acid Batteries in Remote Hybrid Power Systems*. IEEE, 2008.
 - [15] N. L. Diaz, D. Wu, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Fuzzy droop control loops adjustment for stored energy balance in distributed energy storage system," in *2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*, 2015, pp. 728–735.
 - [16] G. Zhabelova, V. Vyatkin, and V. N. Dubinin, "Toward Industrially Usable Agent Technology for Smart Grid Automation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 4, pp. 2629–2641, Apr. 2015.
 - [17] P. H. Nguyen, W. L. Kling, and P. F. Ribeiro, "A Game Theory Strategy to Integrate Distributed Agent-Based Functions in Smart Grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 568–576, Mar. 2013.

- [18] L. Hernandez *et al.*, "A multi-agent system architecture for smart grid management and forecasting of energy demand in virtual power plants," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 1, pp. 106–113, Jan. 2013.
- [19] C. P. Nguyen and A. J. Flueck, "Agent Based Restoration With Distributed Energy Storage Support in Smart Grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 1029–1038, Jun. 2012.
- [20] B. Ramachandran, S. K. Srivastava, C. S. Edrington, and D. A. Cartes, "An Intelligent Auction Scheme for Smart Grid Market Using a Hybrid Immune Algorithm," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 10, pp. 4603–4612, Oct. 2011.
- [21] H. Dagdougui and R. Sacile, "Decentralized Control of the Power Flows in a Network of Smart Microgrids Modeled as a Team of Cooperative Agents," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 22, no. 2, pp. 510–519, Mar. 2014.
- [22] C. M. Colson and M. H. Nehrir, "Comprehensive Real-Time Microgrid Power Management and Control With Distributed Agents," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 617–627, Mar. 2013.
- [23] O. Palizban, K. Kauhaniemi, and J. M. Guerrero, "Microgrids in active network management—Part I: Hierarchical control, energy storage, virtual power plants, and market participation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 36, pp. 428–439, Aug. 2014.
- [24] W. Liu, W. Gu, W. Sheng, X. Meng, Z. Wu, and W. Chen, "Decentralized Multi-Agent System-Based Cooperative Frequency Control for Autonomous Microgrids With Communication Constraints," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 446–456, Apr. 2014.
- [25] Q. Li, F. Chen, M. Chen, J. M. Guerrero, and D. Abbott, "Agent-Based Decentralized Control Method for Islanded Microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, pp. 1–1, 2015.
- [26] C.-X. Dou and B. Liu, "Multi-Agent Based Hierarchical Hybrid Control for Smart Microgrid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 771–778, Jun. 2013.
- [27] J. G. GUARNIZO MARIN, "Arquitecturas Centralizadas de Coordinación. Extrapolación del Fútbol de Robots al Control de Modo de Operaciones de Micro-

- Redes,” Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), 2016.
- [28] A. Kantamneni, L. E. Brown, G. Parker, and W. W. Weaver, “Survey of multi-agent systems for microgrid control,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 45, pp. 192–203, Oct. 2015.
- [29] M. Baun, M. A. Awadallah, and B. Venkatesh, “Implementation of load-curve smoothing algorithm based on battery energy storage system,” in *2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2016, pp. 1–5.
- [30] T. S. Mahmoud, D. Habibi, and O. Bass, “Fuzzy logic for smart utilisation of Storage Devices in a typical microgrid,” in *2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2012, pp. 1–6.
- [31] K. Alqunun and P. A. Crossley, “Rated energy impact of BESS on total operation cost in a microgrid,” in *2016 IEEE Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, 2016, pp. 292–300.
- [32] C.-H. Yoo *et al.*, “Intelligent Control of Battery Energy Storage for Multi-Agent Based Microgrid Energy Management,” *Energies*, vol. 6, no. 10, pp. 4956–4979, Sep. 2013.
- [33] M. Batool, F. Shahnia, and S. M. Islam, “Multi-level supervisory emergency control for operation of remote area microgrid clusters,” *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 7, no. 5, pp. 1210–1228, 2019.
- [34] F. Shahnia, S. Bourbour, and A. Ghosh, “Coupling Neighboring Microgrids for Overload Management Based on Dynamic Multicriteria Decision-Making,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 2, pp. 969–983, 2017.
- [35] E. Bullich-Massagué, F. Díaz-González, M. Aragüés-Peñalba, F. Girbau-Llistuella, P. Olivella-Rosell, and A. Sumper, “Microgrid clustering architectures,” *Appl. Energy*, vol. 212, pp. 340–361, Feb. 2018.
- [36] M. J. Wooldridge and N. R. Jennings, “Intelligent Agents: Theory and Practice,” 1995.
- [37] Gerhard Weiss, “Multiagent Systems, Second Edition | The MIT Press.” [Online]. Available: <https://mitpress.mit.edu/books/multiagent-systems-second->

- edition. [Accessed: 14-Oct-2020].
- [38] M. Institution of Electrical Engineers. and British Computer Society., *IEE proceedings. Software.*, vol. 144, no. 1. [Institution of Electrical Engineers], 1997.
 - [39] D. Montenegro Martinez, "Actor's based diakoptics for the simulation, monitoring and control of smart grids," Universidad de los Andes (Bogotá), Nov. 2015.
 - [40] R. D. Montenegro, D., "Program on Technology Innovation :," *Program on Technology Innovation: OpenDSS-G*, vol. 3, no. 3. p. 117, 2020.
 - [41] EPRI, "OpenDSS PVSystem Element Model Version 1," pp. 1–10, 2011.
 - [42] R. C. Dugan, J. A. Taylor, and D. Montenegro, "Energy storage modeling for distribution planning," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 2, pp. 954–962, Mar. 2017.
 - [43] P. Chirapongsananurak, S. Santoso, R. C. Dugan, and J. Smith, "Voltage regulation in distribution circuits with wind power," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1–8.
 - [44] F. Shahnian and S. Bourbour, "A practical and intelligent technique for coupling multiple neighboring microgrids at the synchronization stage," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 11, pp. 13–25, Sep. 2017.
 - [45] G. Tobón, J. Arturo, M. Marín, and M. Andres, "Curva de Cargabilidad," pp. 1–5, 2013.
 - [46] F. Z. Harmouch, N. Krami, and N. Hmina, "A multiagent based decentralized energy management system for power exchange minimization in microgrid cluster," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 40, no. April, pp. 416–427, 2018.
 - [47] "Atlas Interactivo - Radiación IDEAM." [Online]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>. [Accessed: 06-Nov-2020].
 - [48] N. L. Diaz, J. G. Guarnizo, M. Mellado, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "A Robot-Soccer-Coordination Inspired Control Architecture Applied to Islanded Microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 4, pp. 2728–2742, Apr. 2017.

- [49] C. Zambrano, C. Trujillo, D. Celeita, M. Hernandez, and G. Ramos, "GridTeractions: Simulation platform to interact with distribution systems," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2016, vol. 2016–Novem.