



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Gestión de energía en microrredes interconectadas usando D-ADMM

Óscar Iván Parra Acuña

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
Bogotá D.C., Colombia
2023

Gestión de energía en microrredes interconectadas usando D-ADMM

Óscar Iván Parra Acuña

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Eléctrica

Director(a):
Ph.D. Eduardo Alirio Mojica Nava

Línea de Investigación:
Microrredes eléctricas
Grupo de Investigación:
Programa de investigación sobre adquisición y análisis de señales PAAS-UN

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá D.C., Colombia
2023

Al ingeniero, amigo y colega Daniel Alejandro Prieto Espinosa, por haber sido la voz de aliento que necesité en el desarrollo de este trabajo.

Resumen

Las microrredes eléctricas son el resultado de la alta integración de las energías renovables en los sistemas eléctricos y el constante esfuerzo por mejorar los índices de calidad, confiabilidad y seguridad. El incremento de estos sistemas ha derivado en la interacción por medio de sistemas interconectados. Como resultado de esta interacción, la asignación económica de recursos a cargo del sistema de gestión de energía se ha vuelto una tarea compleja, a menudo resuelta con métodos de optimización centralizados. En este trabajo se presenta una formulación del problema de gestión de energía utilizando las ecuaciones de flujo de potencia AC, para que represente el comportamiento de cualquier sistema eléctrico. Además, se propone un algoritmo de optimización distribuido basado en el método de multiplicadores de dirección alternante, que con el uso de estimadores locales distribuye el problema entre todas las microrredes. De esta manera se evita la centralización parcial de información eliminando puntos únicos de falla y violaciones de privacidad. El algoritmo es puesto a prueba a través de tres casos de estudio que simulan diferentes condiciones de red y recurso. De igual manera, se verifica la convergencia utilizando los residuales primales y duales del problema planteado.

Palabras clave: Optimización Distribuida, Microrredes Eléctricas, Microrredes Interconectadas, ADMM.

Abstract

Título en inglés: Energy management for interconnected microgrids using D-ADMM.

Microgrids result from the evolution of electrical systems and the high penetration of renewable energy resources. Due to the increasing number of these systems, their interaction is inevitable. Consequently, economic resource allocation has become one of the most challenging tasks in operation and control, usually solved with centralized optimization algorithms. In this work, we present an energy management problem formulation, considering AC power flow equations, to represent the behavior of every electrical system. Moreover, we propose a fully distributed optimization algorithm based on the alternating direction method of multipliers, using local estimates to avoid data privacy violations. Then, the optimization algorithm is validated through some study cases to show its convergence and applicability.

Keywords: Distributed Optimization, Microgrids, Networked Microgrids, ADMM.

Contenido

Resumen	vi
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	1
1 Introducción	2
2 Sistemas de microrredes interconectadas	5
2.1 Aspectos principales de las NMGs	6
2.1.1 Arquitectura	7
2.1.2 Comunicaciones	10
2.1.3 Operación y control	13
2.2 Sistemas de gestión de energía en NMGs	17
2.2.1 Centralizado	17
2.2.2 Híbrido	20
2.2.3 Anidado	22
2.2.4 Descentralizado	23
2.2.5 Distribuido	23
3 Gestión de energía en microrredes interconectadas	27
3.1 Sistemas de gestión de energía	27
3.1.1 EMS en microrredes	27
3.1.2 EMS en microrredes interconectadas	29
3.2 Costos y restricciones en la gestión de energía	31
3.2.1 Notación	32
3.2.2 Sistemas de gestión locales	33
3.2.3 Sistema de gestión global	36
4 Gestión distribuida en microrredes interconectadas	38
4.1 Método de multiplicadores de dirección alternante	38
4.2 Forma general de la optimización de consenso	39
4.3 Reformulación del problema	41
4.4 Solución del problema con ADMM	46
4.5 Análisis de convergencia	49

5	Casos de estudio	52
5.1	Sistema NMG de 4 MGs conectadas a un DS	52
5.1.1	Microrred 1	52
5.1.2	Microrred 2	53
5.1.3	Microrred 3	53
5.1.4	Microrred 4	54
5.1.5	Sistema NMG	55
5.2	Casos de estudio	58
5.2.1	Caso de estudio 1	58
5.2.2	Caso de estudio 2	62
5.2.3	Caso de estudio 3	64
6	Conclusiones	69
	Bibliografía	71

Lista de Figuras

2-1	Concepto de microrredes interconectadas.	7
2-2	Sistemas de prueba para NMGs, [Alam et al., 2020].	9
2-3	Comunicaciones para control jerárquico y distribuido, [Alam et al., 2019]. . .	12
2-4	Esquema general de una arquitectura de control jerárquica, [Islam et al., 2021].	14
2-5	Esquema general de una arquitectura de control distribuida, [Islam et al., 2021].	15
2-6	Esquema general de un EMS centralizado, [Khavari et al., 2020].	18
2-7	Esquema general de un EMS híbrido, [Khavari et al., 2020].	21
2-8	Esquema general de un EMS descentralizado, [Khavari et al., 2020].	24
2-9	Esquema general de un EMS distribuido, [Khavari et al., 2020].	24
3-1	Arquitecturas de control jerárquicas y distribuidas [Islam et al., 2021].	28
3-2	Diferentes esquemas de control en MGs.	29
3-3	Modelo de MGs interconectadas.	31
4-1	Mapeo de la relación entre componentes de variables locales y variables glo- bales [Boyd et al., 2011].	42
4-2	Subvector local \mathbf{P}_i^{exc} con sus estimaciones de compras y ventas.	42
4-3	Subvector local \mathbf{P}_i^{exc} para el escenario de 2 MGs.	43
4-4	Variables globales y estimadores en el escenario de 2 MGs.	43
4-5	Relación entre estimadores y variable global en el escenario de 2 MGs.	44
4-6	Composición del subvector de estimadores globales en el escenario de 2 MGs.	45
4-7	Intercambio de información para la actualización de los estimadores globales.	48
4-8	Algoritmo basado en ADMM para la gestión de energía en sistemas NMG. .	51
5-1	Microrred 1 del sistema NMG [Alam et al., 2020].	53
5-2	Microrred 2 del sistema NMG [Alam et al., 2020].	54
5-3	Microrred 3 del sistema NMG [Alam et al., 2020].	55
5-4	Microrred 4 del sistema NMG [Alam et al., 2020].	56
5-5	Sistema NMG compuesto por 4 MGs y un DS [Alam et al., 2020].	57
5-6	Despachos de las unidades convencionales, caso 1.	60
5-7	Intercambios y compras de potencia, caso de estudio 1.	61
5-8	Residuales primales y duales, caso de estudio 1.	63
5-9	Despachos de las unidades convencionales, caso 2.	64
5-10	Intercambios y compras de potencia, caso de estudio 2.	65

5-11	Despachos de las unidades convencionales, caso 3.	66
5-12	Intercambios y compras de potencia, caso de estudio 3.	67
5-13	Residuales primales y duales, caso de estudio 3.	68

Lista de Tablas

5-1	Características del sistema NMG [Alam et al., 2020]	56
5-2	Parámetros de simulación	59
5-3	Condiciones de generación y demanda, caso 1.	59
5-4	Condiciones de generación y demanda, caso 2.	62
5-5	Precios de venta para los intercambios, caso 3.	64
5-6	Capacidades de generación y demanda, caso 3.	66

1 Introducción

Las redes inteligentes (*smart grids*) han sido uno de los hitos en los sistemas eléctricos. Han permitido la integración a gran escala de fuentes no convencionales de energía, como lo son la energía solar fotovoltaica y eólica. De igual manera, se ha dado paso a la generación distribuida a partir de estas fuentes no convencionales, minimizando el impacto de su integración a la red. Con la transición de los sistemas eléctricos tradicionales hacia las redes inteligentes, han surgido nuevos conceptos como el de las microrredes eléctricas inteligentes, siendo estos sistemas eléctricos a menor escala que buscan prestar un servicio con altos niveles de calidad, confiabilidad y seguridad.

Las microrredes son sistemas eléctricos que traen numerosas ventajas para la prestación del servicio de energía eléctrica. Quizá la más importante es su versatilidad de funcionamiento, ya que son capaces de operar aisladas o conectadas a otros sistemas eléctricos. La habilidad de operar conectadas con otros sistemas ha permitido que, sistemas de distribución tradicionales integren partes de la red como una microrred eléctrica inteligente. De igual manera, tal como funciona con sistemas de distribución, las microrredes pueden operar conjuntamente con sistemas adyacentes de la misma naturaleza. La interacción y cooperación de diferentes microrredes eléctricas abre paso a un concepto conocido como microrredes interconectadas (*Networked Microgrids*).

Las microrredes interconectadas son sistemas eléctricos compuestos por subsistemas de menor escala que interactúan para mantener los niveles de calidad, confiabilidad y seguridad en la prestación del servicio. Dentro de las características principales de estos sistemas está la posibilidad que tienen las microrredes de operar de manera aislada o conjunta con subsistemas adyacentes. Es por esto, que las microrredes eléctricas que operan en un sistema de microrredes interconectadas pueden mantener la calidad del servicio aún en momentos de emergencia. En otras palabras, los sistemas de microrredes interconectadas solucionan varios de los desafíos presentes en las microrredes eléctricas. Sin embargo, la operación y control de las microrredes interconectadas es un problema de mayor complejidad, donde uno de los desafíos con mayor relevancia es la asignación de recursos o despacho económico de potencia.

Usualmente la asignación de recursos y el despacho económico en los sistemas eléctricos es una tarea de los sistemas de gestión de energía y es conocido de la misma manera, problema de la gestión de energía. La relevancia de este problema es tal, que numerosos autores

han centrado su atención en resolverlo de diversas maneras. Dentro del control de microrredes se pueden distinguir dos arquitecturas de control predominantes, el control jerárquico y el control distribuido. No obstante, el control jerárquico tiene cierta predominancia. De acuerdo con [Zambroni de Souza and Castilla, 2018], el control terciario de las arquitecturas jerárquicas es conocido como sistema de gestión de energía y se puede modelar por medio de un problema de optimización. Esta optimización se compone de dos grandes problemas en los sistemas eléctricos, uno es la programación de unidades (*Unit Commitment*) y el otro el despacho económico. Y como en todo problema de optimización, se han presentado numerosas alternativas de solución donde cada una tiene sus ventajas y desventajas.

De acuerdo con [Alam et al., 2019], las soluciones propuestas para el problema de la gestión de energía se pueden categorizar en centralizadas, híbridas, descentralizadas y distribuidas. No obstante, los sistemas de microrredes interconectadas son sistemas de actores numerosos e independientes, por lo cual las alternativas descentralizadas y distribuidas son las más atractivas. En [Bui et al., 2018] y [Ahmadi and Rezaei, 2020] los autores proponen un sistema de gestión de energía formulado como un problema de optimización de dos niveles (*bilevel*), lo que se traduce en la centralización parcial de la información y por consiguiente un punto único de falla. Dicha centralización se da considerando que en este tipo de formulaciones siempre debe haber un líder, cuyas acciones determinan las de los demás involucrados. En [Gao et al., 2018] se propone una solución que evita el problema de la centralización parcial de la información a través del uso de puntos de acople común. Sin embargo, en dicha solución no se considera una interacción directa entre los subsistemas, evitando así considerar el comportamiento eléctrico de las microrredes. Por otro lado, en [Wang et al., 2015] y [Wang et al., 2018] se proponen soluciones a partir de una formulación de dos niveles que, a pesar de presentar la misma centralización parcial de información, muestra la posibilidad de una interacción directa entre microrredes.

Por todo lo anterior, es posible observar una brecha existente en las propuestas para dar solución al problema de gestión de energía de manera distribuida, evitando las violaciones de privacidad al centralizar información relevante.

Por otro lado, dentro de los algoritmos de optimización distribuida resalta el método de multiplicadores de dirección alternante. Su atractivo radica en la separabilidad del problema en subproblemas de menor complejidad, que al ser resueltos paralelamente, llevan a la solución del problema original. Debido a todas las ventajas que presenta este método, en [Liu et al., 2018] los autores presentan un sistema de gestión de energía que se soluciona con dicho método, no obstante, en la formulación asumen las microrredes como un equivalente y no como un sistema propiamente. De esta manera los autores eliminan las restricciones que representan el funcionamiento y operación de las microrredes, mientras solo consideran el comportamiento eléctrico del sistema de distribución.

Nuevamente, es posible observar una brecha en la solución del problema de la gestión de energía en sistemas de microrredes interconectadas, que considere el funcionamiento eléctrico de todos los subsistemas involucrados y que a su vez elimine los problemas de centralización de información, eliminando puntos únicos de falla a través de un algoritmo de optimización distribuido.

En este trabajo se propone una alternativa de solución para la gestión de energía en sistemas de microrredes interconectadas, utilizando un algoritmo de optimización distribuida basado en el método de multiplicadores de dirección alternante, que considere restricciones basadas en las ecuaciones de flujo de potencia y sea aplicable en todas las topologías de red.

El capítulo 2 muestra una profunda revisión de la literatura disponible en sistemas de gestión tanto en microrredes aisladas como en sistemas interconectados. Se revisan las diferentes arquitecturas de control existentes para la operación y control de estos sistemas. Y de igual manera, se revisan las diferentes alternativas de solución para el problema de gestión de energía, siendo estas centralizadas, híbridas, descentralizadas y distribuidas. Posteriormente en el capítulo 3, partiendo de los sistemas de gestión revisados en el capítulo anterior se trabaja en la formulación del problema que considere los costos de generación y de las transacciones de energía entre subsistemas. De igual manera, que permita integrar restricciones que representen el comportamiento eléctrico de cada microrred y sea aplicable para cualquier topología. El capítulo 4 centra su atención en la solución del problema planteado en el capítulo anterior. Para esto se introducen estimadores locales que permiten distribuir por completo la solución del problema, eliminando la centralización parcial de cualquier información. Además, se plantea la secuencia de ecuaciones y el diagrama de flujo que describe el algoritmo propuesto para dar con la solución. En el siguiente capítulo, el algoritmo se pone a prueba por medio de diferentes casos de estudio aplicados sobre un sistema de referencia. Los casos de estudio pretenden forzar diferentes condiciones de red que permitan verificar la asignación de recursos realizada por el algoritmo, tanto para las plantas de cada microrred como para los intercambios en el sistema. Finalmente, el trabajo termina con las conclusiones que hacen frente a los objetivos planteados inicialmente.

2 Sistemas de microrredes interconectadas

El camino de los sistemas eléctricos hacia las redes inteligentes por medio del uso de microrredes (MG) ha dejado en evidencia la importancia y necesidad de la interacción y coordinación de estas últimas. En los años recientes, importantes aportes en diferentes áreas se han realizado y diversos autores han hecho esfuerzos por resumirlos año tras año en artículos que compilen toda la información posible.

En [Alam et al., 2019], los autores presentan las nociones básicas sobre el concepto de microrredes interconectadas (NMGs), explicando características fundamentales como la arquitectura, el control, las comunicaciones y la operación. El trabajo finaliza con una recopilación de ventajas y beneficios que presentan las NMGs. El artículo acierta clasificando las características fundamentales de las NMGs en esas cuatro categorías, que le permite organizar y presentar los diferentes aportes en el área. Mas recientemente, [Chen et al., 2021] presenta un artículo cuyo propósito es igualmente resumir y presentar todos los aportes realizados en el área de las NMGs, esta vez enaltecendo beneficios como resiliencia y robustez en contraste con sistemas aislados. Por otro lado, presenta otra clasificación de las características de las microrredes diferente a la anterior, clasificando los aspectos importantes en formación, esquemas de integración, modos de operación, modelamiento y simulación. Los autores de igual manera presentan con menor profundidad el tema de estrategias de control en NMGs.

En la literatura se pueden encontrar más artículos de este tipo que ya no buscan resumir la globalidad de las NMGs, sino que por otro lado se enfocan en alguno de los aspectos importantes ya mencionados. En [Zou et al., 2019], los autores realizan una recopilación de información alrededor de los sistemas de gestión de energía (EMS) en las NMGs. Primero presentan algo de literatura en general, pasando por temas como la arquitectura y topología, para luego continuar con los EMS a detalle. Allí se categorizan los aspectos importantes de los EMS en objetivos de los problemas de optimización, escalas de tiempo que se manejan y estructuras de los algoritmos utilizados. Dentro de los objetivos se pueden resaltar la minimización de costos (no solamente de generación), y el nivel de satisfacción de los consumidores. Para las escalas de tiempo se mencionan la escala de tiempo *offline* (un día antes) y la *online* (en tiempo real) dando las ventajas y desventajas de cada una. Por último, se mencionan las dos estructuras principales de los algoritmos, centralizada y distribuida, haciendo énfasis

en los beneficios de la estructura distribuida sobre la centralizada.

Por otro lado, en [Zhou et al., 2020] los autores muestran un artículo extenso en el cual resumen y contrastan diferentes aportes hechos tanto para MGs como para NMGs. Ellos hacen énfasis en varias oportunidades en el objetivo del trabajo, el cual es estudiar las estructuras de comunicación y control. Para presentar las estructuras de comunicación, los autores contemplan controladores maestros centrales (CMC) y controladores de microrred (MC). Explican distintas situaciones que podrían presentarse en caso de falla del controlador de alguna MG o el controlador del grupo de MGs, es decir, muestran diferentes topologías de las redes de comunicación dependiendo el estado del sistema. Debido a que las redes de comunicación implican interacciones de diferentes agentes, algo de teoría de grafos es adicionada. Por último, el artículo se concentra en modelos de control distribuido, mostrando las diferentes variables objetivo (voltaje, frecuencia, costos, etc.). Los autores son enfáticos en la importancia de los algoritmos de consenso en los modelos de control distribuido, teniendo en cuenta que la mayoría se basa en grafos para representar los sistemas de comunicación.

En [Islam et al., 2021] los autores presentan una revisión breve sobre la literatura de NMGs. El punto fuerte de este artículo son los modelos de control y optimización, para lo cual inician definiendo las diferentes arquitecturas de las NMGs. Luego realizan la categorización de los modelos de control, en jerárquico y distribuido, detallando más el modelo de control jerárquico. Al final el artículo menciona las diferentes estructuras de los EMS, clasificándolas en centralizado, distribuido y jerárquico.

Todos estos aportes recopilados muestran el gran interés que surge sobre el tema de las NMGs. Por tal motivo, este capítulo tiene el objetivo de reunir la información más relevante, brindándole un adecuado punto de partida a la investigación. Para ello, se reúne información que permite detallar las NMGs desde un punto de vista global, por medio de su arquitectura, métodos de control, estructuras de comunicación y métodos de operación. Posteriormente el enfoque cambia hacia los EMS en las NMGs y a los diferentes algoritmos de optimización aplicados.

2.1. Aspectos principales de las NMGs

De acuerdo con [Liu et al., 2016] las características o aspectos más importantes de las NMGs se pueden categorizar en arquitectura, comunicaciones, control y operación. Además, un sistema de NMGs se puede representar como el mostrado en la Figura **2-1**. A continuación, se recopilan los aportes más relevantes de las NMGs siguiendo estas categorías.

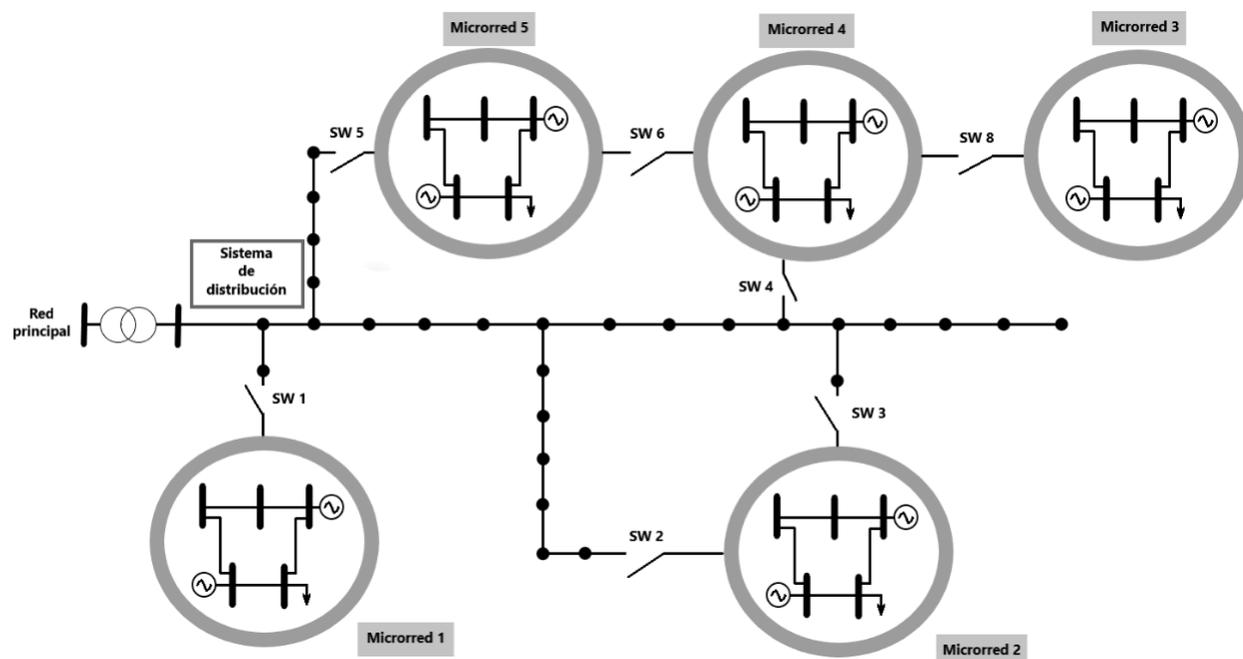


Figura 2-1: Concepto de microrredes interconectadas.

2.1.1. Arquitectura

Dentro de la literatura el término arquitectura se asocia frecuentemente con las arquitecturas de control. Sin embargo, en esta sección se habla de arquitectura haciendo referencia a las topologías que pueden existir cuando se habla de NMGs.

El reciente interés de la ingeniería en las NMGs ha causado que se formulen diferentes sistemas con distintas topologías para evaluar métodos de control, sistemas de gestión, sistemas de comunicación y hasta planeación. En [Gazijahani and Salehi, 2017], los autores utilizan un sistema de distribución IEEE de 85 nodos como base para el caso de estudio. Dentro de los objetivos del trabajo está determinar la ubicación adecuada de diferentes interruptores, que permitan mejorar el desempeño del sistema en temas de seguridad y confiabilidad, dividiendo el sistema en MGs interconectadas. Dentro de los resultados están tres topologías diferentes que resultan de estrategias de riesgo distintas (búsqueda de riesgo, riesgo neutral y evasión de riesgo). Es de notar, que en este trabajo no se considera una interacción de las MGs con la red principal, teniendo en cuenta que el sistema de distribución es dividido completamente en MGs más pequeñas.

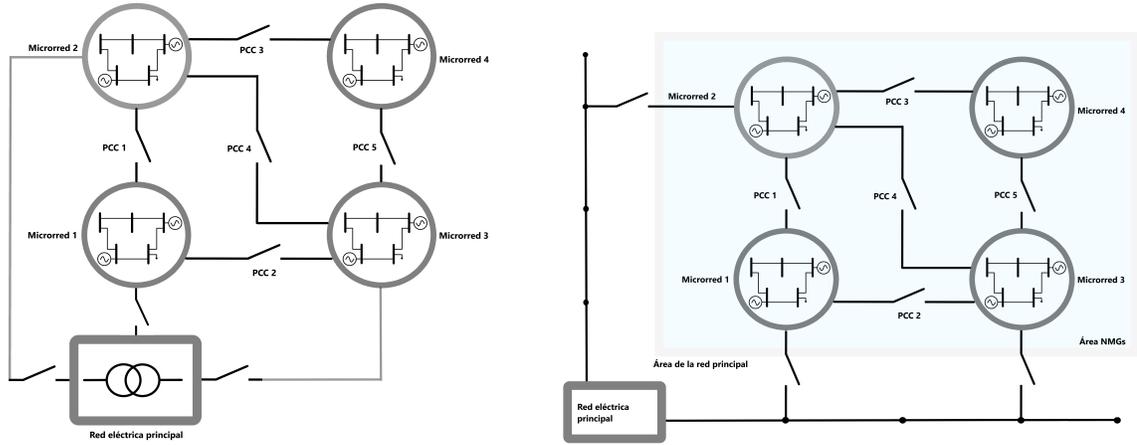
En [Cao et al., 2020], por otro lado, los autores determinan el problema de tener fronteras fijas en las NMGs. Estas fronteras generan una limitante para mejorar los niveles de confiabilidad, resiliencia y estabilidad en las NMGs. Por este motivo, los autores proponen un

método de reorganización que no solo funciona sobre los PCC entre las MGs, sino también las topologías internas de cada MG. El método finalmente propuesto es la reconfiguración generalizada de microrredes (G-MRC), donde el número de topologías es mayor al de un conjunto de MGs tradicional.

De igual manera, en la literatura no solo hay arquitecturas en la planeación, sino también para la operación. En [Schneider et al., 2018] se reconoce un problema existente en la coordinación de NMGs. El problema surge en las aperturas y cierres de interruptores que interconectan las MGs. Estas acciones generan transitorios en frecuencia y voltaje que, en una operación conectada a la red son subsanados por medio de la inercia del sistema, pero en modos aislados traen grandes problemas debido a la baja inercia que tienen las MGs. Para esto los autores proponen un modelo de cargas acompañadas de controladores amigables con la red, que permitan una desconexión y reconexión automática de la carga sin necesidad de comunicaciones en los eventos transitorios. Por otro lado, la propuesta de arquitectura de las NMGs consiste en tres MGs seleccionadas de un sistema IEEE de 123 nodos, donde las microrredes tienen puntos de acople común (PCC, por sus siglas en inglés) entre ellas que les permiten trabajar bajo diferentes topologías. Las MGs son sencillamente zonas del sistema de distribución original, en donde dos MGs tienen PCCs directos con el resto de la red y la otra se conecta a la red por medio de alguna de las otras MGs.

Por otra parte, en temas de gestión energética, en [Liu et al., 2018] los autores plantean la necesidad de un sistema de gestión de energía para la coordinación entre diferentes microrredes y una red de distribución tradicional. Para ello plantean una red de intercambio DC que funciona únicamente para el intercambio de potencia activa entre las microrredes, mientras que la interacción con la red principal se da a través de diferentes puntos de acople AC. Para dar solución al sistema de gestión, los autores utilizan un algoritmo de optimización distribuida basado en el ADMM demostrando su convergencia. La topología del sistema de NMGs utilizada en este documento consiste en una red de distribución de alimentadores radiales (34, 69 y 119 nodos), y diferentes números (3, 6 y 11) de MGs conectadas a los alimentadores en diferentes puntos. Adicionalmente, se definen diferentes topologías para la red de intercambio DC entre las MGs, teniendo en cuenta que es una red diferente a la AC.

Es notorio que todos los aportes trabajan sobre sistemas diferentes, que se acomodan a las necesidades de cada grupo de autores, ya sea en planeación, control u operación. Por eso en [Alam et al., 2020], los autores dejan en evidencia la falta de un sistema de pruebas que funcione como punto de partida para los trabajos en NMGs. Actualmente, los aportes en NMGs no son comparables dado que todos los sistemas en los que son evaluados son diferentes. Para cubrir esta falta, proponen un sistema que funcione para evaluar nuevos aportes en control, flujos de potencia, estabilidad, protecciones y sistemas de gestión de energía. Además, se brinda información de los DERs, sistemas de almacenamiento, cargas deslastra-



(a) Esquema de NMGs con único punto de conexión.

(b) Esquema de NMGs con múltiples puntos de conexión.

Figura 2-2: Sistemas de prueba para NMGs, [Alam et al., 2020].

bles y no deslastrables, tasas de falla y tiempos de reparación de los componentes. Por otro lado, dado que las NMGs funcionan a partir de MGs individuales, los autores definen cada una de las MGs individuales como sistemas AC, que manejan los mismos niveles de voltaje. Además, son enfáticos en la necesidad de generadores sincrónicos de suficiente capacidad para mantener el balance de generación y demanda cuando las MGs operen en modo aislado. Para el sistema de NMGs, los autores definen dos escenarios. El primero hace referencia a un único punto de conexión de las MGs con la red principal y está representado en la Figura 2.2(a). En este sistema, los autores definen un total de 256 topologías posibles considerando conexiones entre las MGs y la red. El segundo escenario muestra la conexión de las NMGs a la red por medio de dos alimentadores, lo que significa más puntos de conexión con la red de distribución y se muestra en la Figura 2.2(b). Todas las posibles topologías descritas en el primer escenario son aplicables al segundo. Finalmente, los autores muestran que a partir de esta propuesta de sistema se pueden lograr las tres topologías representativas propuestas por [Liu et al., 2016], las cuales son en serie, paralelo e interconectado.

Por otro lado, en [Bullich-Massagué et al., 2018] los autores también reconocen la ausencia de estudios alrededor de las arquitecturas en NMGs. De acuerdo con esto, el objetivo del trabajo es resumir y organizar la información que se encuentra al respecto, formando una guía para la interpretación de todas las arquitecturas. Para esto los autores definen tres aspectos importantes a la hora de categorizar las arquitecturas. El primer aspecto es la topología *layout* que hace referencia a la forma en que están conectadas las MGs. El segundo es la tecnología de línea que hace referencia a la naturaleza de las MGs, es decir, si la conexión es entre MGs AC o DC. El tercer y último aspecto trata de la tecnología de la interconexión, donde se utilizan transformadores tradicionales para interconexiones AC-AC

o electrónica de potencia para interconexiones híbridas. Partiendo de estos tres aspectos, los autores definen tres topologías distintas. La primera es la conexión de MGs en paralelo con la red de distribución. La segunda es la conexión de diferentes microrredes en serie, pero con la ausencia de una red de distribución. Y, por último, está la conexión serie-paralelo mixta, que reúne las características de las dos anteriores. Estas tres topologías son correspondientes con las propuestas por [Liu et al., 2016].

2.1.2. Comunicaciones

En la literatura se encuentran los sistemas de comunicaciones estrechamente vinculados con los sistemas de control y operación. En otras palabras, son estos sistemas los que definen la estructura requerida en las comunicaciones. Es importante determinar el modelo de control y operación para conocer los requerimientos de información en estos procesos, poder determinar quienes deben estar comunicados y si los canales deben ser unidireccionales o bidireccionales. Por estas razones, en la literatura se encuentra diversos modelos de sistemas de comunicación que se acoplan a las necesidades de cada artículo.

En [Bullich-Massagué et al., 2018], las comunicaciones en NMGs están ligadas a la arquitectura de control empleada en el sistema. De acuerdo con los autores, en la literatura se distinguen tres tipos de control y operación de NMGs. Un primer control centralizado, en el que la información es compartida a través de canales de comunicación directos entre cada MG y el controlador central. Un segundo control descentralizado, donde la información no se comparte, por el contrario, el control se hace a través de variaciones locales de voltaje y frecuencia. Y, un control distribuido donde la información se envía únicamente entre controladores de cada MG.

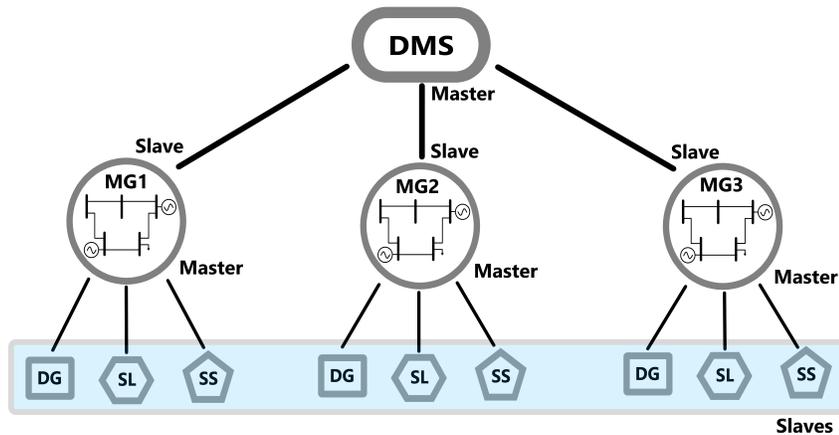
En [Zhou et al., 2020], los autores muestran un sistema de NMGs donde cada MG tiene su propio controlador maestro (CM). Cada uno de los CMs se comunica únicamente con algunos DERs dentro de la MG, y a su vez, estos DERs van a coordinar la operación de aquellos que no estén comunicados directamente con el MC. A nivel global, los MCs están comunicados con el controlador maestro central (CMC) que tiene la tarea de coordinar el funcionamiento de la NMG. Teniendo en cuenta que los sistemas de comunicación son susceptibles a fallos, los autores muestran algunos escenarios y el comportamiento de la NMG en estos casos. El primer caso es cuando el CMC falla, siendo este el punto central donde se colecta toda la información. Para el funcionamiento de la NMG, en este escenario los CM deben establecer comunicación directa con los CMs vecinos. El segundo caso es la falla de alguno de los CM, habiendo fallado el CMC. Para este escenario, los DERs que mantenían comunicación con el CM fallado, deben establecer las comunicaciones con los CMs adyacentes y retomar la coordinación de la MG. Por último, el tercer caso trata de la falla del CMC y de todos los CM. La recuperación de las comunicaciones en este escenario es a través de los DERs seleccio-

nados dentro de cada MG. Los DERs seleccionados en todas las MGs establecen canales de comunicación con sus pares de otras MGs hasta lograr un sistema estable de comunicaciones.

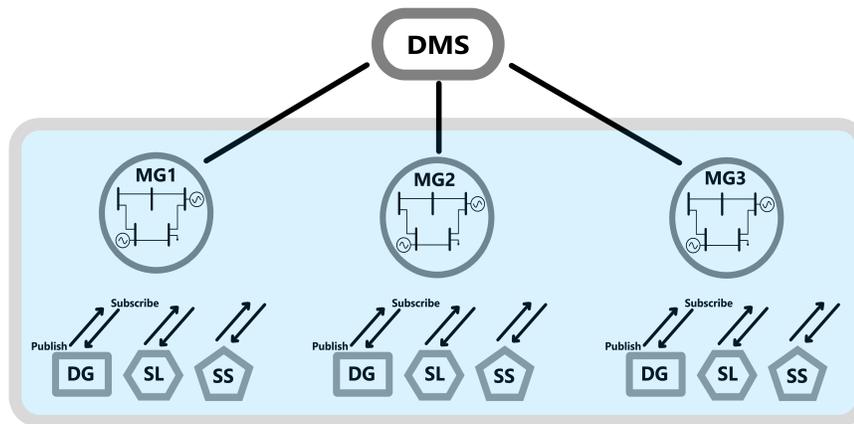
En [Li et al., 2017], los autores reconocen la estrecha relación de los sistemas de comunicación con los sistemas de control. Allí se muestra una arquitectura de control jerárquica, donde existe un operador de red que envía comandos de control a los controladores de cada MG, por medio de un sistema de comunicaciones bidireccional. Por otro lado, los controladores de las MGs envían igualmente comandos de control a los controladores locales de cada MG. (DG, SS, SL, etc.). De acuerdo con los autores, las redes de comunicación usualmente empleadas en control, monitoreo y gestión de las MGs son prediseñadas para cumplir cierta función específica. Sin embargo, los autores expresan que con ayuda de las nuevas tecnologías de información y comunicación (TICs) esto puede ser diferente. Por medio de los ICTs los autores implementan un diagrama de comunicaciones basado en redes diseñadas por software y esto permite cambiar la función original de las redes de comunicaciones, dependiendo de las necesidades de operación. En este artículo queda en evidencia la estrecha relación de los sistemas de control con los sistemas de comunicaciones.

Por otro lado, en [Abhinav et al., 2018] proponen un sistema de control distribuido para la sincronización de MGs en ambientes de interconexión. Las NMGs siempre están expuestas a ataques en sensores y actuadores, en las líneas de comunicación y hasta jaqueos en algunos controladores. Para los ataques en las líneas de comunicación los autores proponen un protocolo de control basado en niveles de confianza. Teniendo en cuenta que la propuesta de control de este artículo es distribuida, la red de comunicaciones funciona igualmente de manera distribuida y no hay niveles de jerarquía. Por lo tanto, esta red consiste en líneas de comunicación bidireccionales entre los controladores de cada MGs y su análisis recae en el estudio de grafos. En [Harmon et al., 2018] proponen un sistema de comunicaciones de dos etapas basado en redes inalámbricas. La primera etapa es un sistema para cada MG basado en el protocolo IEEE 802.11s, que reduce la superficie de ataques y aumenta la velocidad de los mensajes. La segunda etapa son las comunicaciones entre MGs y se realiza a través de una nube. La comunicación entra cada MG y la nube se realiza por medio de un puerto o *gateway*. La información en esta segunda parte funciona como el modelo comúnmente conocido *publish-subscribe*.

En la literatura, algunos autores intentan resumir la información disponible sobre sistemas de comunicación. En [Liu et al., 2016] y [Alam et al., 2019], los autores mencionan que los sistemas de comunicaciones son inherentes a los sistemas de control, y por esto se puede establecer un sistema de comunicaciones tanto para el control jerárquico y otro para el control distribuido. En el control jerárquico los controladores locales se comunican con el controlador central u operador del sistema para recibir comandos de control. Por otro lado, en el control distribuido, los controladores locales determinan sus propias acciones de control y



(a) Arquitectura de comunicación Maestro-Esclavo



(b) Arquitectura de comunicación Publish-Subscribe.

Figura 2-3: Comunicaciones para control jerárquico y distribuido, [Alam et al., 2019].

comparten la información con los demás para lograr comportamientos óptimos por medio de la interacción. Dentro de los sistemas de comunicación de las arquitecturas de control jerárquicas, uno de los más utilizados es el maestro-esclavo. En este sistema el maestro es quien inicia los intercambios de información, lee la información del esclavo y determina las acciones de control siguientes. Usualmente un controlador puede hacer las veces de maestro y las veces de esclavo.

En la Figura 2.3(a) se puede observar un ejemplo del esquema maestro-esclavo. Para el control distribuido, un sistema de comunicaciones utilizado es el publish-subscribe, donde cualquiera de los extremos puede leer la información del otro y ninguno determina las acciones de control de los demás. En la Figura 2.3(b) se muestra un ejemplo del modelo *publish-subscribe*.

2.1.3. Operación y control

El control y la operación son quizá los aspectos mas frecuentes en la literatura. En ellos recaen tareas como el control y regulación de voltaje y frecuencia, así como el intercambio óptimo de potencia en las NMGs. De acuerdo con [Alam et al., 2019] y [Islam et al., 2021], el control puede dividirse en dos grandes categorías, control jerárquico y control distribuido.

Control jerárquico

Generalmente, el control jerárquico puede considerarse como un sistema de tres niveles, donde el nivel primario se encarga de tareas locales y el nivel terciario de tareas globales. La Figura 2-4 muestra una gráfica representativa del control jerárquico en NMGs.

En [Wu et al., 2020] los autores presentan una arquitectura de control jerárquica cuyos objetivos son realizar regulación de voltaje y frecuencia y hacer un control de intercambio de potencia (activa y reactiva) en las NMGs. Los niveles de control los dividen en nivel de MG (primario y secundario) y nivel de NMG (terciario y cuaternario). Los controladores primarios regulan las salidas de potencia de los DGs por medio de controles *droop*. Los secundarios se encargan de controlar la frecuencia de la MG y el nivel de voltaje de los puntos de acople común (PCCs, por sus siglas en inglés), recibiendo los valores de referencia del control terciario y enviando señales de control de compensación a los controladores primarios. Por otro lado, los controladores terciarios se encargan del intercambio de potencia en las MGs controlando el flujo en los PCCs. Estas acciones las lleva a cabo modificando los valores de referencia de frecuencia y voltaje de los PCC que envían a los controladores secundarios. Por último, los controladores cuaternarios se encargan de la frecuencia global del sistema y los valores críticos de voltaje.

Al igual que la arquitectura de control, las comunicaciones se dividen en dos niveles. El nivel de NMG se encarga de comunicaciones entre MGs, mientras el nivel inferior se encarga de comunicaciones entre DGs. Por otra parte, en [Golsorkhi et al., 2021] los autores proponen una arquitectura de control jerárquica para NMGs. El objetivo principal es un esquema de control que permita corregir errores en el *load sharing* cuando se presentan desbalances en la carga. En esta propuesta existe un tipo de controlador para los DERs, que utiliza un *control droop V-I* para un adecuado intercambio de corrientes. Otro controlador de cada MG cuyo objetivo es mantener el voltaje de los PCC utilizando secuencias positivas y eliminando secuencias negativas en los voltajes. Y, por último, un centro de control de las NMGs que únicamente determina los intercambios de potencia activa y reactiva.

En [Wang et al., 2020a] los autores proponen una arquitectura de control multicapa que luego es implementada en un hardware multiagente, a cargo de un agente por cada MG. Sin embargo, el funcionamiento de las diferentes capas de control califica como una arquitectura

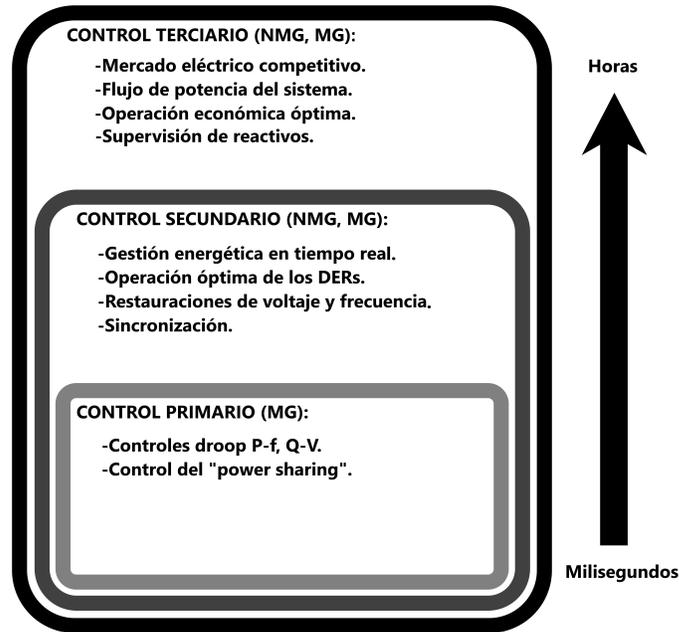


Figura 2-4: Esquema general de una arquitectura de control jerárquica, [Islam et al., 2021].

de control jerárquica. El propósito del sistema es cumplir con diferentes funciones, a través de sus diferentes capas y en diferentes escalas de tiempo. El control primario coordina las acciones de control de la MG sobre los DGs con las acciones de control de la NMG sobre la MG. El control secundario, al igual que en la mayoría de las arquitecturas, se ocupa del control de voltaje y frecuencia. Y, por último, el control terciario minimiza las pérdidas de las NMGs.

Por otra parte, en [Castro et al., 2020] los autores proponen inicialmente un sistema de control distribuido, alegando que los controladores locales llevan a cabo tareas de manera independiente. Sin embargo, la estructura de control propuesta necesita de un agente central ubicado en la subestación MT-AT, que recopila toda la información de los controladores locales para coordinar tareas a nivel global. De esta manera, la estructura de control está compuesta por 3 niveles, convirtiéndose en un control jerárquico. A diferencia de la mayoría de los autores, en este artículo el nivel primario se asocia con tareas de carácter global, mientras el tercer nivel de control son los controladores locales. En el primer nivel, el sistema de gestión a nivel de distribución se ocupa de la operación completa de todo el sistema de distribución (DS). En el segundo nivel, el controlador autónomo central gestiona la interacción de cada MG con el DS. Por último, en el nivel 3 el controlador central de MG coordina todos los elementos dentro de esta (SS, DG, SL, etc.).

En [Che et al., 2015] los autores proponen un esquema de control de tres niveles para la operación coordinada y económica de una microrred comunitaria. Allí el control primario y

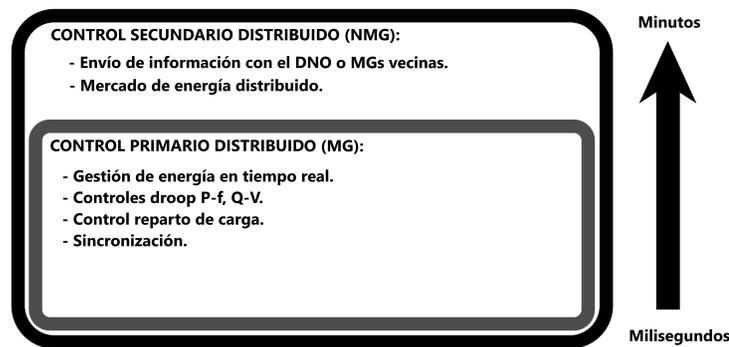


Figura 2-5: Esquema general de una arquitectura de control distribuida, [Islam et al., 2021].

secundario, implementado en cada controlador maestro (CM), tienen como objetivo regular los valores de voltaje y frecuencia en cada MG. Y, en el nivel terciario, el controlador maestro central (CMC) coordina la operación óptima del sistema y de los intercambios en la MG comunitaria, calculando y comunicando nuevos puntos de operación a cada CM.

Los sistemas de control jerárquicos en NMG no solo tienen objetivos de gestión y operación en condiciones normales, sino también en estados de falla o eventos como desastres naturales. En [Farzin et al., 2016] los autores proponen un esquema de control jerárquico de dos niveles para mantener la confiabilidad del sistema en estados de falla en MG comunitarias. Para esto proponen un control de dos niveles. En el nivel secundario o nivel II, el MC de cada MG gestiona y coordina los recursos propios e internos de forma autónoma. Este control puede ser llevado a cabo de forma centralizada o descentralizada por cada MG sin afectar el funcionamiento del esquema completo. Es importante notar que, si el control secundario es centralizado, igual se necesita que cada MC actúe como representante de la MG en el control primario o nivel I. Por otro lado, quién está encargado del control primario en esta propuesta es el operador de la red de distribución. Este debe coordinar el intercambio de potencia de las NMGs en casos de falla, garantizando que la confiabilidad del sistema no se vea afectada y que los recursos disponibles sean distribuidos de manera óptima.

Control distribuido

Las arquitecturas de control distribuidas son la contra parte de las jerárquicas. Estas tienen como objetivo dividir las tareas de coordinación entre todos los involucrados, logrando así mejores tiempos de operación y un mejor desempeño. Un modelo de control distribuido es descrito en [Islam et al., 2021] y se muestra en la Figura 2-5.

En [Zhou et al., 2020] los autores proponen un sistema de control distribuido basado en consenso para NMGs. El sistema consiste en dos niveles de control encargados de la frecuencia, voltaje y reparto de potencia. El nivel de control bajo se encarga de mantener la sincronía en

los valores de frecuencia de los DERs, garantizando al mismo tiempo un adecuado reparto de potencia. El nivel de control alto mantiene igualmente la sincronía en la frecuencia de todas las MGs, mientras controla el reparto de potencia y los ángulos de fase de los PCC. La red de comunicaciones utilizada en este artículo es un grafo conectado, en el que cada MG tiene un DER seleccionado (*pinned*) para interactuar con sus respectivos pares de otras MGs. Los demás DERs de cada MG siguen por medio del consenso y de la red de comunicaciones local al DER seleccionado.

De la misma manera, en [Golsorkhi et al., 2018] proponen un esquema de control distribuido de dos niveles. El sistema en consideración está compuesto por Interruptores estáticos, DERs y una red cibernética de comunicaciones. Los objetivos del control son la regulación del voltaje, la frecuencia y el flujo de potencia. El control primario busca garantizar niveles de voltaje y frecuencia por medio de un control tipo droop. El control secundario tiene como tarea modificar los parámetros del control tipo droop para así controlar el intercambio de potencia entre MGs.

En [Yao et al., 2021] los autores proponen un esquema de control para NMGs. Inicialmente el esquema está compuesto por dos niveles, uno a nivel de cada MG (nivel I) y otro a nivel de la interconexión (nivel II), donde todos los controladores tratan de implementar una inercia virtual al sistema. Para el nivel I, el sistema de control se compone de dos controles tipo droop en cada DG, uno para la frecuencia y otro para el voltaje. El control de voltaje, a diferencia de la mayoría, no controla el voltaje de salida de cada DG, sino que, por el contrario, mantienen en el valor de referencia el voltaje del PCC de su respectiva MG. El voltaje de salida de cada DG es luego determinado por las ecuaciones de flujo. En el otro nivel de control, el nivel II, también se implementan dos controles tipo droop por cada MG. La tarea de este nivel es encontrar los valores de referencia para el voltaje y la frecuencia, que deben seguir los controladores del nivel I. Es importante notar, que en este artículo los autores no especifican mayores características de la red de comunicaciones, ni a nivel de MG ni a nivel de NMGs.

En [Zaery et al., 2021] se presenta un sistema de NMGs DC aisladas, es decir, sin conexión a un sistema de distribución. Se presenta un modelo de red eléctrica, un modelo de red de comunicaciones y un sistema de control distribuido cuyo objetivo es realizar un despacho óptimo de los DGs. El modelo de red eléctrica es un esquema tradicional donde cada MG está compuesta por un número de DGs y existe una línea de transporte de energía entre cada pareja de MG que interactúan. Por el lado de las comunicaciones se muestra una red de dos niveles, un nivel de MG (nivel I) y otro nivel entre MGs (nivel II). La interacción entre los dos niveles de comunicación se da a través de DGs seleccionados (*pinned DGs*), que se encargan de comunicar información con los demás DGs de la MG o de enviar información al controlador de la MG en el nivel II de comunicación. La arquitectura de control propuesta

tiene como objetivo el despacho económico, por lo que el principio de funcionamiento es la igualdad en los costos incrementales de los DGs. Consiste en dos capas de control, donde los controladores terciarios se encargan de la interacción entre MGs y los secundarios de los DGs en cada MG. Para el control terciario se ajustan los voltajes de referencia de las MGs buscando igualar los costos incrementales, luego estos valores de referencia se comunican a cada MG. Por otro lado, el control secundario busca que el promedio de voltajes de los DG siga el valor de referencia, mientras iguala los costos incrementales de los diferentes DGs.

Por otra parte, en [Toro and Mojica-Nava, 2016] se propone un modelo de control de frecuencia sin controladores droop para NMGs. Dentro de la propuesta está un nivel terciario de control para lograr el reparto de carga entre un grupo de MGs. El control de flujo entre MGs se consigue por medio de variaciones en la frecuencia del sistema. Los autores presentan un controlador terciario que tiene una acción similar a un controlador primario de un DG, pero que actúa sobre cada MG. Al actuar como un controlador primario, el reparto de carga entre las MGs está garantizado. Por otro lado, el control secundario busca corregir las desviaciones en frecuencia resultantes de un eventual control primario. Las acciones de control (término de corrección para la frecuencia angular) a nivel secundario resultan de un algoritmo de consenso sobre las potencias normalizadas de los DGs.

2.2. Sistemas de gestión de energía en NMGs

De acuerdo con [Islam et al., 2021], [Alam et al., 2019] y [Zou et al., 2019], los sistemas de gestión de energía (EMS, por sus siglas en inglés) están presentes en los sistemas de control independientemente de su arquitectura. Por un lado, en las arquitecturas de control jerárquicas los EMS son el mismo control terciario según se expresa en [Zambroni de Souza and Castilla, 2018]. Y por el otro lado, en las arquitecturas distribuidas de control el EMS es una tarea realizada a nivel de cada MG, donde las metas globales se consiguen por medio de un sistema de comunicaciones entre los controladores de microrred y el operador del sistema de distribución. En la literatura existen algunas clasificaciones según la arquitectura de funcionamiento del EMS. En [Hussain et al., 2018] y [Khavari et al., 2020] los autores exponen sistemas de gestión centralizados, descentralizados, distribuidos e híbridos. En esta sección se resumen los aportes más relevantes en los EMS de NMGs siguiendo dicha clasificación.

2.2.1. Centralizado

Dentro de los EMS más comunes se encuentra el centralizado, debido a la cantidad de algoritmos de optimización centralizados que existen. Un esquema general de este tipo de EMS se puede apreciar en la Figura 2-6.

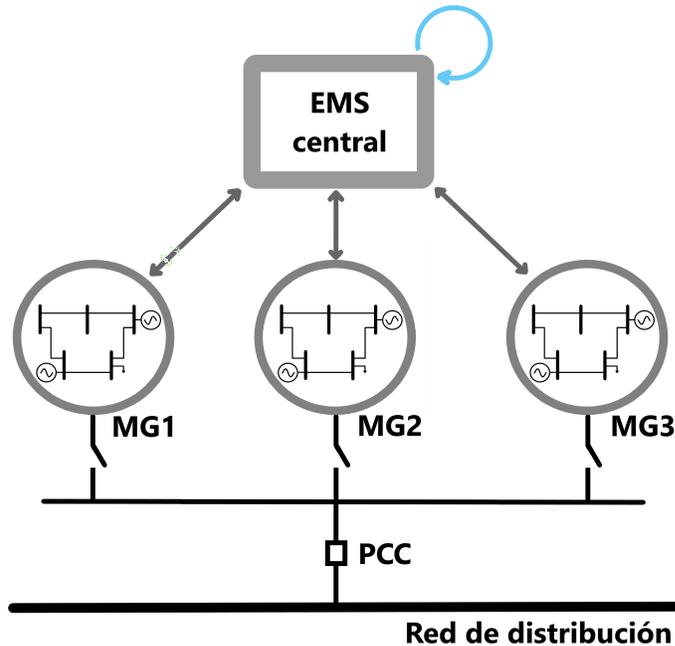


Figura 2-6: Esquema general de un EMS centralizado, [Khavari et al., 2020].

Diferentes autores han desarrollado EMS en sistemas centralizados, siendo estos los más comunes. En [Bui et al., 2018] presentan un sistema de gestión jerárquico para la coordinación de MGs en comunidad, que considera conceptos de potencia ajustable y respuesta de demanda. La propuesta es un sistema de gestión de dos niveles. En el nivel más alto está el EMS del sistema NMG que realiza una optimización global, teniendo en cuenta información proveniente de sistemas de baterías del DS, un operador de mercado, plantas de generación controlables del DS y de cada una de las MGs. Por otro lado, en el nivel bajo de la arquitectura de control están los EMS de las MGs que se encargan de realizar optimizaciones locales con la información que reciben de los DGs tanto renovables como despachables, de las cargas ajustables y sistemas de almacenamiento. El funcionamiento del sistema de gestión propuesto inicia con los EMS de las MGs, para determinar la cantidad de energía que les hace falta, la cantidad de energía excedente, el costo de los generadores locales y la cantidad de potencia ajustable. Este procedimiento local permite decidir a las MGs si participan del proceso de optimización global o no. Por último, el EMS del sistema NMG realiza una optimización global con las MGs que decidieron participar y los demás agentes para determinar los puntos de operación óptimos. Este proceso es realizado para un periodo de 24 horas. Es importante mencionar que la incertidumbre de las energías renovables no es tomada en cuenta en este trabajo.

En [Ahmadi and Rezaei, 2020] se propone un algoritmo de optimización estocástico de dos

niveles. El propósito de los autores es brindar una estrategia de gestión de energía para NMGs que operan aisladas de un sistema de distribución tradicional. Para el desarrollo de la propuesta los autores establecen un sistema de MGs interconectadas a través de una red eléctrica y otra de comunicaciones. Las MGs se conectan las unas con las otras radialmente (red eléctrica y comunicaciones) para realizar los intercambios de energía. Los autores establecen dos tipos de operación en el sistema; la operación interconectada se da cuando todas las MGs están en óptimas condiciones y pueden interactuar, mientras que la operación aislada se da únicamente cuando una MG entra en estado de falla. Sin embargo, son enfáticos en que el objetivo del trabajo es la operación en interconexión. Para llevar a cabo la estrategia de gestión propuesta, cada MG cuenta con un EMS local que realiza la operación de la MG en modo aislado y un EMS global que opera las NMGs en modo interconectado. De acuerdo con esto, la estrategia de gestión consiste en dos niveles de optimización (exterior e inferior). El nivel exterior se encarga de la programación de los DGs, RESs, cargas eléctricas y sistemas de almacenamiento, como también de los intercambios de potencia entre MGs. Para el intercambio de potencia los autores proponen un esquema basado en precios de energía, que son obtenidos a partir de los costos marginales de cada MG. El nivel interior de la estrategia de gestión se encarga de la operación individual de MGs cuando estas entran en estado de falla. Adicionalmente, los autores plantean el problema de optimización, desarrollado por el EMS global, como un problema lineal entero mixto donde integran las incertidumbres asociadas con los RES, las cargas y los precios de mercado por medio de escenarios de probabilidad. Por último, es importante mencionar que el esquema de gestión escogido por los autores es centralizado.

En [Jafari et al., 2020] los autores proponen una estrategia de mercado de electricidad para la gestión de energía y mejoramiento en la confiabilidad del sistema. En este trabajo los autores trabajan con un sistema eléctrico compuesto por 3 MGs interconectadas a través de una barra común. Las MGs operan normalmente en una topología de interconexión, sin embargo, pueden operar en modo aislado en caso de encontrarlo conveniente. El punto fuerte de este artículo es buscar distribuir la maximización de beneficios entre todas las MGs de la interconexión, es decir, que el ingreso porcentual generado después de la optimización será el mismo para todas las MGs que pertenezcan a las NMGs. Es importante resaltar, que la estrategia de mercado seguida por los autores no busca ser un mercado competitivo, esto teniendo en cuenta que el precio de compra y venta no resulta de las dinámicas propias de un mercado. En la estrategia de mercado propuesta, los precios finales de las transacciones son determinados únicamente por el vendedor. Además, en la determinación de los precios se consideran tres escenarios diferentes que contemplan el papel de la MG en cada una de las transacciones, es decir, si es comprador o vendedor, o si es comprador y vendedor al mismo tiempo. Finalmente, el problema de optimización del EMS es resuelto por un controlador central de las NMGs a través del algoritmo *Wild Goat Algorithm*.

En [Karimi and Jadid, 2020] se propone una estrategia de gestión de energía para NMGs, basada en un algoritmo de optimización multiobjetivo que considera los costos totales de operación, así como la independencia de las NMGs de la red de distribución, y un sistema de respuesta de la demanda. El sistema propuesto por los autores está compuesto por una red de distribución, un operador central del sistema de NMGs y diferentes MGs interconectadas entre sí y con el operador central. La tarea principal de este operador central es determinar la gestión óptima del sistema a través de información previamente solicitada a cada una de las MGs. Dentro de las MGs, las cargas eléctricas se pueden clasificar en flexibles e inflexibles, donde las primeras permiten a la MG cambiar los picos de demanda a horas de menor exigencia. El algoritmo de optimización (ejecutado por el operador central) escogido para encontrar la solución óptima es un multiobjetivo conocido como *compromise programming* de carácter estocástico. Esta optimización se basa en definir una solución ideal o utópica del problema eliminando las restricciones. Basado en el método de distancia, se encuentra la solución dentro del conjunto de soluciones factibles que se encuentre más cerca de la solución ideal, de esta manera el algoritmo se transforma de uno multiobjetivo (costos e independencia) en uno de objetivo sencillo (distancia). Además, los autores proponen una generación de escenarios a partir de las funciones de densidad de probabilidad para generación fotovoltaica (beta) y eólica (Weibull).

2.2.2. Híbrido

Los EMS híbridos son llamados así por ofrecer un punto medio entre los modelos centralizados y los descentralizados. Las principales características son MGs que realizan procesos de control y optimización de manera independiente, sin estar subordinadas únicamente al EMS del sistema NMGs. Adicionalmente, al igual que los modelos centralizados, tienen un único PCC con la red de distribución. En la Figura 2-7 se puede apreciar un modelo de EMS híbrido.

Aunque los EMS híbridos son quizá los menos frecuentes en la literatura, hay aportes que merecen mencionarse. En [Wang et al., 2020b] los autores proponen un método transactivo P2P para la gestión de energía de una MG urbana. A pesar de que en el trabajo no se consideran MGs interconectadas, en este sistema el modelo de prosumidor es tan amplio que puede considerarse como una MG individual. La MG urbana está compuesta por prosumidores (residenciales y empresariales) y un proveedor de servicios de balance de energía, que hace las veces de red de distribución. El método transactivo para la gestión de energía está compuesto por tres etapas. La primera etapa se encarga de realizar un despacho de todos los elementos de cada prosumidor (DGs, cargas, baterías, etc.), donde los resultados son las potencias disponibles, costos y utilidades marginales. En esta primera etapa los prosumidores guardan la privacidad sobre la información de todos sus activos. La segunda etapa de la metodología propuesta consiste en encontrar el mejor precio de compra y venta de energía,

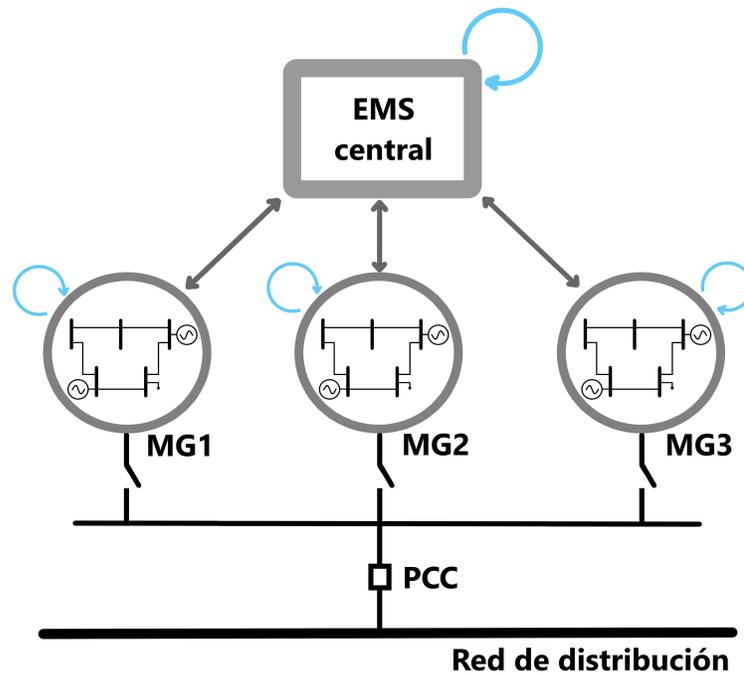


Figura 2-7: Esquema general de un EMS híbrido, [Khavari et al., 2020].

basándose en los costos y utilidades marginales de la primera etapa, y con los historiales de precios que se van generando. Por último, la tercera etapa se encarga de las transacciones que tendrán lugar en el sistema por medio de 5 pasos. Los pasos son anuncio, procesamiento, solicitud, confirmación y ejecución. Dentro de esta etapa del proceso se garantiza que todas las transacciones se cumplan, ya sea generando y consumiendo de acuerdo con los compromisos, o comprando al proveedor de servicios en caso de no poder cumplir.

En [Khavari et al., 2020] se presenta un trabajo sobre sistemas de gestión en NMGs. Para esto los autores resumen los tipos de EMS que existen en NMGs, los cuales son centralizado, descentralizado, distribuido, anidado e híbrido. La propuesta de los autores se clasifica como un EMS de tipo híbrido teniendo en cuenta su arquitectura y composición. El sistema está compuesto por un conjunto de MGs conectadas a una barra común, que a su vez se conecta con el DS a través de un único PCC. Para las comunicaciones, el conjunto de NMGs cuenta con un agregador que hace las veces de coordinador de las MGs y este a su vez se comunica con el DS. La propuesta de solución para la gestión de energía es un algoritmo de dos niveles. En el primer nivel se encuentra la programación de los recursos a nivel de cada MG individual, planteada como un problema de maximización de los ingresos propios. La tarea de cada MG es encontrar el máximo de sus ingresos a medida que va variando el uso de capacidad del PCC (teniendo en cuenta que solo hay un PCC para todas las NMGs). De este primer nivel, cada MG obtiene una curva característica de “ingresos máximos vs

capacidad utilizada” y eventualmente esta curva es enviada al agregador. El segundo nivel, a cargo del agregador, está dividido en dos etapas diferentes. La primera de estas etapas se plantea como un problema de optimización que maximiza la suma de los ingresos de todas las MGs, con la restricción de que la suma de potencias no sobrecargue al PCC, para finalmente encontrar la potencia (compra/venta) de cada MG. La segunda etapa busca por medio de teoría de juegos realizar una justa repartición de los ingresos conseguidos en el proceso. La tarea del agregador es enviar la potencia y el ingreso respectivo de vuelta a cada MG.

En [Wang et al., 2018] se propone una estrategia de gestión de energía de dos etapas para la coordinación de NMGs. El sistema objetivo está compuesto por dos niveles de comunicación. En el nivel superior se encuentra el EMS de la comunidad de MGs, es decir, de las NMGs y en nivel inferior se encuentran los EMS de todas las MGs individuales. Tanto el nivel superior como el inferior están compuestos por elementos como fuentes de energía renovable (RES), generadores distribuidos controlables (CDGs), sistemas de almacenamiento de energía de baterías (BESS) y cargas eléctricas (controlables y no controlables). De igual manera, teniendo en cuenta que la estrategia planteada considera la incertidumbre que los RES y las cargas inyectan en la operación del sistema, en el nivel superior también se encuentran sistemas de información que generan los pronósticos de energía y demanda. Por otro lado, la estrategia de gestión es formulada como un proceso de dos etapas. Una primera etapa a cargo de la programación en el día anterior y otra segunda etapa encargada de la operación en tiempo real. Para la primera etapa (día anterior) y considerando que el sistema tiene dos niveles de comunicación, la propuesta de solución consiste en un algoritmo de optimización jerárquico de dos niveles. El nivel inferior (MG) se enfoca en minimizar costos de operación por medio de un modelo determinista. El nivel superior incorpora las incertidumbres (varianza media de Markowitz) del todo el sistema, considerando incluso la incluida por los precios de energía en la red. En la segunda etapa de la estrategia de gestión (tiempo real) se realiza un despacho en tiempo real para balancear las fluctuaciones del sistema y disminuir los costos causados por los desbalances. Finalmente, teniendo en cuenta que los problemas de optimización constituyen MILP, son resueltos por medio del solver CPLEX en Matlab.

2.2.3. Anidado

En [Hussain et al., 2018] se propone una estrategia de gestión de energía para NMGs que preserva la privacidad y ofrece un sistema resiliente. La idea principal de este trabajo es un sistema de NMGs anidadas, es decir, se van agrupando MGs una dentro de otra. El criterio de decisión para ver el orden de anidado de las MGs es la prioridad de las cargas de cada MG, por ejemplo, la MG del nivel inferior se hace cargo de las cargas críticas y la MG del nivel superior se hace cargo de las cargas no críticas. Para realizar una apropiada gestión de energía, cada MG tiene su propio EMS local que soluciona un problema de optimización MILP. El EMS del nivel más bajo (MG 1, cargas críticas) optimiza sus recursos determinando

si tiene excedente o déficit de energía, para enviar esta información al EMS de siguiente nivel. En caso de excedente, la MG 1 representa un DG para el siguiente nivel (MG 2), en caso contrario se comporta como una carga. Luego, el EMS del siguiente nivel (MG 2) realiza el mismo proceso de optimización para enviar la información de excedente/déficit al siguiente nivel. Este proceso se sigue hasta completar la totalidad de los niveles. En caso de no conseguir balance y de estar funcionando en modo aislado de la red, los autores proponen dos algoritmos adicionales con el fin de conseguir cumplir las restricciones. El primero de estos algoritmos busca cumplir la restricción de balance en caso de excedente de energía, apagando los generadores siguiendo un orden de prioridad. Por otro lado, el otro algoritmo se emplea en casos de déficit para cumplir con el balance por medio de algunos deslastres de carga. Finalmente, los autores exaltan la privacidad de la información asegurando que a medida que se sube de nivel, la información de todos los niveles inferiores está mezclada. Adicionalmente, se propone una metodología de encriptamiento para seguridad adicional.

2.2.4. Descentralizado

Diferentes autores han abordado el tema de los EMS en las NMGs con alternativas descentralizadas. En esta sección se muestran algunos trabajos relacionados. Además, en la Figura 2-8 se aprecia un modelo general de EMS descentralizado en NMGs.

En [Gao et al., 2018] los autores proponen una estrategia descentralizada para la gestión de energía eléctrica en NMGs. El sistema del artículo está compuesto por un DS, varias MGs interconectadas en paralelo con el DS y un sistema de potencia en alta tensión. En la propuesta, tanto el DS como las MGs actúan de manera independiente, únicamente actuando en beneficio propio, por lo tanto, se constituye como una interacción no cooperativa. De igual manera los autores se plantean la solución del problema considerando las incertidumbres incluidas con los RES y las cargas. Para el manejo de la incertidumbre, los autores utilizan un conjunto de incertidumbres en lugar de un modelo con escenarios, teniendo en cuenta que los escenarios aumentan la carga computacional de la solución. La estrategia de gestión es un modelo robusto de dos etapas, donde la primera se encarga de la parte controlable y determinista del problema (día anterior), y la segunda se encarga de las variaciones debido a la incertidumbre (tiempo real). Por último, la propuesta de solución es un algoritmo descentralizado basado en el método de multiplicadores de dirección alternante (ADMM, por sus siglas en inglés) modelado como un problema cónico de segundo orden.

2.2.5. Distribuido

En los EMS distribuidos cada una de las MGs tiene la tarea de realizar su optimización sin necesidad de ningún coordinador como EMS central. Los objetivos globales de la gestión se consiguen únicamente a través de interacciones entre MGs. La Figura 2-9 muestra un

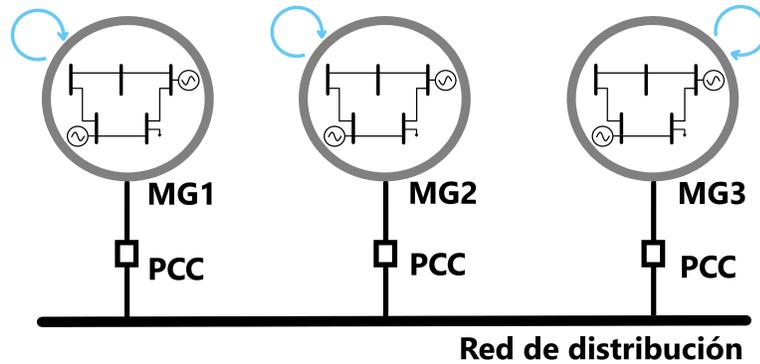


Figura 2-8: Esquema general de un EMS descentralizado, [Khavari et al., 2020].

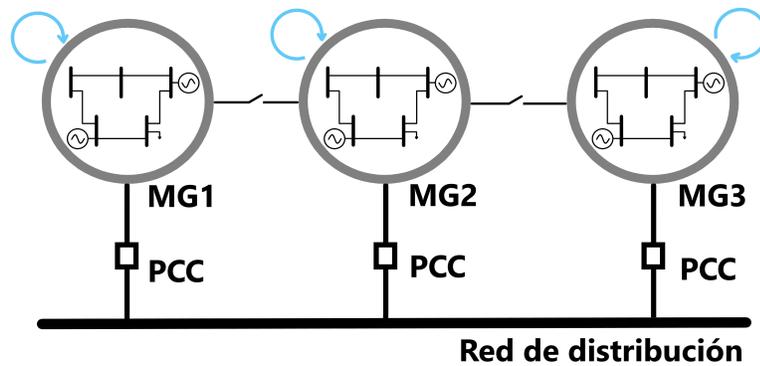


Figura 2-9: Esquema general de un EMS distribuido, [Khavari et al., 2020].

esquema general del modelo distribuido.

En la literatura los EMS distribuidos han tomado importancia por sus beneficios en temas de escalabilidad. Por ejemplo, en [Wang et al., 2015], los autores proponen un EMS para la coordinación de MGs con un DS. Dentro de las características importantes de la propuesta, está la independencia del DS y de las MGs como entidades independientes, es decir, el despacho óptimo se consigue por medio de interacciones entre estos. El objetivo de todas las entidades es minimizar sus propios costos de operación cumpliendo las restricciones correspondientes. Es importante mencionar, que los autores no consideran variaciones en la topología, es decir, las MGs están conectadas en todo momento con el DS. Otra característica importante es que los autores consideran RESs dentro de los DGs del sistema, lo que resulta en incertidumbres que son manejadas por medio de la formulación de escenarios. El planteamiento del problema es un modelo estocástico de dos niveles, donde el nivel superior es la optimización del DS y el nivel inferior la optimización de las MGs. Cada nivel está compuesto

por dos etapas, la primera corresponde con un modelo base determinista que esta basado en predicciones, y la segunda son errores introducidos por las incertidumbres de cada RESs en la operación real. Debido a que los problemas de optimización del DSO como de las MGs están estrechamente relacionados, estos se pueden transformar en problemas matemáticos de restricciones complementarias, a partir de las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker. Estos problemas matemáticos de restricciones complementarias son linealizados para llevarlos a un problema de optimización lineal entero mixto y así poder ser resueltos por solvers comerciales.

Más recientemente, en [Wang et al., 2016] los autores proponen un EMS distribuido para un sistema compuesto por un DS y diferentes MGs. A diferencia del trabajo anterior, los autores en este consideran dos modos de operación para las MGs, conectado a la red y aislado. La función objetivo de las MGs es diferente en ambos modos, conectadas a la red la función son los costos totales, y cuando están desconectadas la función son variaciones de voltaje y minimización de deslastres (garantizando el servicio). En este nuevo trabajo, el problema contempla variables que interrelacionan las optimizaciones de las MGs y el DS. Estas variables de interrelación son los intercambios de potencia y permiten llevar a cabo negociaciones. La propuesta de los autores es un algoritmo de optimización estocástico de dos etapas basado en el *progressive hedging*, que permite descomponer el problema en escenarios y hallar una solución para cada uno y por medio de factores de penalidad garantiza que las soluciones de todos los escenarios convergen al mismo punto. Los autores enfocan el *progressive hedging* en una descomposición de sistemas, más no de escenarios, garantizando que las soluciones (variables de interrelación) converjan al mismo valor. Es decir, la primera etapa del algoritmo busca la convergencia de las soluciones y la segunda actualiza los factores de penalidad.

En [Li et al., 2019] los autores proponen un sistema de gestión de energía para NMG, por medio de un sistema transactivo utilizando *blockchain*. El objetivo principal es formular un mercado minorista en el cual las MGs y el DS puedan participar y encontrar los mejores beneficios de un mercado competitivo. Para llevar a cabo este mercado minorista, los autores proponen un sistema compuesto por tres capas (física, cibernética, mercado). La primera capa pretende modelar el sistema eléctrico de las NMGs con sus restricciones físicas y demás. La segunda, por otro lado, busca representar la plataforma sobre la cual se comunican los participantes del mercado, donde su principio de funcionamiento es recolectar la información de la capa física y llevarla a la capa de mercado, y luego llevar los resultados del mercado a la capa física. Por último, la capa de mercado es donde se llevan a cabo las transacciones que maximizan el beneficio tanto de vendedores como de consumidores. La propuesta utiliza el *blockchain* en la capa cibernética del sistema, buscando mejorar el desempeño del mercado ante eventuales ataques o malos comportamientos de algunos participantes (puntajes de reputación). Lo más relevante de la estrategia de *blockchain* son los contratos inteligentes, que buscan automatizar tareas como el ingreso de participantes o desarrollo de acciones predefinidas por medio de bloques en la cadena.

Por otro lado, en [Liu et al., 2018] los autores proponen un sistema de gestión de energía para un conjunto de MGs cooperativas junto con un operador de área local. La propuesta son 3 sistemas de distribución radiales (34, 69 y 119 nodos) de los cuales se desprenden diferentes alimentadores secundarios. En algunos nodos de estos alimentadores se ubican distintas MGs con el propósito de cooperar y gestionar la energía del sistema de forma distribuida. Para ello se plantea el problema de optimización global (costos de operación, costo de pérdidas y costo de los sistemas de almacenamiento) y las restricciones correspondientes. Teniendo en cuenta que la solución se basa en el método de multiplicadores de dirección alternante (ADMM), y que este algoritmo parte de la descomposición del problema en variables primales y duales, la función objetivo y las variables del problema son agrupadas por MG, operador de área local y variables compartidas. De esta manera los autores formulan el problema original como un problema que puede ser resuelto por medio del ADMM. Adicionalmente, se agregan algunas restricciones que garantizan la convergencia de las variables compartidas al mismo valor durante el desarrollo del algoritmo. Por otra parte, los autores implementan un control de modelo predictivo, que garantiza al sistema un nuevo pronóstico de generación y consumo al momento de realizar la gestión, permitiendo manejar algunos temas de incertidumbre. Por último, es importante resaltar que los autores mencionan un sistema de distribución AC y una red de intercambio de energía DC, pero no mencionan en ningún momento una red de comunicaciones entre las MGs y el operador de área local.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, existen numerosos aportes de sistemas de gestión de energía con una arquitectura de control descentralizada y distribuida, muchos de los cuales son basados en el ADMM. Es decir, el ADMM ha probado en diferentes trabajos ser un algoritmo capaz de gestionar la energía de forma distribuida, aún cuando las formulaciones terminan por centralizar parte de los procesos. En otras palabras, el algoritmo ADMM aún no ha sido aplicado a una formulación que permita desacoplar por completo su estructura, consiguiendo una versión completamente distribuida.

3 Gestión de energía en microrredes interconectadas

Al igual que cualquier sistema eléctrico, los sistemas NMG requieren de técnicas o métodos para su operación y control, garantizando niveles de calidad, seguridad y confiabilidad. De acuerdo con la literatura revisada en el capítulo anterior, la gestión energética es una de las tareas relacionadas con la operación de las NMGs, que a día de hoy presentan mayores desafíos. De igual manera, la forma más frecuente de abordar y modelar este problema en la operación de NMGs es por medio de problemas de optimización. Utilizar la optimización como medio para modelar el problema es a penas lógico, considerando que una de las tareas de los EMS es la minimización de los costos.

En este capítulo se presenta la formulación matemática de la gestión energética como un problema de optimización, utilizando los aportes revisados como punto de partida y considerando el comportamiento no lineal de los sistemas eléctricos.

3.1. Sistemas de gestión de energía

Dentro de los sistemas eléctricos se pueden encontrar diferentes formas de gestionar la energía disponible, buscando minimizar los precios para los usuarios finales. Sin ir más lejos, dentro de los sistemas eléctricos de potencia tradicionales se encuentran metodologías tales como el despacho económico, el Unit Commitment y el flujo óptimo de potencia. Todas estas metodologías buscan gestionar de manera eficiente y económica la energía generada para los usuarios. De igual manera ocurre para sistemas como las MGs o sistemas compuestos como las NMGs.

Teniendo en cuenta que las NMGs son sistemas compuestos por MGs que interactúan entre sí y en ocasiones con el operador, el problema del EMS es igualmente compuesto por problemas individuales. Esta sección presenta la composición del problema individual de MGs y luego cómo se conforma el problema de las NMGs.

3.1.1. EMS en microrredes

Las MGs son sistemas eléctricos de pequeña escala que presentan numerosos beneficios frente a los sistemas eléctricos de potencia tradicionales. Dentro de las principales características de la MG está la habilidad de operar aislada de una red eléctrica tradicional sin afectar

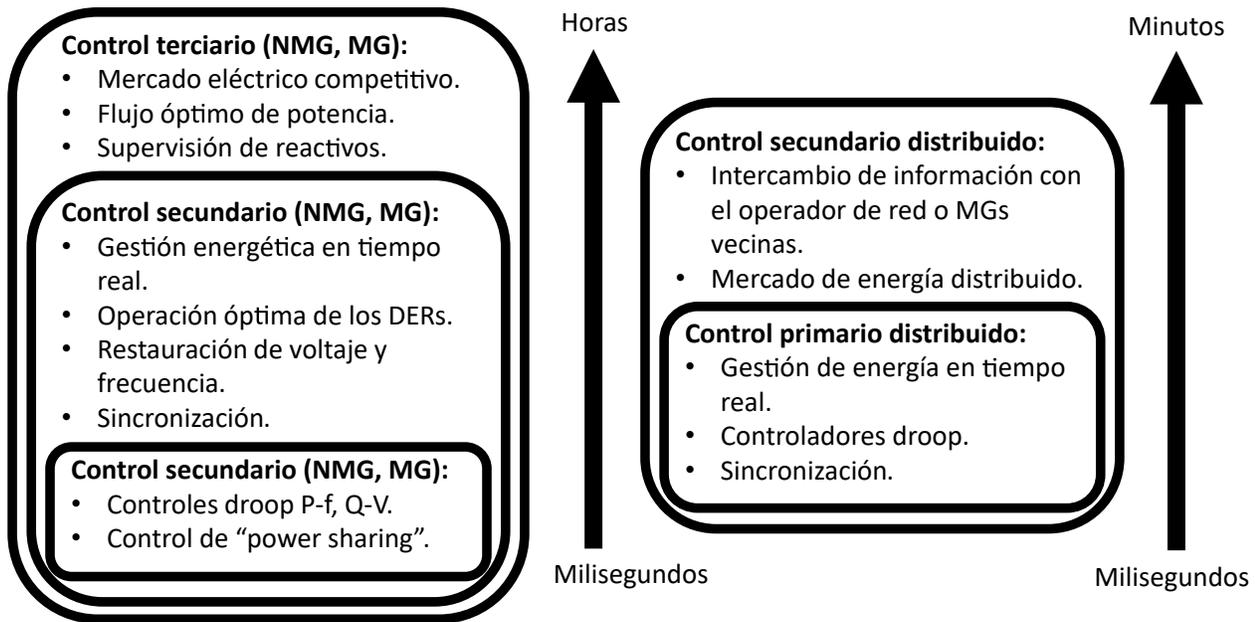


Figura 3-1: Arquitecturas de control jerárquicas y distribuidas [Islam et al., 2021].

sus niveles de calidad, confiabilidad y seguridad. Entonces, se puede decir que una MG es un sistema eléctrico con cargas o consumidores y generación distribuida que, al igual que cualquier otro sistema requiere operación y control.

Considerando que la gestión de energía no es únicamente una tarea de operación sino también de control, usualmente es visto que esta se encuentre relacionada con la arquitectura de control del sistema. De acuerdo con lo mencionado en el capítulo anterior, el control en MGs puede dividirse en dos grandes categorías: jerárquico y distribuido [Alam et al., 2019], [Islam et al., 2021]. La Figura 3-1 resume estos esquemas. En el control jerárquico la gestión energética se realiza en los niveles secundario y terciario. Sin embargo, el nivel terciario es el encargado de organizar los intercambios y usualmente un controlador centralizado es quien gestiona estos intercambios entre los diferentes elementos de una MG. Por otro lado, el esquema distribuido tiene consisten en un sin número de controladores locales, tanto en elementos de generación como de consumo, que interactúan de tal manera que la gestión de energía no recae en un único elemento o controlador. Por esta sencilla razón los esquemas de control distribuido son presentan mejores niveles de confiabilidad.

Aunque las dos arquitecturas de control resuelven el problema de diferente manera, la formulación es básicamente la misma. Consiste en un problema de optimización, cuya función objetivo busca optimizar alguna variable relevante para el sistema ya sean pérdidas, costos, utilidades o incluso emisiones. Por otro lado, las restricciones permiten modelar el comportamiento del sistema eléctrico por medio de un sistema de ecuaciones lineales o no lineales, que delimitan la región factible del problema de optimización. En otras palabras, las restricciones

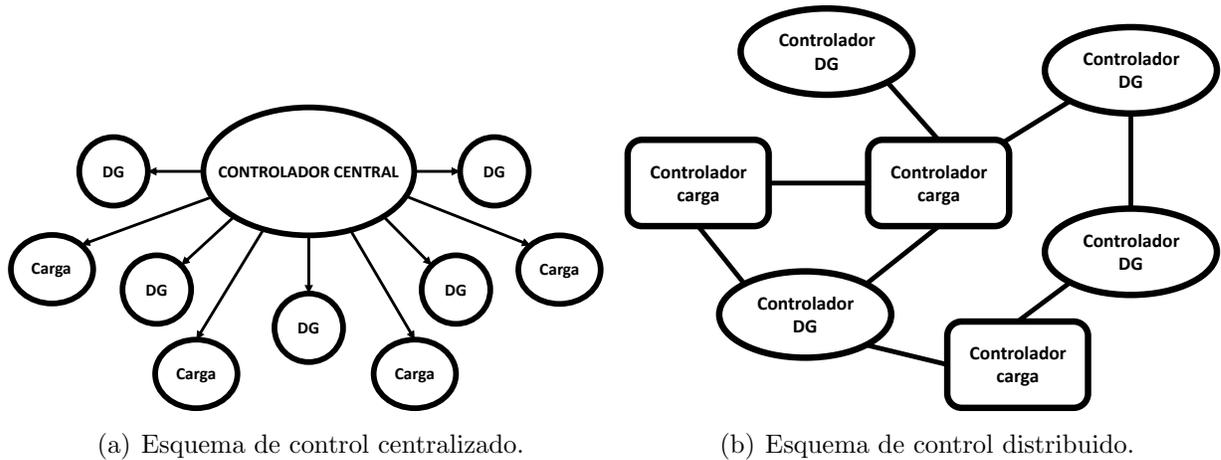


Figura 3-2: Diferentes esquemas de control en MGs.

permiten definir un conjunto de soluciones donde la operación de la MG es viable, mientras se minimiza o maximiza la función objetivo.

En resumen, el controlador (esquema jerárquico) o controladores (esquema distribuido) de una MG tienen un problema de gestión planteado como un problema de optimización compuesto de la siguiente manera.

- **Función objetivo:** busca representar una variable asociada con el funcionamiento y operación de la MG. Tradicionalmente, esta representa los costos o utilidades asociados por la generación o venta de la energía, respectivamente.
- **Restricciones:** las restricciones buscan modelar el comportamiento del sistema y sus componentes. Por un lado, pueden ser restricciones de desigualdad que representen límites operativos de las máquinas o tiempos de arranque y parada. Y por otro lado, pueden ser restricciones de igualdad que modelan el comportamiento y relación de las variables como magnitud y ángulo de tensión, flujos de potencias, etc. Estas últimas suelen contener funciones no lineales que dificultan su solución.

3.1.2. EMS en microrredes interconectadas

Las NMGs son sistemas eléctricos de mayor escala que las MGs aisladas. La diferencia radica en que un sistema de NMGs está conformado por numerosas MGs que pueden operar de manera aislada o conectadas entre ellas. Esta interacción de diferentes MGs mejora sustancialmente los índices de confiabilidad, calidad y seguridad en el sistema.

La Figura 3-3 muestra un modelo base de NMGs. El modelo está compuesto por tres MGs y una red tradicional propiedad de un operador de red. Cualquiera de las 3 MGs tiene la

libertad de operar de manera aislada, ya sea de la red del operador o bien de las demás MGs. De igual manera, la interacción entre los diferentes sistemas se da por medio de los puntos de acople común (PCC, por sus siglas en inglés), que son operados a voluntad del controlador de cada MG. Por todo esto, se puede decir que los sistemas NMGs son sistemas compuestos por MGs y sistemas tradicionales que, a su vez contienen generación distribuida y demanda. Por lo tanto, los sistemas de NMGs requieren de las mismas tareas de operación y control que las MGs aisladas.

De acuerdo con [Islam et al., 2021], el control en las NMGs puede ser igualmente dividido en control jerárquico y distribuido. Por un lado se tiene que el control jerárquico necesita de un controlador central, mientras el distribuido necesita varios controladores que asuman la misma responsabilidad. No obstante, a diferencia de las MGs aisladas, el control distribuido en NMG no necesariamente debe estarlo a nivel de generadores y cargas, sino que es posible distribuirlo a nivel de MG. En otras palabras, en el control distribuido se puede asumir que cada MG tiene un único controlador a cargo de todo localmente.

Como en cualquier sistema eléctrico, la gestión de energía es parte fundamental de la operación. En las MGs aisladas, los precios de la energía eléctrica dependen fuertemente de los costos de los generadores locales, es decir, un alto costo en los generadores distribuidos implicaría un alto precio en la energía para el usuario final. Por otro lado, en los sistemas NMG es posible realizar transacciones de energía a un menor costo que el precio local de la misma. Estos intercambios tienen lugar a través de los PCC disponibles en el sistema y hacen que los precios para el usuario final al igual que los costos de la MG disminuyan. Esta es una de las grandes ventajas de los sistemas NMG frente a los sistemas aislados. Sin embargo, esta ventaja aumenta la dificultad de la gestión energética a pesar de conseguir beneficios económicos.

Al igual que en los sistemas aislados, los sistemas de gestión en MGs interconectadas son modelados por medio de problemas de optimización. No obstante, la dificultad de solución aumenta considerando que el número de variables involucradas es mayor. En el escenario de NMG, no solamente se consideran los costos de los DG presentes en las MGs, sino también los costos asociados a los intercambios de energía y compras al operador. Teniendo en cuenta que el modelamiento es a través de una función objetivo con restricciones, esta depende de un mayor número de variables que involucran no solo potencias generadas, sino compras e intercambios.

En resumen, el controlador o controladores de un sistema NMG tiene un problema de gestión formulado por medio de un problema de optimización compuesto de la siguiente manera.

- **Función objetivo:** Al igual que en MGs aisladas, la función objetivo busca representar una variable asociada con el sistema y su operación. Lo más común es ver funciones

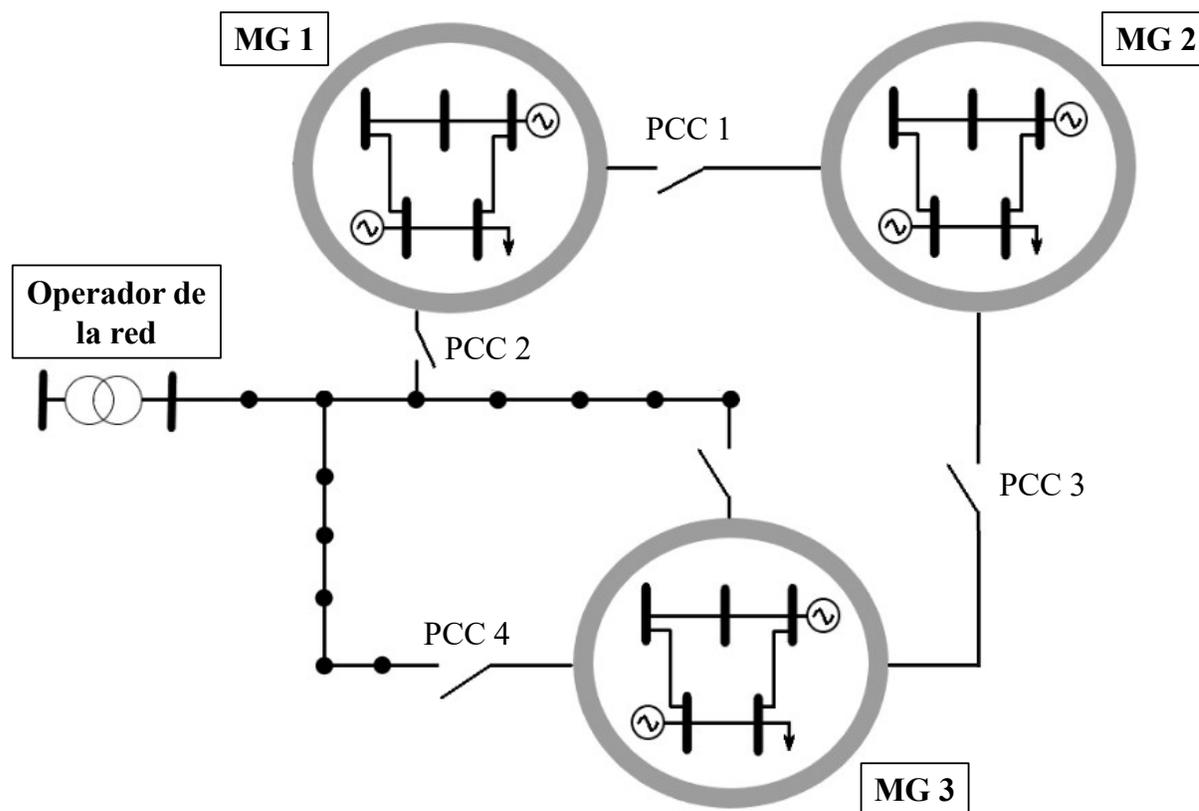


Figura 3-3: Modelo de MGs interconectadas.

que representan costos e involucran variables como costos de generación, intercambios y compras.

- **Restricciones:** las restricciones buscan modelar el comportamiento del sistema y sus componentes. Al igual que en MGs aisladas se pueden tener restricciones de igualdad y desigualdad. En esta oportunidad las restricciones también incluyen los intercambios, y dependiendo del esquema de control aumenta o disminuye el número de restricciones.

En la siguiente sección se muestra la composición del problema de optimización que modela la gestión de energía en MGs y posteriormente en sistemas NMG.

3.2. Costos y restricciones en la gestión de energía

Tal como fue mencionado anteriormente, el problema de gestión en MGs aisladas y sistemas NMG puede modelarse por medio de problemas de optimización. De acuerdo con la sección previa, los problemas de optimización que modelan sistemas de gestión de energía tienen una función objetivo y un conjunto de restricciones. En la literatura es frecuente encontrar modelos donde la función objetivo representa costos, utilidades o incluso pérdidas de energía.

Para el caso de los sistemas NMG, las funciones objetivo usualmente representan costos.

En esta sección se presenta la composición del problema de gestión de energía en los sistemas NMG. Considerando que estos son sistemas compuestos por MGs individuales, primero se muestra la formulación del problema para sistemas aislados y luego la forma en que estos componen el problema de los sistemas NMG. Para ello se muestran la función objetivo y los conjuntos de restricciones y variables en el EMS de una MG aislada y posteriormente se muestra la forma de integrar todos los problemas, incluyendo una explicación de las nuevas variables que surgen de la integración. No obstante, previamente se da una breve introducción sobre la notación utilizada.

3.2.1. Notación

Antes de explicar los problemas de optimización, es importante dar una breve introducción a la notación utilizada en las subsecciones siguientes. Esto permite comprender mejor las funciones, restricciones y variables involucradas en el problema. Los sistemas de gestión de energía o EMS involucran un gran número de variables y por esto es útil definir conjuntos que las agrupen.

El problema del EMS incluye casi en su totalidad los componentes del sistema eléctrico, desde nodos y líneas hasta generadores y cargas. Por este motivo es útil la definición de conjuntos que agrupen estos componentes, además, esto facilita la tarea de modelar matemáticamente el problema del EMS. Para empezar, en un escenario NMG el número de MGs puede ser grande, por lo que agruparlas en un conjunto es de utilidad. Este conjunto utilizado para representar a las MGs del sistema está compuesto por los subíndices de la siguiente manera

$$\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}, \quad (3-1)$$

donde $M = |\mathcal{M}|$ es la cardinalidad de \mathcal{M} o el número de MGs en el sistema NMG. Los elementos del conjunto \mathcal{M} serán referidos con el uso de los subíndices i y j . Dentro del sistema NMG, las MGs tienen la posibilidad de interactuar por medio de los PCCs, por lo que es de relevancia representar estos caminos de intercambio. Por medio de la teoría de grafos es posible definir un conjunto \mathcal{E} para agrupar y presentar los PCCs. Se puede evidenciar que \mathcal{E} pertenece al conjunto de las posibles combinaciones de parejas de MGs en el sistema NMG que puedan existir, por lo que la siguiente expresión es válida:

$$\mathcal{E} \subseteq \mathcal{M} \times \mathcal{M}. \quad (3-2)$$

Después de tener el conjunto de MGs definido a través de \mathcal{M} y el conjunto de de PCCs a través de \mathcal{E} , es posible definir el grafo $\mathcal{D} = (\mathcal{M}, \mathcal{E})$.

Ahora bien, todas las MGs comprenden un conjunto de nodos o barras, independientemente de si la MG funciona aislada o interconectada en un sistema NMG. El conjunto de nodos o barras se denota de la siguiente manera:

$$\mathcal{N}_i = \{1, \dots, N_i\}, \quad \forall i \in \mathcal{M}, \quad (3-3)$$

donde $N_i = |\mathcal{N}_i|$ es la cardinalidad de \mathcal{N}_i o el número de nodos que contiene la MG i . Este conjunto se marca con el subíndice i , considerando que todas las MGs tienen un tamaño diferente.

Los subíndices i y j son utilizados para referirse a los componentes de \mathcal{M} . Entonces, es importante determinar los subíndices utilizados para referirse a los componentes de los conjuntos \mathcal{N}_i . Los subíndices n , m , k y p se utilizan para definir los nodos de las MGs. Con estos subíndices es posible definir el conjunto de líneas en una MG. Este último grupo se denota con la letra \mathcal{L}_i . En los sistemas de gestión los costos se asocian tradicionalmente con los generadores. Por esto agrupar la generación distribuida por medio de un conjunto es relevante. Este conjunto se denota como \mathcal{G}_i y sus componentes son diferentes para cada MG. Por último, cada MG interactúa con el sistema NMG y el DS a través de diferentes nodos y esto depende únicamente de su topología. Esta razón hace necesario definir conjuntos \mathcal{E}_i para cada MG, compuesto por parejas de nodos que indiquen los puntos de intercambio de potencia o PCCs. Siguiendo la misma idea, los nodos por medio de los cuales cada MG interactúa con el DS se pueden agrupar por medio de los conjuntos \mathcal{R}_i .

3.2.2. Sistemas de gestión locales

Las MGs, al igual que los sistemas eléctricos de potencia tradicionales, están compuestos por generación y consumo de energía. Usualmente, la demanda en MGs es atendida de forma local por medio de generación distribuida, y es común que los principales recursos utilizados para la generación sean energías renovables de bajo costo. Por lo tanto, tecnologías como paneles solares fotovoltaicos (PV por sus siglas en inglés) y turbinas eólicas (WT por sus siglas en inglés) son usualmente incluidas. De igual manera, por temas de confiabilidad y calidad es necesario incluir sistemas de generación despachables o gestionables como lo son plantas cuya energía primaria son los combustibles fósiles.

Tal como se mencionó anteriormente, el sistema de gestión de energía es planteado por diversos autores como un problema de optimización donde se busca minimizar los costos globales de operación. Al igual que un sistema eléctrico de potencia, el principal costo asociado es la generación de energía por medio de fuentes convencionales. Usualmente los costos de este tipo de energías se modela de la misma manera que los costos de la generación térmica, es decir, por medio de una función cuadrática. La función de costos se muestra a continuación:

$$C_m^g(P_m^g) = (a_m(P_m^g)^2 + b_m(P_m^g) + c_m), \quad \forall m \in \mathcal{G}_i, \quad \forall i \in \mathcal{M}, \quad (3-4)$$

donde C_m^g son los costos del generador conectado al nodo identificado con el subíndice m . El coeficiente cuadrático a_m y el coeficiente lineal b_m representan los costos variables del generador, mientras la constante c_m son los costos fijos. P_m^g es la variable de la cual dependen los costos de cada generador y representa la potencia activa generada por la máquina. Por otro lado, los costos asociados con las fuentes de generación de energía renovable usualmente son considerados como cero, considerando que no hay costos asociados a su energía primaria.

Ahora bien, las MGs tienen numerosas plantas convencionales con las cuales se atiende la demanda de energía, por lo tanto la función de costos asociada con la generación debe ser una sumatoria. La función de costos de generación se muestra a continuación:

$$C_i^g(P_i^g) = \sum_{m \in \mathcal{G}_i} (a_{i,m}(P_{i,m}^g)^2 + b_{i,m}(P_{i,m}^g) + c_{i,m}), \quad \forall i \in \mathcal{M}, \quad (3-5)$$

donde $C_i^g(P_i^g)$ son los costos por generación de la MG identificada con el subíndice i . La sumatoria está definida para los generadores convencionales identificados por el subíndice m , que a su vez está contenido en el conjunto \mathcal{G}_i que, representa al grupo de nodos con generación convencional de la MG i . Es importante mencionar que este conjunto es diferente para todas las MGs, considerando que todas tienen diferentes números de plantas de generación.

En los sistemas NMG, las MGs tienen la posibilidad de interactuar con otros sistemas adyacentes y realizar compras de energía cuando sea necesario. Estos sistemas adyacentes pueden ser redes tradicionales, tales como las operadas por operadores de red o incluso otras MGs. Las compras de energía, ya sean a otras MGs o a un operador de red son consideradas como costos que debe asumir el sistema en cuestión. En la literatura se encuentran diferentes maneras de modelar estos costos, sin embargo, el método más sencillo es por medio de términos lineales. A continuación se muestra la función de costos relacionados con compras

$$C_i^{exc}(P_i^{exc}, P_i^{dso}) = C^{exc} \sum_{pm \in \mathcal{E}_i} P_{i,pm}^{exc} + C^{dso} \sum_{m \in \mathcal{R}_i} P_{i,m}^{dso}, \quad (3-6)$$

donde C^{exc} representa el precio de venta de energía entre MGs y $P_{i,pm}^{exc}$ la potencia comprada por la MG m a la MG p . Adicionalmente, los costos de las potencias compradas al operador de red son representadas por C^{dso} y así mismo, las potencias compradas al operador y se inyectan a la MG por el nodo m se representan por $P_{i,m}^{dso}$.

Entonces es posible resumir los costos de operación de una MG en el escenario de sistemas NMG juntando las funciones mostradas en (3-5) y (3-6). Considerando que los problemas del EMS se modela como un problema de optimización y que este consiste de una función objetivo con restricciones, es posible utilizar la función de costos de operación como función objetivo de la siguiente manera:

$$C_i^{MG}(P_i^g, P_i^{exc}, P_i^{dso}) = \sum_{m \in \mathcal{G}_i} (a_{i,m}(P_{i,m}^g)^2 + b_{i,m}(P_{i,m}^g) + c_{i,m}) + \dots + C^{exc} \sum_{pm \in \mathcal{E}_i} P_{i,pm}^{exc} + C^{dso} \sum_{m \in \mathcal{R}_i} P_{i,m}^{dso}, \quad (3-7)$$

El EMS también pretende modelar la operación del sistema eléctrico, por este motivo, las restricciones del problema de optimización deben representar su comportamiento. Y teniendo en cuenta la diversidad de topologías presentes en los sistemas eléctricos, es necesario definir un conjunto de ecuaciones que definan el comportamiento de cualquier sistema. Por este motivo se consideran las ecuaciones de flujo de un sistema eléctrico tradicional. Las dos primeras restricciones del EMS de cada MG hacen referencia al balance nodal en todo sistema eléctrico y se representan de la siguiente manera:

$$P_{i,m}^g + P_{i,m}^{PV} + P_{i,m}^W + P_{i,m}^{dso} + \sum_{km \in \mathcal{E}_i} P_{i,km}^{exc} = \sum_{mn \in \mathcal{L}_i} P_{i,mn} + P_{i,m}^D + \sum_{mp \in \mathcal{E}_i} P_{i,mp}^{exc} \quad \forall m \in \mathcal{N}_i, \quad (3-8)$$

$$Q_{i,m}^g + Q_{i,m}^{PV} + Q_{i,m}^W = \sum_{mn \in \mathcal{L}_i} Q_{i,mn} + Q_{i,m}^D \quad \forall m \in \mathcal{N}_i, \quad (3-9)$$

donde $P_{i,m}^{PV}$ y $Q_{i,m}^{PV}$ son las potencias activa y reactiva generadas por paneles solares fotovoltaicos. $P_{i,m}^W$ y $Q_{i,m}^W$ son potencias activa y reactiva generadas por sistemas eólicos. De igual manera, $P_{i,m}^D$ y $Q_{i,m}^D$ son los valores de demanda activa y reactiva en cada nodo. Por último, todos los flujos por líneas de transmisión (activos y reactivos) se consideran flujos salientes, por este motivo, las pérdidas no son explícitas en la fórmula.

Siguiendo las ecuaciones de flujo, las siguientes restricciones del EMS son los flujos por las líneas que, en las dos restricciones anteriores se consideran salientes del nodo

$$P_{km} = \frac{|V_k|^2}{|Z_{km}|} \cos(\gamma_{km}) - \frac{|V_k||V_m|}{|Z_{km}|} \cos(\delta_k - \delta_m + \gamma_{km}), \quad \forall km \in \mathcal{L}_i, \quad (3-10)$$

$$Q_{km} = \frac{|V_k|^2}{|Z_{km}|} \sin(\gamma_{km}) - \frac{|V_k||V_m|}{|Z_{km}|} \sin(\delta_k - \delta_m + \gamma_{km}), \quad \forall km \in \mathcal{L}_i, \quad (3-11)$$

donde P_{km} y Q_{km} son los flujos activos y reactivos que fluyen del nodo k al nodo m . $|V_k|$ y δ_k son la magnitud y el ángulo del voltaje nodal. Mientras $|Z_{km}|$ y γ_{km} son la magnitud y ángulo de la impedancia de línea. La siguiente restricción establece el límite de cargabilidad de las líneas dentro de cada MG. Teniendo en cuenta que la información suministrada por [Alam et al., 2020] menciona la corriente nominal, se toma esta como límite máximo permitido. Entonces la restricción de cargabilidad se muestra a continuación:

$$\frac{P_{km}^2 + Q_{km}^2}{V_k^2} \leq \bar{I}_{km}^2, \quad \forall km \in \mathcal{L}_i \cup \mathcal{E}_i, \quad (3-12)$$

donde \bar{I}_{km}^2 es la corriente nominal de la línea entre los nodos k y m . Finalmente, las últimas restricciones referentes al funcionamiento del sistema eléctrico son los límites operativos para las unidades generadoras y los nodos del sistema, tal como se muestra a continuación:

$$\underline{P}_m^g \leq P_m^g \leq \overline{P}_m^g, \quad \forall m \in \mathcal{G}_i \quad (3-13)$$

$$\underline{Q}_m^g \leq Q_m^g \leq \overline{Q}_m^g, \quad \forall m \in \mathcal{G}_i \quad (3-14)$$

$$\underline{V} \leq |V_m| \leq \bar{V}, \quad \forall m \in \mathcal{N}_i. \quad (3-15)$$

Por otro lado, los sistemas de gestión locales deben considerar restricciones a los intercambios de potencia. El flujo de energía en cada punto de intercambio se puede dar en dos direcciones opuestas, y esta dirección vendrá determinada por las condiciones de carga entre MGs vecinas. En (3-8) se puede apreciar que ambas direcciones de flujo aparecen en la ecuación, sin embargo, cada dirección aparece a un lado distinto de la igualdad. De acuerdo con [Liu et al., 2018], $P_{i,mn}^{exc}$ (de m a n) y $P_{i,nm}^{exc}$ (de n a m) son variables diferentes y ambas representan flujo de potencia entre las MGs m y n , aunque en direcciones opuestas. Siguiendo el mismo planteamiento de los autores, todas las variables de intercambio deberían ser no negativas, lo que significa que tampoco deberían ser diferentes de cero de manera simultánea, convirtiéndolas en variables mutuamente excluyentes. Las restricciones a continuación representan esta característica

$$P_{pm}^{exc} \geq 0, \quad \forall (p, m) \in \mathcal{E}_i, \quad (3-16)$$

$$P_{mk}^{exc} \geq 0, \quad \forall (m, k) \in \mathcal{E}_i.$$

Lo conjuntos \mathcal{E}_i contienen ambas direcciones de flujo para los intercambios. Por lo tanto, (3-16) pretende mostrar que ambas direcciones deben tener valores mayores o iguales a cero. Entonces, o las dos variables son cero o solo una de las dos toma un valor positivo mientras la otra toma valor de cero, por lo cual se establece la restricción adicional

$$P_{i,mn}^{exc} \cdot P_{i,nm}^{exc} = 0, \quad \forall (m, n) \in \mathcal{E}_i. \quad (3-17)$$

3.2.3. Sistema de gestión global

Partiendo de la formulación de costos y restricciones de los subsistemas o MGs que componen un sistema de NMGs, es posible formular el problema global. Para esto se considera la suma de costos de todas las MGs del sistema como la función objetivo del sistema de gestión global

$$C^{NMG} = \sum_{i \in \mathcal{M}} (C_i^{MG}(P_i^g, P_i^{exc}, P_i^{dso})) \quad (3-18)$$

Reemplazando (3-7), se tiene

$$C^{NMG} = \sum_{i \in \mathcal{M}} \left(\sum_{m \in \mathcal{G}_i} (a_{i,m}(P_{i,m}^g)^2 + b_{i,m}(P_{i,m}^g) + c_{i,m}) + \dots \right. \\ \left. C^{exc} \sum_{pm \in \mathcal{E}_i} P_{i,pm}^{exc} + C^{dso} \sum_{m \in \mathcal{R}_i} P_{i,m}^{dso} \right). \quad (3-19)$$

Por otro lado, para las restricciones del sistema NMG solo hace falta considerar todos los conjuntos individuales (3-8)-(3-16) de cada MG. Por lo tanto, la formulación del problema del EMS global para el sistema NMG se puede escribir de la siguiente manera:

$$\text{minimizar } \sum_{i \in \mathcal{M}} \left(\sum_{m \in \mathcal{G}_i} (a_{i,m}(P_{i,m}^g)^2 + b_{i,m}(P_{i,m}^g) + c_{i,m}) + \dots \right. \\ \left. \dots + C^{exc} \sum_{pm \in \mathcal{E}_i} P_{i,pm}^{exc} + C^{dso} \sum_{m \in \mathcal{R}_i} P_{i,m}^{dso} \right) \quad (3-20)$$

$$\text{Sujeto a } P_{i,m}^g + P_{i,m}^{PV} + P_{i,m}^W + P_{i,m}^{dso} + \sum_{km \in \mathcal{E}_i} P_{i,km}^{exc} = \sum_{mn \in \mathcal{L}_i} P_{i,mn} + P_{i,m}^D + \sum_{mp \in \mathcal{E}_i} P_{i,mp}^{exc}$$

$$Q_{i,m}^g + Q_{i,m}^{PV} + Q_{i,m}^W = \sum_{mn \in \mathcal{L}_i} Q_{i,mn} + Q_{i,m}^D \quad \forall m \in \mathcal{N}_i, \forall i \in \mathcal{M}$$

$$P_{km} = \frac{|V_k|^2}{|Z_{km}|} \cos(\gamma_{km}) - \frac{|V_k||V_m|}{|Z_{km}|} \cos(\delta_k - \delta_m + \gamma_{km}), \quad \forall km \in \mathcal{L}_i, \forall i \in \mathcal{M}$$

$$Q_{km} = \frac{|V_k|^2}{|Z_{km}|} \sin(\gamma_{km}) - \frac{|V_k||V_m|}{|Z_{km}|} \sin(\delta_k - \delta_m + \gamma_{km}), \quad \forall km \in \mathcal{L}_i, \forall i \in \mathcal{M}$$

$$\frac{P_{km}^2 + Q_{km}^2}{V_k^2} \leq \bar{I}_{km}^2, \quad \forall km \in \mathcal{L}_i, \forall i \in \mathcal{M}$$

$$\underline{P}_m^g \leq P_m^g \leq \overline{P}_m^g, \quad \forall m \in \mathcal{G}_i, \forall i \in \mathcal{M}$$

$$\underline{Q}_m^g \leq Q_m^g \leq \overline{Q}_m^g, \quad \forall m \in \mathcal{G}_i, \forall i \in \mathcal{M}$$

$$\underline{V} \leq |V_m| \leq \overline{V}, \quad \forall m \in \mathcal{N}_i, \forall i \in \mathcal{M}$$

$$P_{i,mn}^{exc} \geq 0, \quad \forall (m, n) \in \mathcal{E}_i, \forall i \in \mathcal{M}$$

$$P_{i,mn}^{exc} \cdot P_{i,nm}^{exc} = 0, \quad \forall (m, n) \in \mathcal{E}_i, \forall i \in \mathcal{M}$$

(3-21)

Por último, una de las características relevantes de esta formulación es el no intercambio de potencia reactiva entre MGs, es decir, a través de los PCCs únicamente se intercambia potencia activa. Este planteamiento se debe a los efectos que tiene la inyección local de reactivos en cada una de las MGs. En otras palabras, el intercambio de potencia reactiva en las MGs podría causar problemas en los perfiles de tensión de los nodos frontera y la no existencia de una solución factible.

4 Gestión distribuida en microrredes interconectadas

Existen numerosas formas de solucionar el problema de optimización planteado en el capítulo anterior. Dentro de este conjunto de alternativas de solución, se selecciona el método de multiplicadores de dirección alternante (ADMM, por sus siglas en inglés). No obstante, este método basa su funcionamiento en la posibilidad de descomponer el problema planteado, es decir, la formulación debe ser separable en partes independientes. La formulación presentada en el capítulo anterior no se puede separar a causa de las restricciones impuestas a los intercambios de potencia. Este capítulo inicia con los fundamentos del ADMM, para luego continuar con una variante del ADMM presentada en [Boyd et al., 2011], que permite llegar a una solución de consenso entre variables globales y locales. Posteriormente se muestra la reformulación del problema que permite obtener una versión separable de este, para luego finalizar con el ADMM aplicado al problema.

4.1. Método de multiplicadores de dirección alternante

Tal como se mencionó anteriormente, la solución distribuida para el problema planteado en (4-19) es el método de multiplicadores de dirección alternante (ADMM). Esta solución, de acuerdo con [Bertsekas and Tsitsiklis, 1989], consiste en un método iterativo capaz de manejar problemas no lineales cuyo objetivo no es realizar una paralelización en el método, sino explotar la separabilidad del problema. En esta sección se explican los fundamentos básicos del método.

El ADMM es un método iterativo para solucionar problemas de optimización no lineales que se fundamenta en los multiplicadores de Lagrange y en la función aumentada de Lagrange. El objetivo del ADMM es solucionar problemas de optimización que tienen la estructura

$$\text{minimizar } f(x) + g(z) \tag{4-1a}$$

$$\text{Sujeto a } Ax + Bz = c, \tag{4-1b}$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$, $z \in \mathbb{R}^m$, $A \in \mathbb{R}^{p \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{p \times m}$ y $c \in \mathbb{R}^p$. Además, se asume que las funciones f y g son convexas. En (4-1), las variables x y z son las variables primales del problema y tal como se puede observar, cada variable tiene asociadas restricciones por medio de las matrices

A y B y el vector c . De acuerdo con [Boyd et al., 2011], el nombre del método surge de su habilidad para realizar actualizaciones sobre sus variables primales y duales una por una, es decir, se actualiza una mientras las demás permanecen constantes. Para poder definir el proceso de actualización que sufren las variables a lo largo del método, es necesario definir la función aumentada de Lagrange. Esta función es

$$L_\rho(x, z, \lambda) = f(x) + g(z) + \lambda^T(Ax + Bz - c) + (\rho/2)\|Ax + Bz - c\|^2, \quad (4-2)$$

donde ρ es un factor utilizado para penalizar las soluciones (x, z) que no cumplen con el conjunto de restricciones y por lo tanto se encuentran fuera de la región factible; y λ es el vector de multiplicadores de Lagrange asociados con el conjunto de restricciones. Es importante notar que las restricciones de (4-1) son igualdades, mientras que las restricciones de desigualdad se pueden abordar en los pasos de actualización de las variables primales. El proceso que sigue el ADMM para encontrar la solución del problema inicia por medio de la actualización de las variables primales de la siguiente manera:

$$x^{k+1} = \underset{x}{\operatorname{argmin}} \quad L_\rho(x, z^k, \lambda^k) \quad (4-3a)$$

$$z^{k+1} = \underset{z}{\operatorname{argmin}} \quad L_\rho(x^{k+1}, z, \lambda^k), \quad (4-3b)$$

donde k hace referencia a la iteración en la cual va el proceso. En (4-3a) y (4-3b) se establece la característica por la cual el método recibe su nombre de dirección alternante. En la actualización de la variable x se observa que la función aumentada de Lagrange depende únicamente de x , mientras las otras dos variables toman el valor constante de z^k y λ^k . De igual manera ocurre con la variable z , donde las variables x y λ toman los valores constantes de x^{k+1} y λ^k , respectivamente. Tal como se mencionó anteriormente, las restricciones de igualdad se abordan por medio de la función aumentada de Lagrange, mientras las restricciones de desigualdad se pueden abordar por medio de las actualizaciones establecidas en (4-3a) y (4-3b). Por otro lado, al igual que las variables primales del problema, el ADMM establece un proceso de actualización para las variables duales. En este caso en particular las variables duales componen el vector λ que aparece en la función aumentada de Lagrange

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \rho(Ax^{k+1} + Bz^{k+1} - c). \quad (4-4)$$

Entonces, el ADMM es un algoritmo que permite aislar la actualización de cada variable primal por medio del uso de estimadores de las demás variables del sistema, tal como se observa en las ecuaciones (4-3a) y (4-3b).

4.2. Forma general de la optimización de consenso

Dado que el ADMM es un algoritmo distribuido que permite aprovechar la separabilidad de los problemas, existen muchos aportes sobre este que permiten explotar aún más sus

características. Tal como se mencionó en la reformulación, el consenso entre los estimadores de intercambio y los estimadores de las variables globales es necesario en el proceso. Por esta razón se debe utilizar una variante del ADMM que permita implementar el consenso como una restricción.

En [Boyd et al., 2011] los autores exponen una variante del ADMM conocida como "forma general de la optimización basada en consenso", la cual permite implementar la igualdad entre algunas variables primales y variables globales como una restricción. En esta forma general de consenso se tiene un conjunto de variables locales $x_i \in \mathbb{R}^{n_i}$, $i = 1, \dots, N$, con la siguiente función objetivo $f_1(x_1) + \dots + f_N(x_N)$ que es separable en cada una de las variables locales. Cada una de estas variables locales corresponde con una porción de componentes de una variable global $z \in \mathbb{R}^n$. En otras palabras, cada x_i corresponde con z_g , donde este último es una componente de z . Considerando que la relación puede ser de componentes de las variables locales con componentes de la variable global, el mapeo de esta relación se puede describir como $g = \mathcal{G}(i, j)$, es decir, $(x_i)_j$ (componente j de la variable local i) corresponde con la componente z_g de la variable global. Entonces, es adecuado decir que para conseguir el consenso entre las componentes locales y las componentes globales se debe tener la restricción

$$(x_i)_j = z_{\mathcal{G}(i,j)}, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, n_i. \quad (4-5)$$

Tal como se observa en (4-5) y fue mencionado anteriormente, el consenso puede hacerse entre algunas componentes de las variables locales y otras componentes de la variable global. Ahora bien, la existencia de la variable global implica que en todos los pasos del método se debe centralizar información, ya que diferentes variables locales pueden compartir la igualdad con alguna componente de la variable global. Para evitar dicha centralización, se hace el uso de estimadores $\tilde{z}_i \in \mathbb{R}^{n_i}$, definidos como $(\tilde{z}_i)_j = z_{\mathcal{G}(i,j)}$. Se podría decir que la variable estimadora \tilde{z}_i es la idea de lo que la variable local x_i debería ser. Entonces, el problema general de consenso se puede formular como

$$\text{minimizar} \quad \sum_{i=1}^N f_i(x_i) \quad (4-6a)$$

$$\text{Sujeto a} \quad x_i - \tilde{z}_i = 0, \quad i = 1, \dots, N. \quad (4-6b)$$

$$\text{minimizar} \quad \sum_{i=1}^N f_i(x_i) \quad (4-7a)$$

$$\text{Sujeto a} \quad x_i - z = 0, \quad i = 1, \dots, N. \quad (4-7b)$$

De acuerdo con lo mostrado en la sección anterior, la función aumentada de Lagrange para (4-7) es

$$L_\rho(x, z, \lambda) = \sum_{i=1}^N \left(f_i(x_i) + \lambda_i^\top (x_i - \tilde{z}_i) + \frac{\rho}{2} \|x_i - \tilde{z}_i\|_2^2 \right).$$

En (4-7) se tienen dos tipos de variables primales, x_i y \tilde{z}_i . Al momento de reemplazar x_i en (4-3a) se obtiene la actualización

$$x_i^{k+1} = \underset{x_i}{\operatorname{argmin}} \left(f_i(x_i) + \lambda_i^{k,\top} x_i + \frac{\rho}{2} \|x_i - \tilde{z}_i^k\|_2^2 \right). \quad (4-8)$$

De acuerdo con [Boyd et al., 2011], la actualización de la variable primal z se separa por medio de sus componentes z_g de la siguiente manera:

$$z_g^{k+1} = \frac{1}{k_g} \sum_{\mathcal{G}(i,j)=g} (x_i^{k+1})_j, \quad (4-9)$$

donde k_g es el número de variables locales asociadas con la componente z_g de la variable global. Podría decirse que en este paso se calcula un promedio. De igual manera, las variables duales del problema se actualizan por medio de la ecuación

$$\lambda_i^{k+1} = \lambda_i^k + \rho(x_i^{k+1} - \tilde{z}_i^{k+1}). \quad (4-10)$$

La Figura 4-1 muestra la relación que existe entre componentes de las variables locales y las componentes de la variable global. En esta figura las variables locales se encuentran a la izquierda, mientras a la derecha se tienen las componentes de la variable global. Cada línea entre una componente local y una global representa una de las variables de igualdad descritas en (4-7).

4.3. Reformulación del problema

El impedimento para que la formulación del problema planteada en el capítulo anterior no sea separable, radica en las restricciones referentes al intercambio de potencia activa (3-16). Una alternativa para volver separables estas restricciones y evitar la existencia de variables globales es trabajar con estimadores locales de dichos valores, tal como en la sección anterior. Para considerar estos estimadores locales, se establece el vector local para cada MG

$$\mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_i^g \\ \mathbf{P}_i^{dso} \\ \mathbf{P}_i^{exc} \end{bmatrix}. \quad (4-11)$$

El vector \mathbf{P}_i mostrado en (4-11) está compuesto principalmente por tres subvectores. El primero de estos, \mathbf{P}_i^g , hace referencia al conjunto de potencias despachadas en los generadores

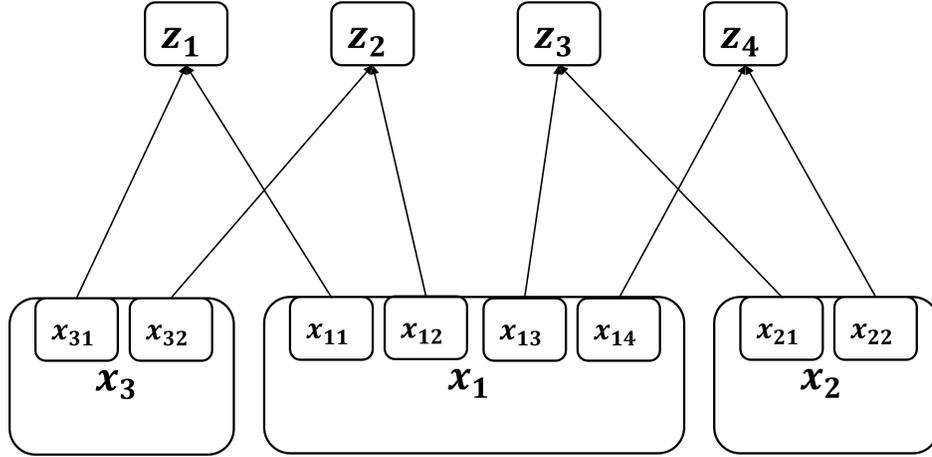


Figura 4-1: Mapeo de la relación entre componentes de variables locales y variables globales [Boyd et al., 2011].

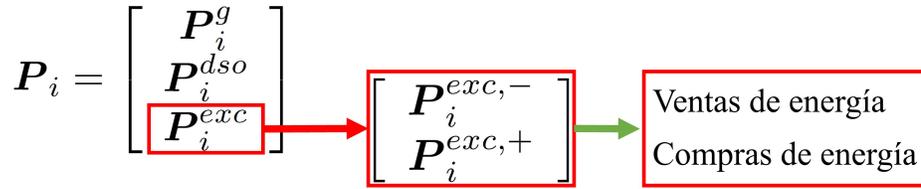


Figura 4-2: Subvector local P_i^{exc} con sus estimaciones de compras y ventas.

distribuidos en la MG i . El segundo, P_i^{dso} , representa las compras de potencia de la MG i al operador del sistema de distribución. Y por último, se tiene un subvector P_i^{exc} que contiene las estimaciones locales de cada una de las variables globales mostradas en la restricción (3-16). El vector P_i^{exc} puede expresarse de la siguiente manera:

$$P_i^{exc} = \begin{bmatrix} P_i^{exc,-} \\ P_i^{exc,+} \end{bmatrix}. \quad (4-12)$$

La Figura 4-2 muestra la composición interna de este subvector de estimaciones. En ella se puede observar que está compuesto por las estimaciones de compras y ventas de potencia activa de la MG i .

Para ampliar el concepto de el subvector P_i^{exc} , se puede considerar el escenario de dos MGs interconectadas para el intercambio de potencia activa. En este escenario, el subvector de cada MG estaría compuesto únicamente de dos valores. En el caso de la MG número 1, la primera posición del subvector es la estimación de ventas de energía a la MG número 2, denotada como $P_{1,1-2}^{exc}$. Mientras que la segunda posición es la estimación de las compras de la MG 1 a la MG2, denotada como $P_{1,2-1}^{exc}$. La Figura 4-3 muestra la construcción de este subvector en el escenario de 2 MGs interconectadas.

Teniendo en cuenta que estos nuevos subvectores trabajan con estimaciones y que dichas estimaciones hacen referencia a una variable global, en algún momento las que correspondan

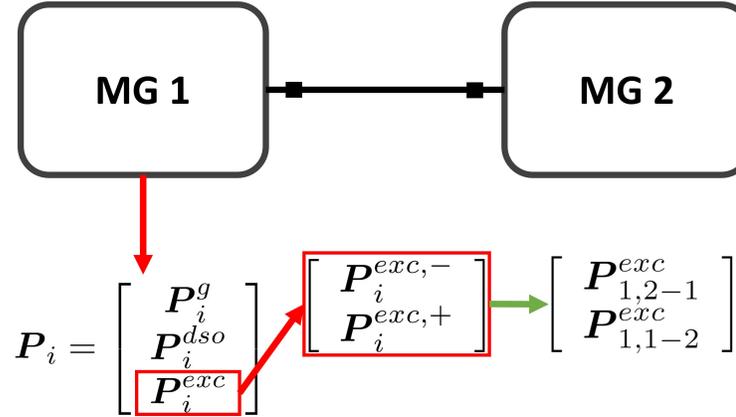


Figura 4-3: Subvector local P_i^{exc} para el escenario de 2 MGs.

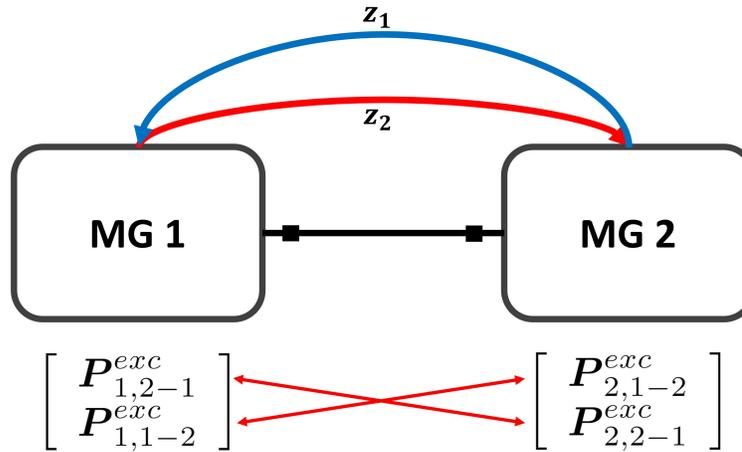


Figura 4-4: Variables globales y estimadores en el escenario de 2 MGs.

a la misma variable global deberán converger al mismo valor. Este concepto sigue la misma idea presentada en la sección anterior, de la igualdad existente entre las componentes locales x_i y las componentes de la variable global \tilde{z}_i . En este caso, la variable global z tiene una componente z_g por cada dirección de flujo en los puntos de intercambio de potencia activa. En la Figura 4-4 se puede observar la existencia de dos variables globales (z_1, z_2) por cada punto de intercambio a partir del caso de 2 MGs interconectadas.

Continuando con el ejemplo de las 2 MGs, presentado en la Figura 4-4, la estimación $P_{1,1-2}^{exc}$ de la MG 1 y la estimación $P_{2,1-2}^{exc}$ de la MG 2 hacen referencia a la misma variable global. La variable global que representan estas estimaciones es el intercambio que existe entre las 2 MGs fluyendo de la MG 1 a la MG 2. De igual manera ocurre con la otra posición del subvector de cada MG, donde los estimadores $P_{1,2-1}^{exc}$ y $P_{2,2-1}^{exc}$ deben tomar los mismos valores en algún momento de la solución. La relación existente entre las estimaciones y su correspondiente variable global se puede apreciar en la Figura 4-5. En esta figura se muestra que las componentes $P_{1,2-1}^{exc}$ y $P_{2,2-1}^{exc}$ son estimadores de la variable global z_1 , que representa

el flujo existente desde la MG 2 a la MG 1. De igual manera ocurre con los estimadores $\mathbf{P}_{1,1-2}^{exc}$ y $\mathbf{P}_{2,1-2}^{exc}$.

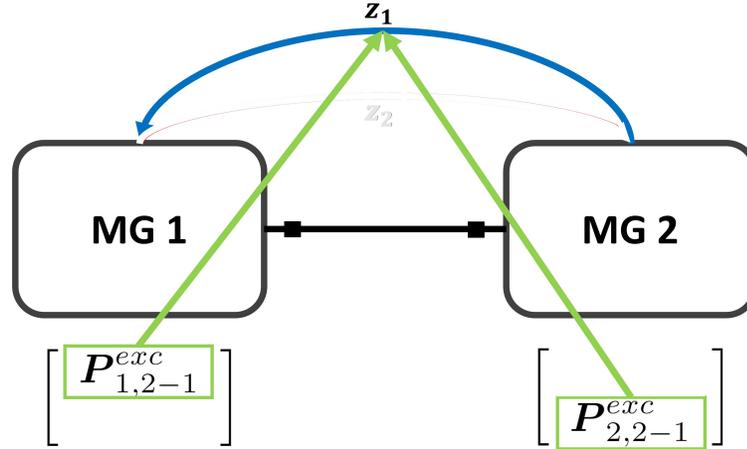


Figura 4-5: Relación entre estimadores y variable global en el escenario de 2 MGs.

Considerando que el ADMM es un algoritmo que plantea la distribución del problema sin necesidad de pasos centralizados, es necesario evitar el uso de variables globales como z_1 y z_2 . Por este motivo, al igual que ocurre con el subvector \mathbf{P}_i^{exc} , se plantea el uso de estimadores. Estos últimos son versiones locales de las variables globales, que permiten la no centralización de ninguna variable a lo largo del proceso. Estos estimadores se definen por medio del subvector

$$\mathbf{P}_i^{exc,(c)} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_i^{exc,-,(c)} \\ \mathbf{P}_i^{exc,+,(c)} \end{bmatrix}, \quad (4-13)$$

Dado que cada enlace de intercambio de potencia activa tiene una variable global z por cada dirección de flujo, es evidente pensar que el subvector de estimadores $\mathbf{P}_i^{exc,(c)}$ también tiene una componente por cada dirección de flujo de los enlaces con los cuales guarda relación. Entonces, en el caso de las 2 MG expuesto en la Figura 4-4, el subvector de estimadores globales de la MG 1 $\mathbf{P}_1^{exc,(c)}$ debe tener 2 posiciones. La primera hace referencia ventas de energía $\mathbf{P}_{1,1-2}^{exc,-,(c)}$, es decir, a la potencia que fluye desde la MG 1 hacia la MG 2. Mientras que la segunda posición $\mathbf{P}_{1,2-1}^{exc,-,(c)}$ hace referencia a las compras de la MG 1, es decir, la potencia que fluye de la MG 2 a la MG 1. De esta manera el subvector $\mathbf{P}_i^{exc,(c)}$ quedaría de la siguiente manera para la MG 1:

$$\mathbf{P}_1^{exc,(c)} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{1,1-2}^{exc,(c)} \\ \mathbf{P}_{1,2-1}^{exc,(c)} \end{bmatrix},$$

Mientras que para la MG 2 el subvector sería

$$\mathbf{P}_2^{exc,(c)} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{2,2-1}^{exc,(c)} \\ \mathbf{P}_{2,1-2}^{exc,(c)} \end{bmatrix},$$

La composición del subvector de estimadores de las variables globales se muestra en la Figura 4-6.

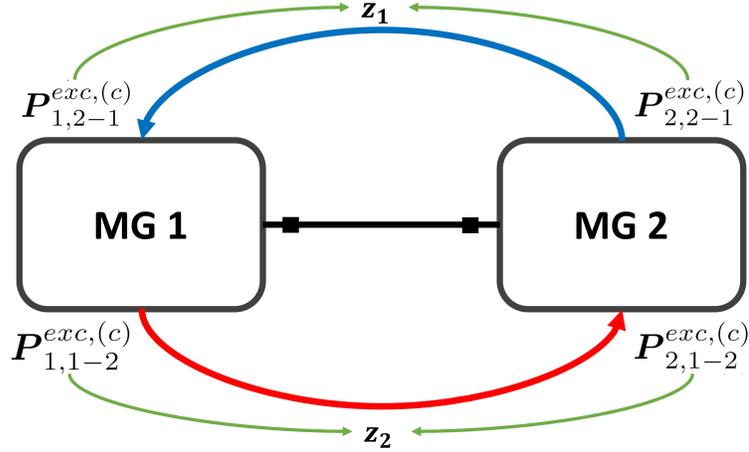


Figura 4-6: Composición del subvector de estimadores globales en el escenario de 2 MGs.

De tal manera, el nuevo vector \mathbf{P}_i y los subvectores $\mathbf{P}_i^{exc,(c)}$ y \mathbf{P}_i^{exc} permiten reformular la restricción (3-16), de tal manera que el problema sea completamente separable y la solución por medio del ADMM sea viable. Entonces, las restricciones correspondientes al flujo de potencia entre MGs pueden escribirse por medio de estos nuevos vectores de la siguiente manera:

$$\mathbf{P}_i^{exc} \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{M}, \quad (4-14)$$

$$\mathbf{P}_i^{exc} = \mathbf{P}_i^{exc,(c)}, \quad \forall i \in \mathcal{M}. \quad (4-15)$$

La restricción (4-14) permite establecer la no negatividad de los estimadores de intercambio de potencia, tal como lo establece la restricción (3-16). Mientras (4-15) establece la igualdad que debe existir entre el estimador de la variable global y el estimador local del intercambio. La utilidad de esta reformulación está en poder separar las restricciones del problema sin el manejo de variables globales.

Por medio del vector \mathbf{P}_i y de todas sus componentes es posible reformular la función objetivo (3-20) y el conjunto de restricciones (3-21). Dentro de (3-21), todas las restricciones exceptuando las referentes con el intercambio de potencia activa, tienen que ver con el flujo de potencia de cada MG, por lo tanto son restricciones separables. De esta manera, las restricciones de (3-21) correspondientes con el flujo de potencia se pueden agrupar por medio de la expresión

$$\mathcal{P}_i = \{\mathbf{P}_i | \underline{P}_m \leq P_m \leq \overline{P}_m, \underline{Q}_m \leq Q_m \leq \overline{Q}_m, \underline{V}_m \leq |V_m| \leq \overline{V}_m, P_m + jQ_m = V_m \sum_{n \in \mathcal{N}_i} Y_{m,n}^* V_n^*\}. \quad (4-16)$$

Tal como se puede observar, cada conjunto de restricciones \mathcal{P}_i corresponde únicamente con las restricciones de flujo de la MG i . Por otro lado, se tiene que la función objetivo planteada en (3-20) se puede reformular por medio de los vectores \mathbf{P}_i . Para esto se puede considerar la función individual de costos (3-7) en términos de las componentes del vector \mathbf{P}_i de la siguiente manera:

$$C_i^{MG}(\mathbf{P}_i) = C_i^g(\mathbf{P}_i^g) + C_i^{exc}(\mathbf{P}_i^{exc,+}) + C_i^{dso}(\mathbf{P}_i^{dso}). \quad (4-17)$$

De acuerdo con lo establecido en el capítulo anterior, los costos del sistema NMG están definidos por

$$C^{NMG} = \sum_{i \in \mathcal{M}} (C_i^{MG}).$$

Por lo cual, al reemplazar (4-17) en (3-18) se obtiene la función objetivo

$$C^{NMG}(\mathbf{P}) = \sum_{i \in \mathcal{M}} (C_i^g(\mathbf{P}_i^g) + C_i^{exc}(\mathbf{P}_i^{exc,+}) + C_i^{dso}(\mathbf{P}_i^{dso})), \quad (4-18)$$

donde $\mathbf{P} = (\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_M)$ es la variable que contiene los vectores \mathbf{P}_i de todas las MGs. De esta manera, por medio de los vectores \mathbf{P}_i y de las reformulaciones establecidas en (4-16) y (4-18) se obtiene el planteamiento del problema original

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i \in \mathcal{M}} (C_i^g(\mathbf{P}_i^g) + C_i^{exc}(\mathbf{P}_i^{exc,+}) + C_i^{dso}(\mathbf{P}_i^{dso})) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{P} \in \mathcal{P} = \mathcal{P}_1 \times \dots \times \mathcal{P}_M \\ & \mathbf{P}_i^{exc} \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{M} \\ & \mathbf{P}_i^{exc} = \mathbf{P}_i^{exc,(c)}, \quad \forall i \in \mathcal{M}. \end{aligned} \quad (4-19)$$

La formulación planteada en (4-19) es separable y por lo tanto el ADMM es una solución distribuida viable.

4.4. Solución del problema con ADMM

El ADMM es un método que aprovecha la separabilidad del problema para distribuir su solución, tal como se afirma en [Bertsekas and Tsitsiklis, 1989]. La separabilidad del problema formulado en (4-19) permite aplicar el ADMM y de esta manera obtener una solución distribuida que permite la libre interacción de las MGs dentro de un sistema de NMG. De igual manera, esta característica permite que las MGs sean capaces de gestionar su energía aún cuando no se encuentran conectadas con sistemas adyacentes.

Para aplicar los pasos (4-3a), (4-3b) y (4-4) al problema planteado en (4-19) es necesario poder identificar con claridad las funciones f y g del problema (4-1), junto con sus respectivas variables x y z . En la formulación del problema se puede apreciar que las restricciones de

igualdad involucran dos subvectores distintos, $\mathbf{P}_i^{exc,(c)}$ y \mathbf{P}_i^{exc} . De igual manera, en (4-11) se definió el vector \mathbf{P}_i que engloba los despachos \mathbf{P}_i^g , compras al DS \mathbf{P}_i^{dso} e intercambios de potencia \mathbf{P}_i^{exc} . Estos subvectores a su vez están contenidos en el vector $\mathbf{P} = (\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_M)$. Entonces, es viable definir la variable primal x como

$$x = \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{P}_M \end{bmatrix}.$$

Con lo cual $f(x)$ se puede establecer por medio de la función objetivo del problema (4-19) tal como se muestra a continuación:

$$f(x) = C^{NMG}(\mathbf{P}) = \sum_{i \in \mathcal{M}} (C_i^g(\mathbf{P}_i^g) + C_i^{exc}(\mathbf{P}_i^{exc,+}) + C_i^{dso}(\mathbf{P}_i^{dso})).$$

Por otro lado, los otros subvectores involucrados en las restricciones de igualdad de (4-19) son $\mathbf{P}_i^{exc,(c)}$. Estos subvectores se pueden asociar con la variable primal z en (4-1) por medio de

$$z = \mathbf{P}^{(c)} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1^{exc,(c)} \\ \mathbf{P}_2^{exc,(c)} \\ \vdots \\ \mathbf{P}_M^{exc,(c)} \end{bmatrix}.$$

Ahora bien, considerando que esta variable primal no tienen impacto sobre la función objetivo del problema, la definición de la función g de (4-1) se establece a continuación:

$$g(z) = g(\mathbf{P}^{(c)}) = 0.$$

Tal como se mencionó anteriormente, el ADMM funciona haciendo uso de la función aumentada de Lagrange. En los pasos de actualización de las variables primales (4-3a) y (4-3b) se puede apreciar que cada proceso depende únicamente de la variable de turno, es decir, cada término de la función aumentada de Lagrange que no dependa de esa variable no tendrá relevancia y se podrá despreocupar. Esta característica permite que la actualización de la variable primal $\mathbf{P} = (\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_M)$ se de para cada una de sus componentes, es decir, las variables de decisión de cada MG de forma individual. Esto permite obtener una solución completamente distribuida del problema. Siguiendo esta idea, es posible plantear (4-8) para las variables primales \mathbf{P} previamente definidas por medio de la ecuación

$$\mathbf{P}_i(k+1) = \arg \min_{\mathbf{P}_i \in \mathcal{P}_i} (C_i^{MG}(\mathbf{P}_i) + \lambda_i^\top(k) (\mathbf{P}_i^{exc} - \mathbf{P}_i^{exc,(c)}(k))) + \dots \\ \frac{\rho}{2} \|\mathbf{P}_i^{exc} - \mathbf{P}_i^{exc,(c)}(k)\|_2^2. \quad (4-20)$$

Por medio de (4-20) cada MG es capaz de obtener la actualización de sus variables de decisión. Y tal como se puede observar, en el proceso se utilizan únicamente variables y estimadores locales. Dentro de (4-20) la única variable es el subvector \mathbf{P}_i , mientras que el subvector $\mathbf{P}_i^{exc,(c)}$ es una constante y por eso lleva el indicativo de la iteración k . De igual manera, es importante resaltar que el vector multiplicador de Lagrange λ_i acompaña únicamente a las restricciones de igualdad correspondientes con la MG i . Las demás restricciones, que tratan del problema de flujo de potencia, son propias de cada MG y por lo tanto no se consideran como una restricción que se deba separar con el ADMM.

Ahora bien, las variables primales $\mathbf{P}_i^{exc,(c)}$ son análogas a los estimadores \tilde{z}_i presentados en (4-7), ya que son las variables que se encuentran presentes en las restricciones del problema, pero no afectan la función objetivo. De acuerdo con [Boyd et al., 2011], la actualización de la variable global se realiza por sus componentes z_g . No obstante, considerando que el objetivo es una solución distribuida, la actualización propuesta en (4-9) no es viable. Sin embargo, es posible trabajar con los estimadores $\mathbf{P}_i^{exc,(c)}$ y algunos intercambios de información entre MGs adyacentes.

Para trabajar de forma distribuida es necesario que cada MG esté en la capacidad de actualizar sus propios estimadores $\mathbf{P}_i^{exc,(c)}$. Esto es posible intercambiando información entre las MGs relacionadas con una misma variable global y que cada una realice la actualización de su estimador de manera local. En (4-9) es evidente que los valores involucrados en la actualización son las variables locales x_i , que en este problema en particular representan los estimadores locales de los intercambios de potencia \mathbf{P}_i^{exc} , que hacen parte integral de los vectores de variables primales \mathbf{P} . Entonces, cada MG está en la capacidad de actualizar sus estimadores globales $\mathbf{P}_i^{exc,(c)}$ si en cada paso del proceso conoce el valor actual de los estimadores de sus vecinos.

Conocer el valor de los estimadores vecinos es posible a través de un intercambio de información. Para el ejemplo de 2 MGs presentado en la Figura 4-6, este intercambio implica que la MG 1 envíe al final de cada iteración el valor de sus dos estimadores $(\mathbf{P}_{1,2-1}^{exc,(c)}, \mathbf{P}_{1,1-2}^{exc,(c)})$ a la MG 2 y viceversa. Esta dinámica de intercambios de información se muestra en la Figura 4-7.

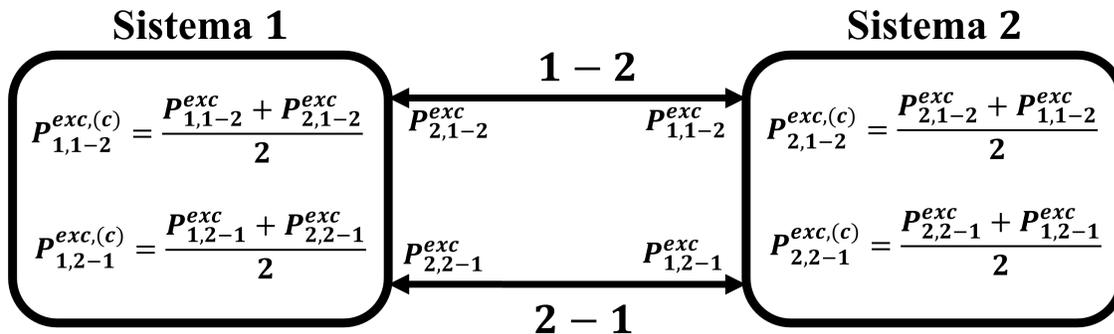


Figura 4-7: Intercambio de información para la actualización de los estimadores globales.

En la Figura 4-7 se observa como cada MG envía el valor actual de sus estimadores locales a la MG vecina. En esta, la MG 1 envía el valor de los estimadores $((\mathbf{P}_{1,1-2}^{exc}), (\mathbf{P}_{1,2-1}^{exc}))$ a la MG 2, mientras la MG 2 envía $((\mathbf{P}_{2,2-1}^{exc}), (\mathbf{P}_{2,1-2}^{exc}))$ a la MG 1. Para posteriormente calcular de forma local el valor de los estimadores globales. De esta manera la actualización de los estimadores globales $\mathbf{P}_i^{exc,(c)}$ se logra de forma local, llevándose a cabo a través de la ecuación

$$\left(\mathbf{P}_i^{exc,(c)}\right)_j(k+1) = \frac{1}{2} \left(\sum_{\mathcal{H}(i,j)=g} (\mathbf{P}_i^{exc})_j \right), \quad (4-21)$$

Tal como se muestra en (4-21), la actualización del subvector $\mathbf{P}_i^{exc,(c)}$ es realizada por medio de sus componentes j y únicamente utiliza el valor del estimador enviado por la MG vecina. De esta manera, la solución del problema se vuelve completamente distribuida, considerando que cada MG actualiza sus estimadores de intercambio de potencia y los estimadores globales de forma local. Ahora bien, las variables duales del problema se actualizan igualmente de forma local, teniendo en cuenta que con el uso de estimadores no existe ninguna restricción global. De acuerdo con esto, la actualización de los vectores λ_i que acompañan las restricciones $\mathbf{P}_i^{exc} = \mathbf{P}_i^{exc,(c)}$ se actualizan de la siguiente manera:

$$\lambda_i(k+1) = \lambda_i(k) + \rho \left(\mathbf{P}_i^{exc}(k+1) - \mathbf{P}_i^{exc,(c)}(k+1) \right). \quad (4-22)$$

Entonces, la solución del problema (4-19) a través del ADMM se consigue por medio de (4-20), (4-21) y (4-22). De igual manera, la secuencia de pasos se observa en la Figura 4-8.

4.5. Análisis de convergencia

Considerando que la convergencia en los algoritmos de optimización es un aspecto relevante, diferentes autores han abordado su análisis desde diferentes puntos de vista. Algunos han demostrado la convergencia considerando las ecuaciones de actualización como un sistema de ecuaciones no lineales y utilizando funciones de Lyapunov, mientras otros han buscado la manera de verificar la convergencia por medio del comportamiento de los residuales. Para la versión del ADMM mostrada en [Boyd et al., 2011], los residuales primal y dual se encuentran definidos en términos de las variables primales x y z , tal como se muestra a continuación:

$$r^{k+1} = Ax^{k+1} + Bz^{k+1} - c \quad (4-23)$$

$$s^{k+1} = \rho A'B(z^{k+1} - z^k). \quad (4-24)$$

Sin embargo, de acuerdo con [Wang et al., 2017] es posible definir los residuales del ADMM por medio de las variables primales z y las variables duales λ . Para esto los autores definen los residuales

$$\|r_i(k+1)\|_2^2 = \|\lambda_i(k+1) - \lambda_i(k)\|_2^2, \quad (4-25)$$

y

$$\|s_i(k+1)\|_2^2 = \rho \|z_i(k+1) - z_i(k)\|_2^2. \quad (4-26)$$

Utilizando (4-4) como la definición de la variable dual y reemplazándola en (4-25) se obtiene la expresión

$$\|r(k+1)\|_2^2 = \|\rho(Ax(k+1) - z(k+1))\|_2^2. \quad (4-27)$$

Entonces, las expresiones (4-25) y (4-26) son semejantes a las definiciones establecidas en [Boyd et al., 2011] por medio de (4-23) y (4-24). Por este motivo, mientras los residuales muestren un comportamiento decreciente con tendencia a cero es posible afirmar que el algoritmo converge.

Tal como se establece en [Erseghe, 2014], la convergencia del ADMM implica una brecha primal-dual de cero y esto es equivalente a que el problema de minimización (4-20) sea solucionable por medio de solvers comerciales. Para cumplir con esto, se utiliza un solver capaz de trabajar con las no linealidades del flujo óptimo de potencia. El solver CONOPT fue implementado por medio de PYOMO como la herramienta primaria de optimización en Python [Bynum et al., 2021], [Hart et al., 2011]. En otras palabras, el ADMM posee las mismas limitaciones de convergencia que dicho solver, por lo cual se espera que se comporte bien en la práctica teniendo en cuenta que las variables y las primeras derivadas de las restricciones son continuas.

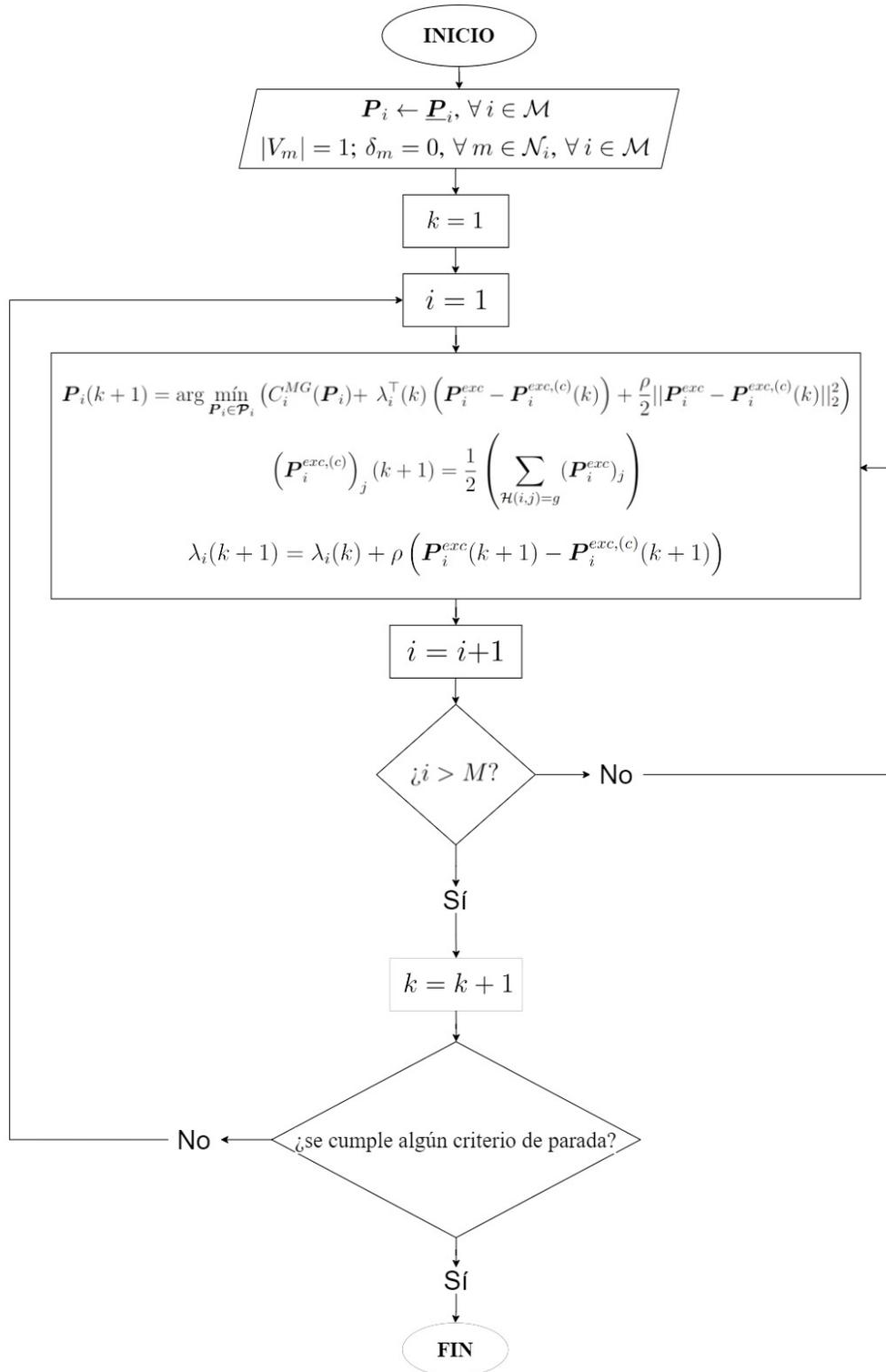


Figura 4-8: Algoritmo basado en ADMM para la gestión de energía en sistemas NMG.

5 Casos de estudio

Existen numerosos aportes en la literatura con propuestas de solución para el problema de la gestión energética en los sistemas NMG. No obstante, no existe un sistema o caso de estudio base que permita comparar las propuestas bajo las mismas normas de juego. Es por esto que en [Alam et al., 2020] los autores proponen un sistema NMG de referencia, que permita probar y demostrar la utilidad de los aportes en todos los niveles de control que sean necesarios. Para esto los autores proporcionan un sistema NMG estableciendo todos los parámetros eléctricos necesarios para realizar cualquier estudio. Este capítulo presenta el sistema de referencia, sus parámetros y los diferentes casos de estudio planteados sobre este para la evaluación de la propuesta.

5.1. Sistema NMG de 4 MGs conectadas a un DS

El sistema propuesto por [Alam et al., 2020] consiste en 4 MGs interconectadas a través de varios PCCs. Este conjunto de MGs puede adicionalmente interactuar con un DS a través de otros enlaces de intercambio. Dentro de las MGs se pueden observar dos topologías principales, radial y enmallada. A continuación, se presentarán las características de cada una de las MGs para luego presentar el sistema NMG ya conformado.

5.1.1. Microrred 1

La primera MG del sistema es la que mayor cercanía con el DS tiene. Este primer sistema tiene una topología enmallada, por lo que posee altos niveles de confiabilidad al ser un sistema redundante. La penetración de energías renovables en esta MG se da por medio de generadores fotovoltaicos, y a diferencia de las demás MGs no posee generadores eólicos.

Eléctricamente el sistema está compuesto por 6 nodos interconectados a través de 11 líneas de transmisión. Es importante resaltar que los enlaces PCC no están contados dentro de las líneas ya mencionadas. La generación del sistema está dividida en dos tecnologías principales, generadores convencionales y plantas solares fotovoltaicas. Los generadores convencionales en este tipo de sistemas proporcionan la inercia necesaria en el control de frecuencia. En esta MG al igual que en todas las demás, el nodo slack considerado para las restricciones del flujo es el nodo que lleva el subíndice $i = 1$ y en este caso en particular, es el nodo con el cual la MG se conecta con el DS. La Figura 5-1 muestra el diagrama unifilar de la MG 1.

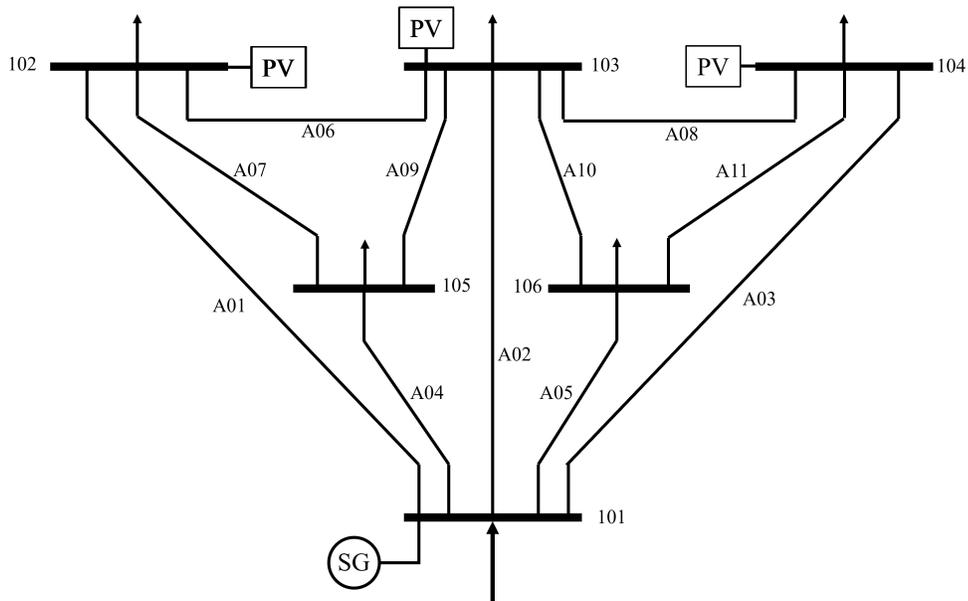


Figura 5-1: Microrred 1 del sistema NMG [Alam et al., 2020].

5.1.2. Microrred 2

La segunda MG del sistema NMG, al igual que la MG 1, tiene conexión directa con el DS. Esta característica permite que las MGs tengan la opción de compra directa al DS en caso de obtener un mejor precio sobre la energía en épocas de escasez. A diferencia de la MG 1, este sistema cuenta con mayor penetración de energías renovables, a través de generación fotovoltaica y generación eólica. Por otro lado, este sistema tiene una topología radial por lo que es inferior en niveles de confiabilidad a la MG 1 al no tener redundancias. No obstante, al estar inmerso en un sistema NMG sus falencias en confiabilidad se pueden ver superadas en la mayoría de escenarios.

En términos eléctricos, la MG 2 está compuesta por 9 nodos eléctricos que se interconectan por medio de 8 líneas de transmisión. Cuenta con una conexión con el DS y tres conexiones PCC con las demás MGs del sistema NMG. Por medio de estas conexiones PCC la MG 2 es capaz de comprar y vender energía a las MGs vecinas e incluso comprar energía al DS en periodos de escasez. En este sistema el nodo slack es el que lleva el subíndice $i = 1$ y el que conecta la MG 2 con el DS y la MG 1. Al ser un sistema radial, parte importante de su generación renovable se ve comprometida para eventos de contingencia que puede sacar de servicio las plantas. No obstante, esta falencia se ve superada al tener conexión con todos los sistemas adyacentes. La Figura 5-2 muestra el diagrama unifilar del sistema en cuestión.

5.1.3. Microrred 3

La tercera MG del sistema NMG es la de mayor tamaño en todo el sistema. Por esta misma razón es la que representa mayor demanda y al mismo tiempo mayor capacidad de generación.

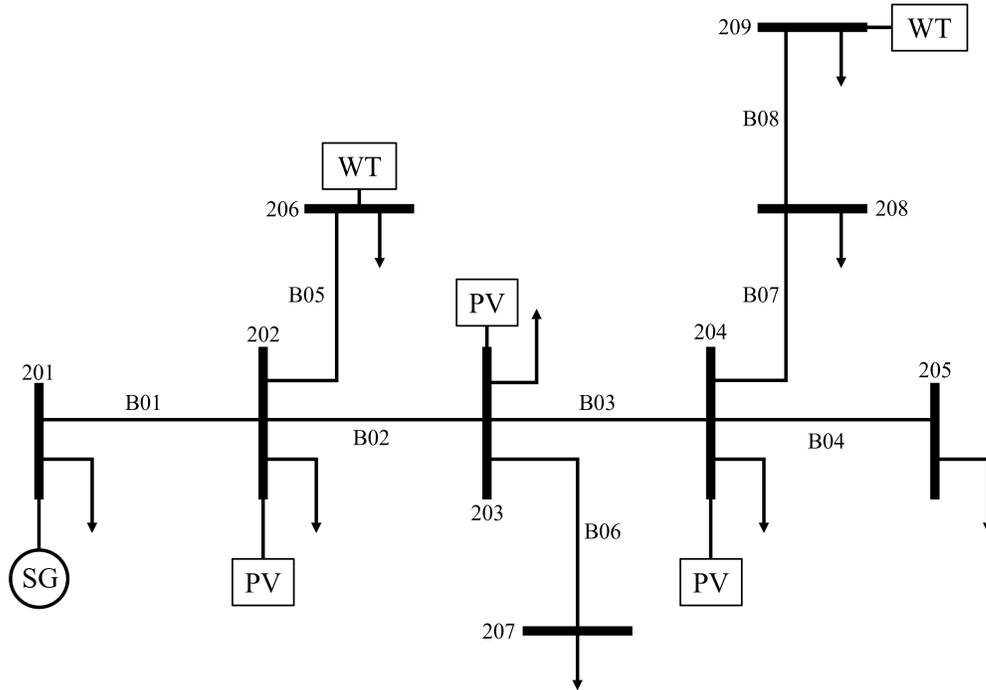


Figura 5-2: Microrred 2 del sistema NMG [Alam et al., 2020].

Al igual que las MGs 1 y 2 tiene conexión directa con el DS, lo que habilita las compras de energía en periodos de bajo costo o escasez en el sistema. Por otro lado, tiene el mismo tipo de topología que la MG 2, siendo también un sistema radial. Adicionalmente, al ser la MG de mayor tamaño es la que más cantidad de plantas de recursos renovables tiene.

El sistema eléctrico está compuesto por 18 nodos conectados a través de 17 líneas de transmisión. El número de líneas que conectan los nodos de este sistema es el mínimo requerido y es un aspecto característico de estos sistemas radiales. El sistema supera las desventajas propias de la radialidad por medio de tres PCC que le permiten comprar y vender energía a las MGs vecinas, al igual que una interconexión con el DS que habilita la compra de energía en momentos de déficit. Para esta MG el nodo slack lleva el subíndice $i = 1$ y es el nodo mediante el cual se conecta con la MG 1 y el DS. La Figura 5-3 muestra el diagrama unifilar del sistema en cuestión.

5.1.4. Microrred 4

La última MG del sistema NMG es la única que no tiene conexión con el DS. Este sistema al igual que la MG 1 tiene solo un tipo de generación renovable y es solar fotovoltaica. A pesar de ser el sistema de menor tamaño y de no contar con diferentes tipos de energía renovable, es un sistema enmallado lo que le permite garantizar altos niveles de confiabilidad a los usuarios.

El sistema está compuesto por 7 nodos conectados por medio de 8 líneas de transmisión.

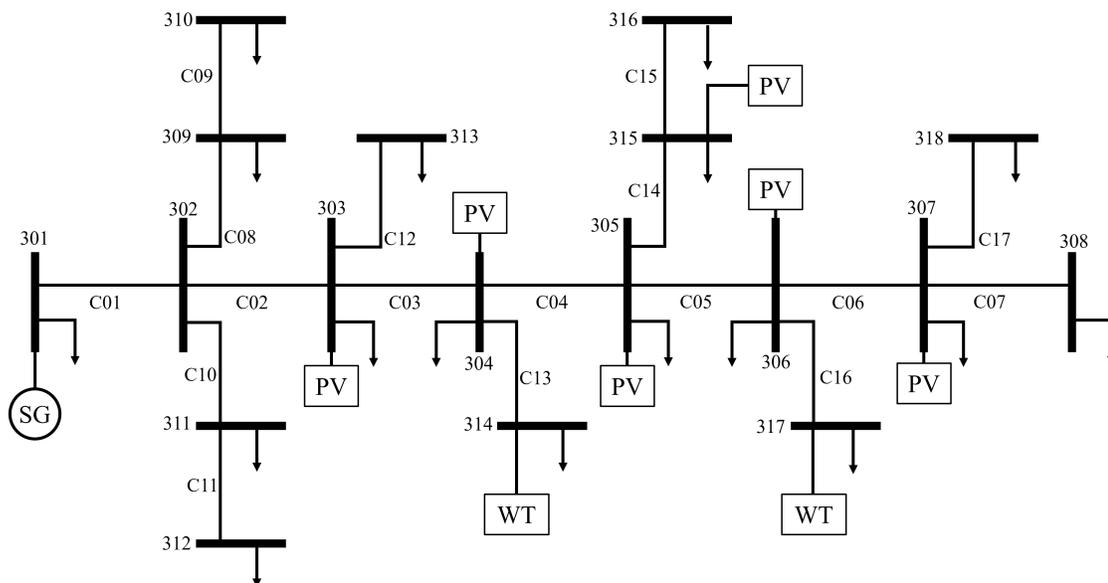


Figura 5-3: Microrred 3 del sistema NMG [Alam et al., 2020].

Adicionalmente, cuenta con dos PCC que le permiten intercambiar energía con las MG 2 y 3, que a su vez son las MGs de mayor tamaño en el sistema NMG. Considerando que no tiene conexión directa con el DS, la única posibilidad de comprar energía de menor costo en épocas de escasez es a través de las MGs 2 y 3. La Figura 5-4 muestra el diagrama unifilar del sistema en cuestión.

5.1.5. Sistema NMG

Finalmente, el sistema NMG de referencia que presentan los autores en [Alam et al., 2020] se muestra en la Figura 5-5. En esta figura se evidencia la interacción de las 4 MGs anteriormente presentadas, por medio de 5 PCC que permiten el intercambio de energía. Dentro de las características principales de este sistema se encuentra la capacidad de cambiar su topología de red, es decir, se puede configurar para trabajar como 4 MGs aisladas o como una interconexión con cualquier combinación posible haciendo uso de los PCC. Lo que permite la evaluación de diversos escenarios y consideraciones. Los autores proporcionan la información usualmente utilizada en todos los niveles de control para la evaluación de diferentes aportes que se puedan presentar en el marco de las NMGs. La Tabla 5-1 muestra un resumen de los datos anteriormente explicados y que definen al sistema NMG presentado en la Figura 5-5.

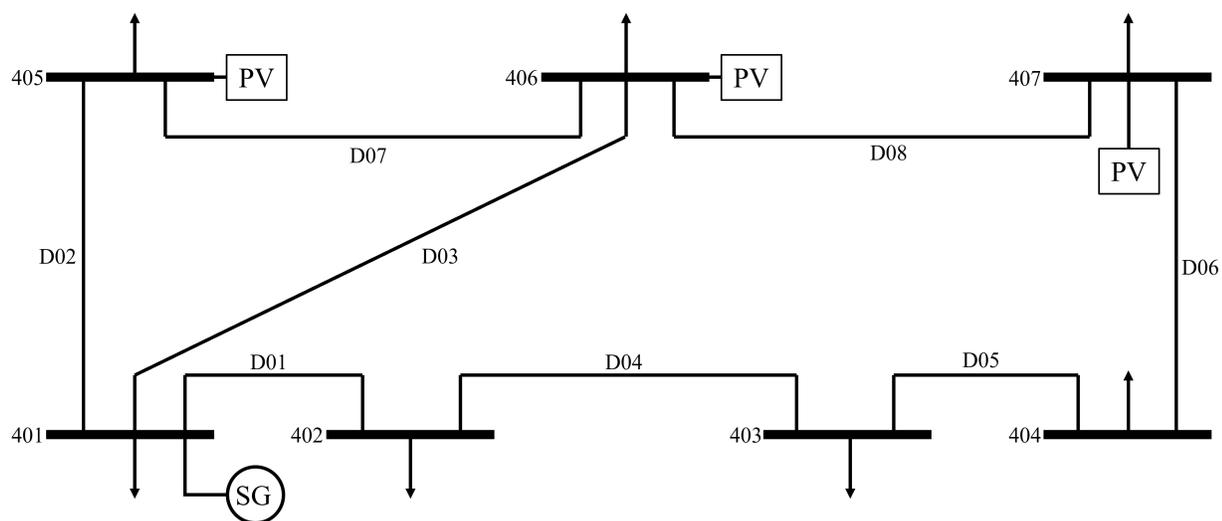


Figura 5-4: Microrred 4 del sistema NMG [Alam et al., 2020].

Tabla 5-1: Características del sistema NMG [Alam et al., 2020]

Componentes	Microrred 1	Microrred 2	Microrred 3	Microrred 4
Nodos	6	9	18	7
Nodo slack	101	201	301	401
Líneas	11	8	17	8
Topología	Enmallada	Radial	Radial	Enmallada
Generadores	3	3	3	2
Sistemas PV	3	3	6	3
Gen. eólicos	0	2	2	0

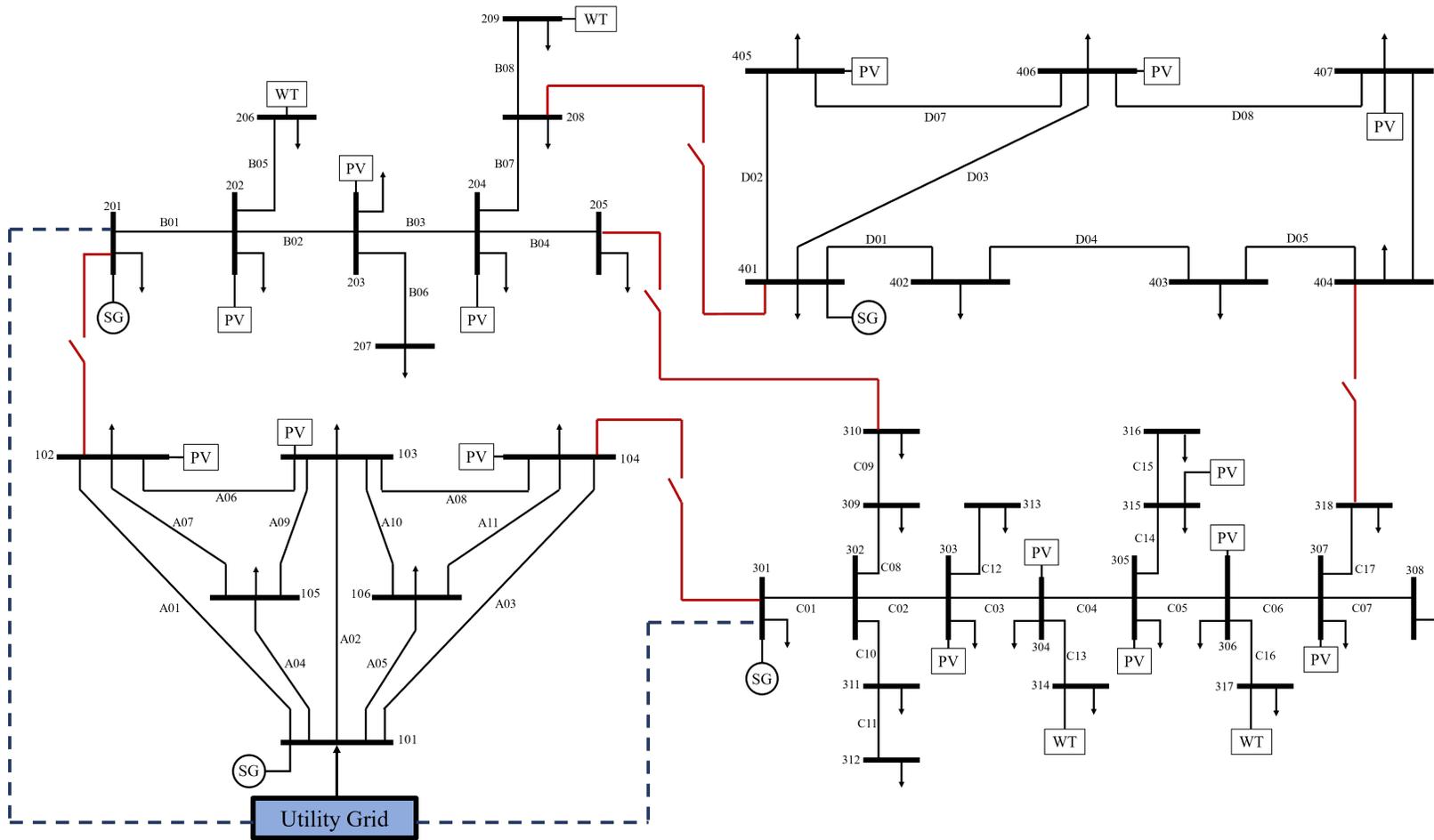


Figura 5-5: Sistema NMG compuesto por 4 MGs y un DS [Alam et al., 2020].

5.2. Casos de estudio

Los algoritmos de optimización desarrollados para ser aplicados en sistemas de potencia son usualmente evaluados bajo diferentes escenarios o casos de estudio. Es por esto que se proponen 3 casos de estudio que permiten evaluar el comportamiento del método y el resultado de la gestión energética de las MGs interactuando en el sistema. La intención de los casos de estudio propuestos es forzar los intercambios de potencia entre los diferentes sistemas, simulando condiciones de escasez en algunas MGs. Para esto, se limita la capacidad de generación y en algunos casos se incrementan las demandas de las MGs. De igual manera, es importante verificar la respuesta del algoritmo y de los sistemas ante diferentes precios de la energía para los intercambios. Los casos de estudio definidos se muestran a continuación.

- **Caso 1:** Para este primer escenario se establece un déficit de potencia en la MG 1 y 4, dejando las MGs 2 y 3 con la capacidad suficiente para atender los requerimientos de las otras dos MGs. El precio de los intercambios se establece en un valor único para todas las transacciones entre MGs, pero diferente al de la energía comprada al DS.
- **Caso 2:** En este segundo escenario pretende evaluar el comportamiento y resultado del algoritmo cuando ninguna MG requiere comprar energía. Para esto se aumentan los límites de generación de todos los subsistemas para evitar los intercambios entre ellos e incluso las compras al DS.
- **Caso 3:** El último escenario simula diferentes precios de venta en cada MG, buscando ver el resultado en la asignación de potencia que determina el algoritmo. Para ello se simulan las mismas condiciones de capacidad y demanda que en el caso 1, pero variando los precios con los cuales cada MG tranza su energía.

Considerando que el sistema en por unidad es utilizado, la Tabla 5-2 muestra los valores base utilizados en todos los escenarios. Adicionalmente, la tabla también muestra los precios de compra y venta de la energía para los intercambios y para las compras al DS. Por último, se muestra el valor de penalidad ρ y el valor que toma a lo largo de todas las iteraciones del algoritmo. El valor de este último parámetro se determinó a través de numerosas pruebas con distintos valores, dejando este resultado como el que mejor desempeño muestra.

5.2.1. Caso de estudio 1

Tal como se mencionó anteriormente, el propósito de este escenario es evaluar los despachos e intercambios en el sistema NMG, cuando existe un déficit de potencia por parte de algunas MGs. Para impulsar estos intercambios, en las MGs que tienen topologías enmalladas (1 y 4) se limitó la capacidad de generación y se incrementó el consumo de energía por medio de sus demandas. Por otro lado, en las MGs de tipología radial (2 y 3) se mantuvieron los límites de capacidad, asegurando la venta de potencia para los intercambios. Estos parámetros de

Tabla 5-2: Parámetros de simulación

Parámetro	Valor
Potencia base [kVA]	1000
Tensión base [kV]	11
Corriente base [A]	52.4864
Impedancia base [Ω]	121
Precio de intercambio (C^{exc})[\$/p.u.]	15
Precio del DS (C^{dso})[\$/p.u.]	8
Parámetro de penalidad (ρ)	2

potencia se muestran en la Tabla **5-3**. Por otro lado, para este escenario se estableció un único precio de compra y venta de energía entre MGs y otro valor para la compra de energía al DS, que son mostrados en la Tabla **5-2**.

Tabla 5-3: Condiciones de generación y demanda, caso 1.

Componentes	MG 1	MG 2	MG 3	MG 4
Generación activa [kW]	10280	8880	10460	5120
Demanda activa [kW]	13267	4302	7888	5695
Generación reactiva [kVAR]	9256	7814	9418	4228
Demanda reactiva [kVAR]	3664	1528	1269	1113

El resultado esperado de este escenario es una asignación de potencia por parte del algoritmo, que impulse la compra y venta de energía por parte de las MGs. Todo esto teniendo en cuenta que dentro de las 4 MGs existentes, 2 de estas son incapaces de atender su propia demanda generando localmente, sin embargo, cuentan con la oportunidad de los intercambios. De igual manera, varias MGs tienen la posibilidad de comprar potencia al DS en caso de no poder suplir su demanda aún con los intercambios. Para verificar el resultado del algoritmo, se monitorea el comportamiento de diferentes variables a lo largo de su desarrollo. Dentro de las variables a monitorear están las potencias despachadas en las unidades convencionales de cada MG. Este despacho se muestra en la Figura **5-6**.

De esta figura se puede observar como las MGs que sufren de un déficit de potencia establecen sus valores de despacho en valores máximos desde la primera iteración. En la Figura **5-6**, las curvas naranja y verde representan el despacho de los generadores convencionales de las MGs 2 y 3, respectivamente. Al observar estas curvas es posible apreciar un transitorio que muestra el camino que sigue el algoritmo para determinar los intercambios entre las MGs. Tal como se ve, la MG 3 sufre un transitorio pequeño que posteriormente regresa a su estado original, mientras la MG 2 en dicho transitorio cambia los valores de su generación, lo que puede significar el incremento derivado de un intercambio de potencia con otra MG. Por otro lado, las curvas azul y roja que representan las MGs 1 y 4, respectivamente, muestran que el despacho para las plantas de estas MGs se establece rápidamente en el máximo de su

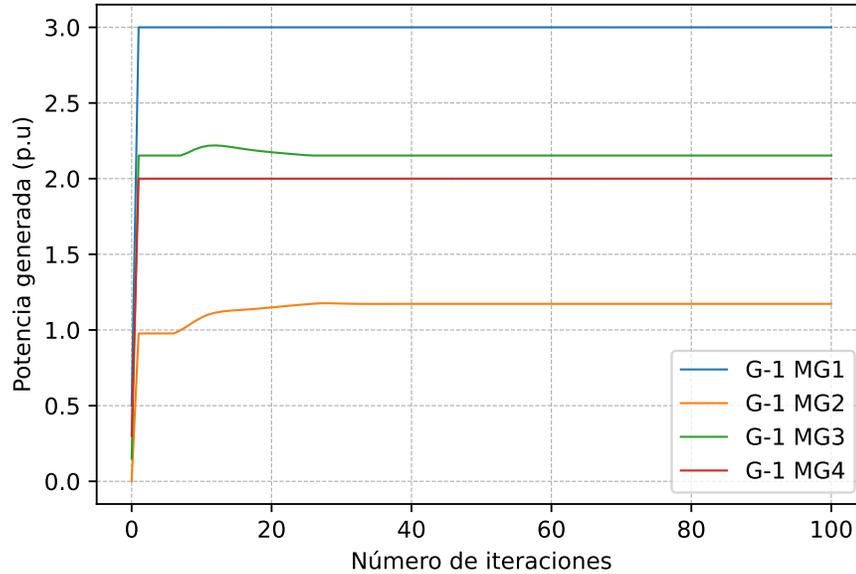


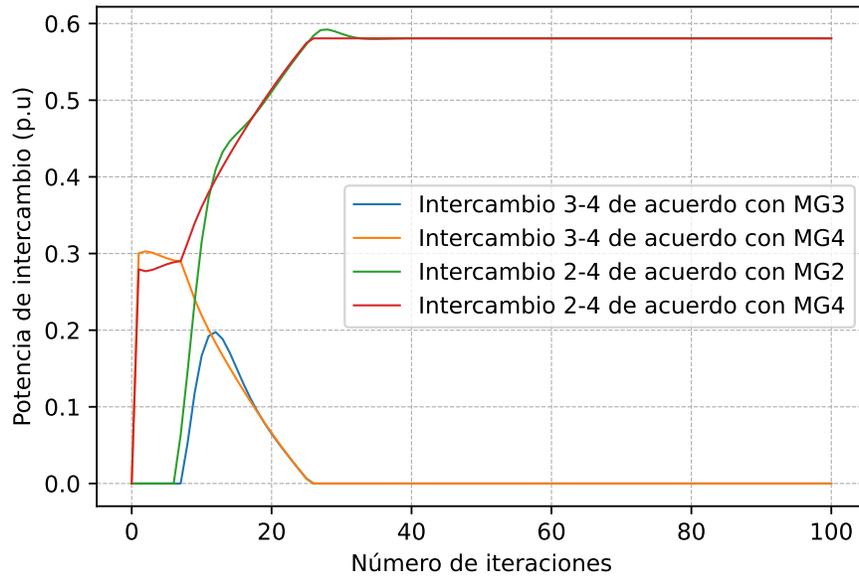
Figura 5-6: Despachos de las unidades convencionales, caso 1.

capacidad.

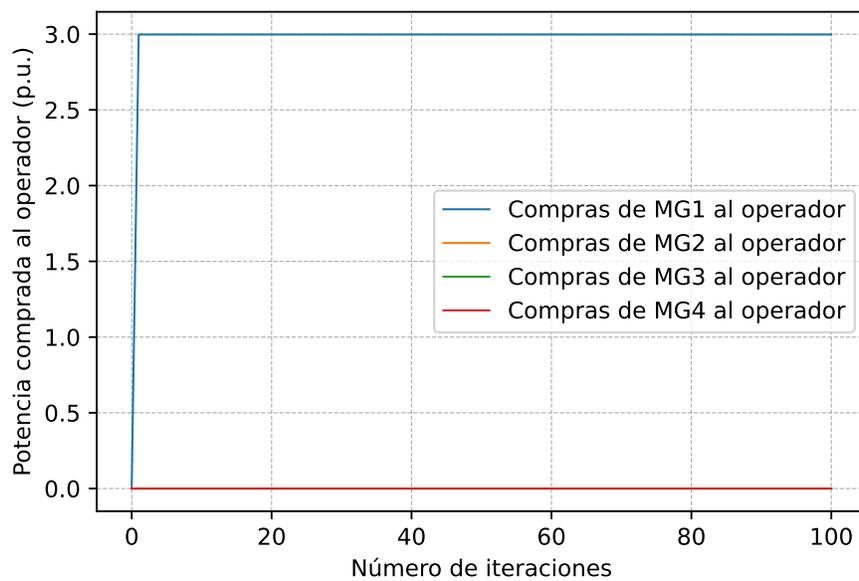
Dentro del desarrollo del algoritmo, es importante verificar y monitorear el comportamiento de los intercambios entre MGs y las compras de potencia al DS. La Figura 5.7(a) muestra el comportamiento de los intercambios entre MGs a lo largo de todo el proceso iterativo.

En la Figura 5.7(a) se pueden observar 4 curvas, donde todas hacen referencia a las importaciones de la MG 4. Tal como se puede observar en el diagrama unifilar presentado en la Figura 5-5, la MG 4 es el único sistema que no cuenta con la posibilidad de comprar potencia al DS y este es el motivo por el cual se monitorean sus importaciones. De las 4 curvas que se muestran en la Figura 5.7(a) se puede observar que estas convergen de a parejas, es decir, los estimadores de ambos extremos convergen al mismo valor siguiendo las reglas del consenso. Adicionalmente, los resultados muestran que las importaciones de la MG 4 provienen únicamente de la MG 2, a pesar de que los costos de compra y venta de los intercambios son los mismos. Es importante resaltar que estos resultados no se deben solo a los precios, sino también a las restricciones técnicas del sistema.

Por otro lado, las compras de potencia al DS se muestran en la Figura 5.7(b). En esta figura queda en evidencia que las importaciones de potencia de la MG 1, a diferencia de las de la MG 4, provienen por completo del DS. Este resultado sí se puede explicar por medio de los costos, considerando que la energía comprada al DS tiene un precio menor al de la compra y venta en los intercambios. Los otros dos subsistemas que tienen conexión con el DS no compran energía al DS, sino que la generan por completo de manera local.



(a) Intercambios de potencia, caso 1.



(b) Compras de potencia al DS, caso 1.

Figura 5-7: Intercambios y compras de potencia, caso de estudio 1.

Por último, la convergencia del algoritmo se verifica por medio de los residuales primales y duales explicados en el capítulo anterior, más puntualmente en (4-25) y (4-26). El comportamiento de estos valores a lo medida que el algoritmo avanza se muestra en las Figuras 5.8(a) y 5.8(b). De estas figuras es posible observar cómo a medida que avanzan las iteraciones su valor tiende a cero, tomando valores en el orden de 10^{-7} .

5.2.2. Caso de estudio 2

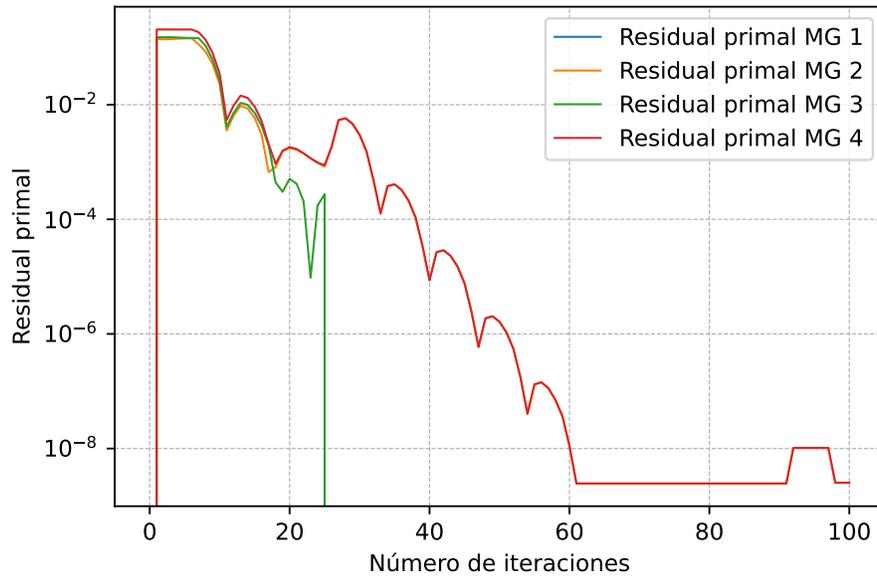
El segundo caso de estudio, tal como se mencionó previamente, tiene como objetivo verificar el comportamiento en la asignación cuando ninguna MG tiene problemas en atender su propia demanda de manera local, los valores de generación y demanda se muestran en la Tabla 5-4 . Para este escenario se consideraron los mismos parámetros presentados en la Tabla 5-2, donde los precios de compra y venta de energía entre MGs es mayor al precio de venta que maneja el DS. Al igual que en el primer caso de estudio, las variables a monitorear son las potencias despachadas en las unidades convencionales de cada MG, las potencias de intercambios entre MGs y compras al DS. Siguiendo este planteamiento, la Figura 5-9 muestra el comportamiento de los despachos.

Tabla 5-4: Condiciones de generación y demanda, caso 2.

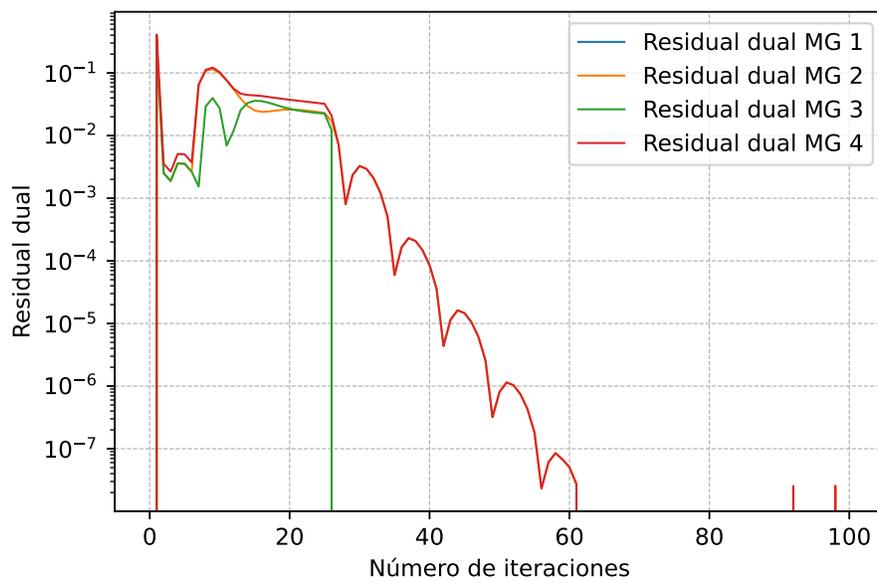
Componentes	MG 1	MG 2	MG 3	MG 4
Generación activa [kW]	10280	8880	10460	5120
Demanda activa [kW]	8988	4302	7888	3995
Generación reactiva [kVAR]	9256	7814	9418	4228
Demanda reactiva [kVAR]	1891	1528	1269	548

Es posible apreciar que el algoritmo asigna la máxima capacidad a las unidades de todas las MGs. En otras palabras, la solución más económica para cada MG es atender su demanda de manera local sin la necesidad de importar de otras MGs o comprar energía al DS. Los intercambios y compras al DS se muestran en la Figura 5-10, donde se puede evidenciar lo dicho anteriormente. En el resultado del algoritmo, cuando ninguna MG tiene la necesidad de importar energía, la asignación es completamente local. Además, en la Figura 5-10 se observa la ausencia de transitorios en el desarrollo del algoritmo, por lo cual se evidencia que los estimadores locales en ningún momento toman valores diferentes a cero.

Por último, para verificar la convergencia del mismo con estas condiciones operativas se hace el uso de los residuales primales y duales. Estos residuales se calculan por medio de (4-25) y (4-26) que son funciones dependientes de los valores que toman los intercambios y compras al DS. Por tal motivo en este escenario los residuales de cada MG permanecen en 0 durante todo el periodo evaluado.



(a) Residuales primales.



(b) Residuales duales.

Figura 5-8: Residuales primales y duales, caso de estudio 1.

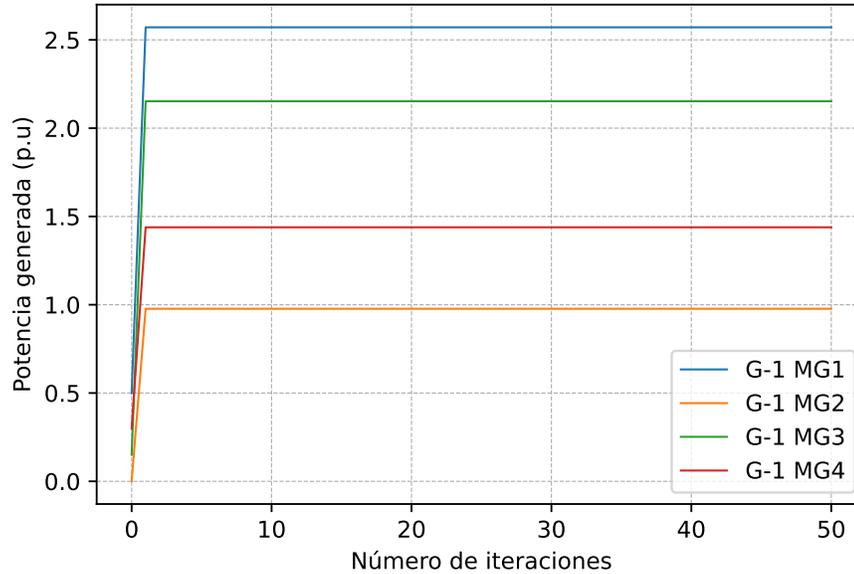


Figura 5-9: Despachos de las unidades convencionales, caso 2.

5.2.3. Caso de estudio 3

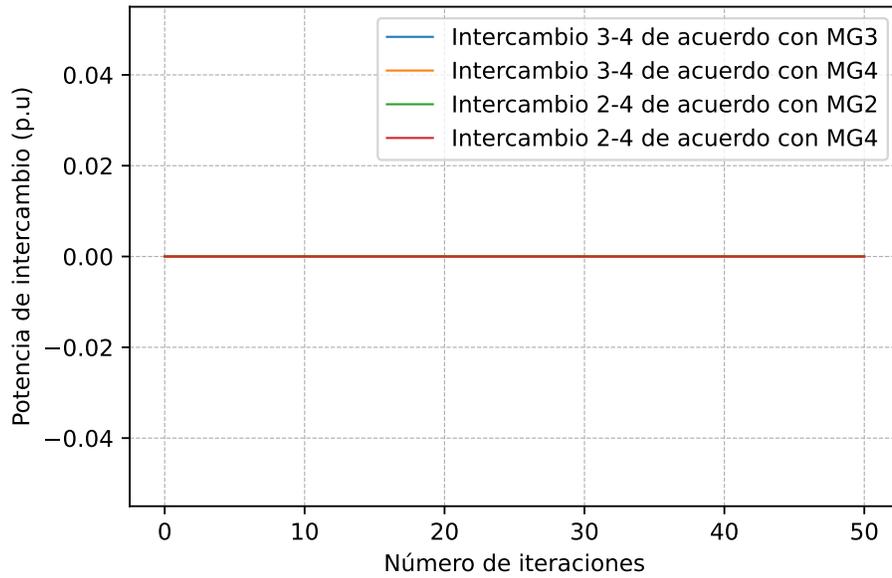
El último caso de estudio planteado tiene como objetivo mostrar el comportamiento de la asignación del algoritmo, cuando los precios de compra y venta de energía son distintos para cada MG, tal como se muestra en la Tabla 5-5. Este escenario se plantea considerando que los precios de venta de energía en un mercado eléctrico vienen determinados a partir de los costos propios de cada generador. Además, teniendo en cuenta que las MGs pueden verse como recursos distribuidos en un sistema más grande, estas venderían energía en un mercado como cualquier otro generador disponible. Por todo esto, considerar un escenario con diferentes precios de venta es pertinente.

Tabla 5-5: Precios de venta para los intercambios, caso 3.

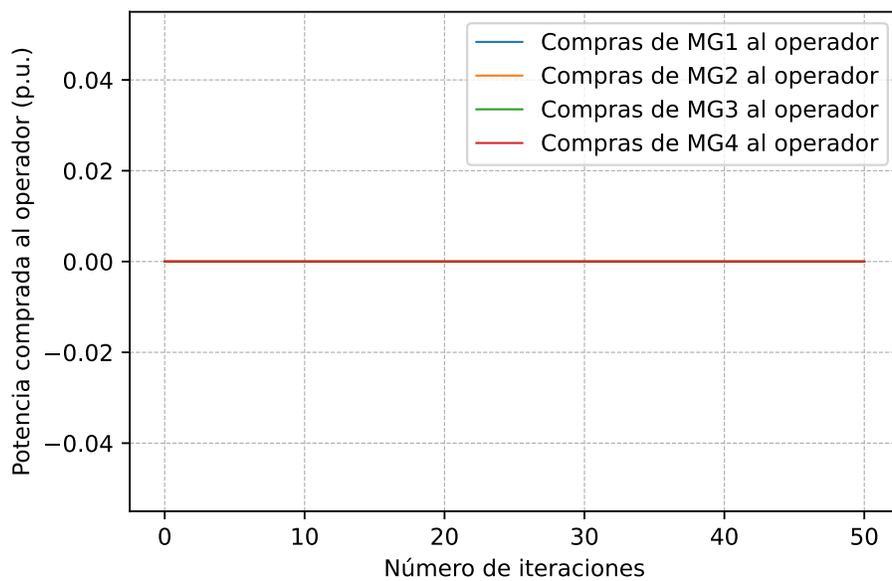
Descripción	MG 1	MG 2	MG 3	MG 4
Precio de venta [\$/kW]	12	15	7	13

Los valores de capacidad de generación y demanda de cada MG se muestran en la Tabla 5-6. Al igual que en los anteriores casos de estudio, las variables a monitorear son los despachos de unidades convencionales, intercambios de energía entre MGs, compras de energía al DS y los residuales correspondientes. La Figura 5-11 presenta el comportamiento de los despachos de las unidades convencionales, cuando se consideran distintos precios para la compra y venta de energía entre MGs.

Considerando que en el caso de estudio 1 todas las importaciones de la MG 4 provienen de la



(a) Intercambios de potencia, caso 2.

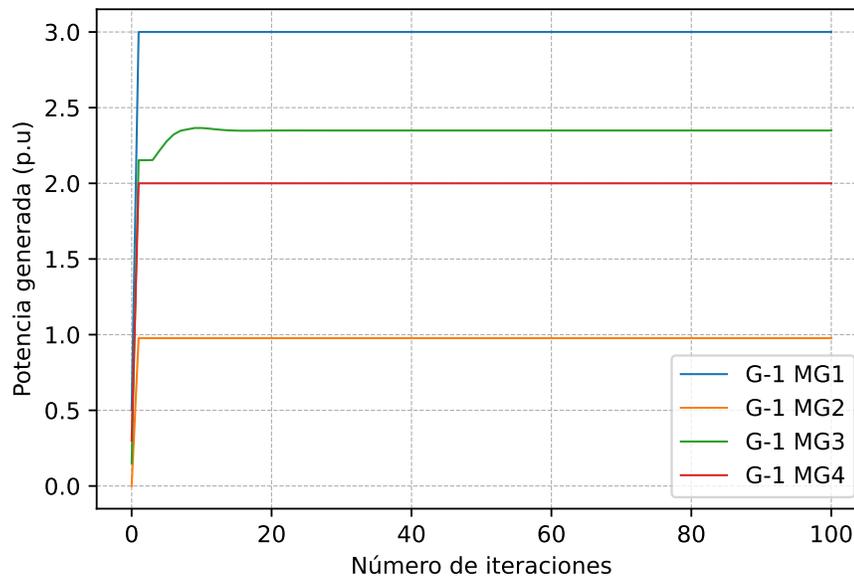


(b) Compras de potencia al DS, caso 2.

Figura 5-10: Intercambios y compras de potencia, caso de estudio 2.

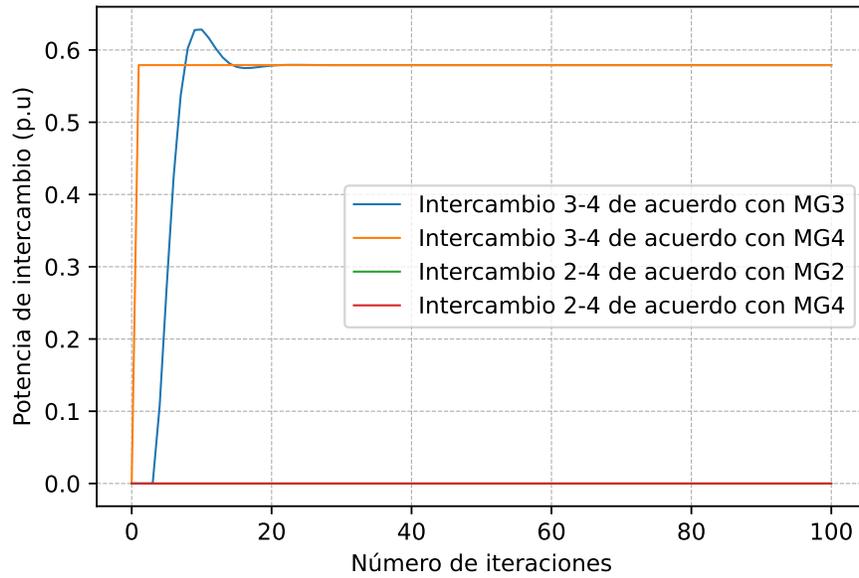
Tabla 5-6: Capacidades de generación y demanda, caso 3.

Descripción	MG 1	MG 2	MG 3	MG 4
Generación activa [kW]	10280	8880	10460	5120
Demanda activa [kW]	13267	4302	7888	5695
Generación reactiva [kVAR]	9256	7814	9418	4228
Demanda reactiva [kVAR]	3664	1528	1269	1113

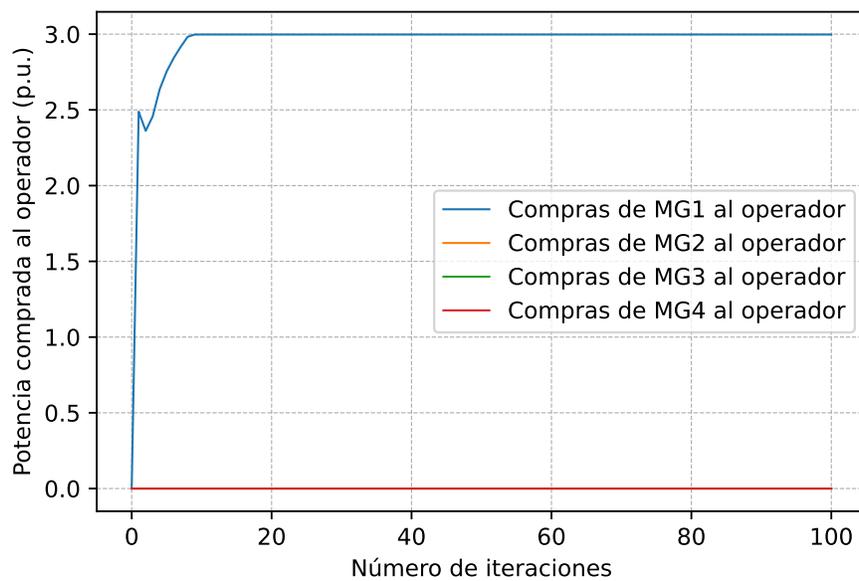
**Figura 5-11:** Despachos de las unidades convencionales, caso 3.

MG 2, en este escenario se modificaron los precios para hacer más atractiva la importación desde la MG 3. El resultado de esta modificación en los precios se puede observar en la Figura 5-11, por medio del transitorio presente en la curva verde (MG 3). Este transitorio representa el incremento de potencia generada que hace la MG 3 para exportarla hacia la MG 4. De igual manera, los intercambios de potencia se muestran en la Figura 5.12(a).

Tal como se observa en la Figura 5.12(a), los estimadores relacionados con las importaciones de la MG 4 desde la MG 3 convergen al mismo valor, mientras a lo largo del proceso los estimadores del intercambio entre la MG 2 y la 4 permanecen en cero. Ahora bien, considerando que la necesidad de importar potencia por parte de la MG 1 persiste, el algoritmo determina que el camino menos costoso es por medio del DS, tal como se muestra en la Figura 5.12(b). Por último, la Figura 5-13 muestra que la convergencia del algoritmo se consigue en este caso de estudio. Este comportamiento se puede corroborar por medio de (4-25) y (4-26) y verificando que el valor del residual tenga una tendencia a converger a cero.

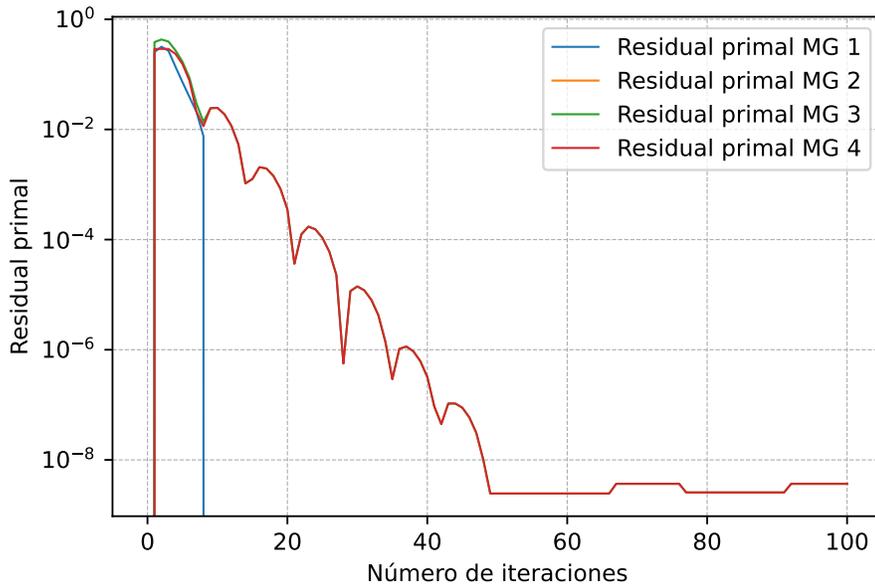


(a) Intercambios de potencia, caso 3.

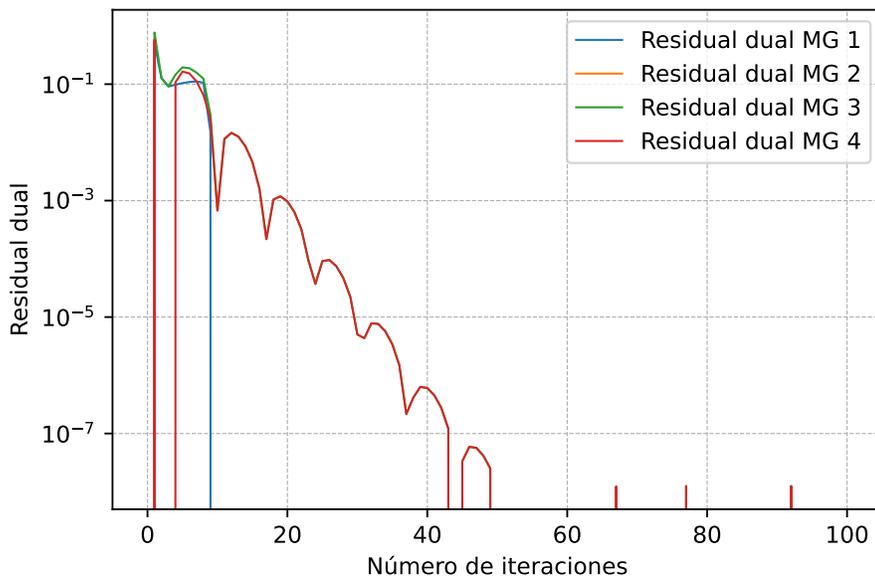


(b) Compras de potencia al DS, caso 3.

Figura 5-12: Intercambios y compras de potencia, caso de estudio 3.



(a) Residuales primales, caso 3.



(b) Residuales duales, caso 3.

Figura 5-13: Residuales primales y duales, caso de estudio 3.

6 Conclusiones

Se modeló un sistema de gestión de energía por medio de un problema de optimización, cuya función objetivo considera los costos relacionados con la generación de la energía eléctrica y las transacciones presentes en un sistema de microrredes interconectadas. Se partió del modelamiento del problema para una microrred individual, para posteriormente formular el problema para un sistema de microrredes interconectadas. Por otra parte, por medio de las restricciones del problema de optimización se consideró el funcionamiento de cada sistema eléctrico y sus interacciones, haciendo uso de las ecuaciones de flujo de potencia AC. Estas ecuaciones hicieron posible que el algoritmo funcione para cualquier sistema eléctrico sin importar su topología.

Se desarrolló un algoritmo de optimización basado en el ADMM para resolver el problema de manera distribuida, es decir, resolverlo por medio de interacciones entre los diferentes subsistemas involucrados. Para la solución por medio del ADMM fue necesaria la inclusión de nuevas variables en la formulación del problema de optimización. Estas nuevas variables modificaron las restricciones que modelaban el intercambio de potencia entre microrredes, para evitar el uso de variables globales que representaran centralización parcial de la información. Las nuevas variables incluidas fueron estimadores locales utilizados en el proceso de consenso, donde cada subsistema está en la capacidad de representar localmente el valor de las variables globales con las cuales tiene relación. Dentro de las ventajas que proporciona el uso de estos estimadores, está la completa distribución de la solución del problema haciendo prescindible la participación de cualquier subsistema en el proceso. Por otro lado, se implementó el algoritmo propuesto haciendo uso de una herramienta computacional que permitió utilizar un *solver* comercial para el manejo de las no linealidades presentes en la formulación del problema.

Se evaluó el desempeño del algoritmo propuesto por medio de un sistema de referencia de 4 microrredes interconectadas. El sistema utilizado permitió evaluar la aplicabilidad del algoritmo en diferentes topologías de red, ya sean enmalladas o radiales. De igual manera, se plantearon diferentes condiciones de red por medio de tres casos de estudio que permitieron simular escenarios de escasez energética forzando los intercambios de potencia entre los subsistemas. Los resultados del algoritmo fueron satisfactorios, considerando que los intercambios existieron en el caso de estudio donde se forzó la escasez energética de algunos subsistemas y fueron nulos cuando todas las microrredes tenían recursos suficientes para

atender sus demandas. Por otro lado, se analizó el comportamiento de los intercambios asignados por el algoritmo cuando los precios en las transacciones eran diferentes, es decir, el costo de la energía transada dependía del sistema que la estaba vendiendo. En este caso, el algoritmo nuevamente mostró un buen comportamiento al despachar siempre las alternativas de menor costo. Finalmente, la convergencia del algoritmo se verificó por medio de los residuales primales y duales del problema de optimización.

Bibliografía

- [Abhinav et al., 2018] Abhinav, S., Modares, H., Lewis, F. L., Ferrese, F., and Davoudi, A. (2018). Synchrony in networked microgrids under attacks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6):6731–6741.
- [Ahmadi and Rezaei, 2020] Ahmadi, S. E. and Rezaei, N. (2020). A new isolated renewable based multi microgrid optimal energy management system considering uncertainty and demand response. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 118(September 2019):105760.
- [Alam et al., 2019] Alam, M. N., Chakrabarti, S., and Ghosh, A. (2019). Networked Microgrids : State-of-the-Art and Future Perspectives. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(3):1238–1250.
- [Alam et al., 2020] Alam, M. N., Chakrabarti, S., and Liang, X. (2020). A Benchmark Test System for Networked Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(10):6217–6230.
- [Bertsekas and Tsitsiklis, 1989] Bertsekas, D. P. and Tsitsiklis, J. N. (1989). *Parallel and Distributed Computation: Numerical Methods*. Prentice-Hall, Inc., USA.
- [Boyd et al., 2011] Boyd, S., Parikh, N., Chu, E., Peleato, B., and Eckstein, J. (2011). Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers. *Foundation and trains in machine learning*, 3(1):1–122.
- [Bui et al., 2018] Bui, V. H., Hussain, A., and Kim, H. M. (2018). A multiagent-based hierarchical energy management strategy for multi-microgrids considering adjustable power and demand response. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(2):1323–1333.
- [Bullich-Massagué et al., 2018] Bullich-Massagué, E., Díaz-González, F., Aragüés-Peñalba, M., Girbau-Llistuella, F., Olivella-Rosell, P., and Sumper, A. (2018). Microgrid clustering architectures. *Applied Energy*, 212(December 2017):340–361.
- [Bynum et al., 2021] Bynum, M. L., Hackebeil, G. A., Hart, W. E., Laird, C. D., Nicholson, B. L., Sirola, J. D., Watson, J.-P., and Woodruff, D. L. (2021). *Pyomo–optimization modeling in python*, volume 67. Springer Science & Business Media, third edition.

- [Cao et al., 2020] Cao, X., Wang, J., Wang, J., and Zeng, B. (2020). A Risk-Averse Conic Model for Networked Microgrids Planning with Reconfiguration and Reorganizations. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(1):696–709.
- [Castro et al., 2020] Castro, M. V., Moreira, C., and Carvalho, L. M. (2020). Hierarchical optimisation strategy for energy scheduling and volt/var control in autonomous clusters of microgrids. *IET Renewable Power Generation*, 14(1):27–38.
- [Che et al., 2015] Che, L., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, A., and Al-Turki, Y. (2015). Hierarchical coordination of a community microgrid with AC and DC microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(6):3042–3051.
- [Chen et al., 2021] Chen, B., Wang, J., Lu, X., Chen, C., and Zhao, S. (2021). Networked Microgrids for Grid Resilience, Robustness, and Efficiency: A Review. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(1):18–32.
- [Erseghe, 2014] Erseghe, T. (2014). Distributed optimal power flow using ADMM. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(5):2370–2380.
- [Farzin et al., 2016] Farzin, H., Fotuhi-Firuzabad, M., and Moeini-Aghaie, M. (2016). Enhancing Power System Resilience Through Hierarchical Outage Management in Multi-Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(6):2869–2879.
- [Gao et al., 2018] Gao, H., Liu, J., Wang, L., and Wei, Z. (2018). Decentralized Energy Management for Networked Microgrids in Future Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(4):3599–3610.
- [Gazijahani and Salehi, 2017] Gazijahani, F. S. and Salehi, J. (2017). Stochastic multi-objective framework for optimal dynamic planning of interconnected microgrids. *IET Renewable Power Generation*, 11(14):1749–1759.
- [Golsorkhi et al., 2021] Golsorkhi, M. S., Hill, D. J., and Baharizadeh, M. (2021). A Secondary Control Method for Voltage Unbalance Compensation and Accurate Load Sharing in Networked Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(4):2822–2833.
- [Golsorkhi et al., 2018] Golsorkhi, M. S., Hill, D. J., and Karshenas, H. R. (2018). Distributed voltage control and power management of networked microgrids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(4):1892–1902.
- [Harmon et al., 2018] Harmon, E., Ozgur, U., Cintuglu, M. H., De Azevedo, R., Akkaya, K., and Mohammed, O. A. (2018). The Internet of Microgrids: A Cloud-Based Framework for Wide Area Networked Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(3):1262–1274.

- [Hart et al., 2011] Hart, W. E., Watson, J.-P., and Woodruff, D. L. (2011). Pyomo: modeling and solving mathematical programs in python. *Mathematical Programming Computation*, 3(3):219–260.
- [Hussain et al., 2018] Hussain, A., Bui, V. H., and Kim, H. M. (2018). A Resilient and Privacy-Preserving Energy Management Strategy for Networked Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(3):2127–2139.
- [Islam et al., 2021] Islam, M., Yang, F., and Amin, M. (2021). Control and optimisation of networked microgrids: A review. *IET Renewable Power Generation*, 15(6):1133–1148.
- [Jafari et al., 2020] Jafari, A., Ganjeh Ganjehlou, H., Khalili, T., and Bidram, A. (2020). A fair electricity market strategy for energy management and reliability enhancement of islanded multi-microgrids. *Applied Energy*, 270(May):115170.
- [Karimi and Jadid, 2020] Karimi, H. and Jadid, S. (2020). Optimal energy management for multi-microgrid considering demand response programs: A stochastic multi-objective framework. *Energy*, 195:116992.
- [Khavari et al., 2020] Khavari, F., Badri, A., and Zangeneh, A. (2020). Energy management in multi-microgrids considering point of common coupling constraint. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 115(August 2019):105465.
- [Li et al., 2019] Li, Z., Bahramirad, S., Paaso, A., Yan, M., and Shahidehpour, M. (2019). Blockchain for decentralized transactive energy management system in networked microgrids. *Electricity Journal*, 32(4):58–72.
- [Li et al., 2017] Li, Z., Shahidehpour, M., Aminifar, F., Alabdulwahab, A., and Al-Turki, Y. (2017). Networked Microgrids for Enhancing the Power System Resilience. *Proceedings of the IEEE*, 105(7):1289–1310.
- [Liu et al., 2016] Liu, G., Starke, M. R., Ollis, B., and Xue, Y. (2016). *Networked Microgrids Scoping Study*. Number October.
- [Liu et al., 2018] Liu, T., Tan, X., Sun, B., Wu, Y., and Tsang, D. H. (2018). Energy management of cooperative microgrids: A distributed optimization approach. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 96(October 2017):335–346.
- [Schneider et al., 2018] Schneider, K. P., Member, S., Tuffner, F. K., Elizondo, M. A., Liu, C.-c., Xu, Y., Backhaus, S., and Ton, D. (2018). Enabling Resiliency Operations Across Multiple Microgrids With Grid Friendly Appliance Controllers. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(5):4755–4764.

- [Toro and Mojica-Nava, 2016] Toro, V. and Mojica-Nava, E. (2016). Droop-free control for networked microgrids. *2016 IEEE Conference on Control Applications, CCA 2016*, pages 374–379.
- [Wang et al., 2018] Wang, D., Qiu, J., Reedman, L., Meng, K., and Lai, L. L. (2018). Two-stage energy management for networked microgrids with high renewable penetration. *Applied Energy*, 226(March):39–48.
- [Wang et al., 2020a] Wang, Y., Nguyen, T. L., Xu, Y., Tran, Q. T., and Caire, R. (2020a). Peer-to-Peer Control for Networked Microgrids: Multi-Layer and Multi-Agent Architecture Design. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(6):4688–4699.
- [Wang et al., 2017] Wang, Y., Wu, L., and Wang, S. (2017). A Fully-Decentralized Consensus-Based ADMM Approach for DC-OPF with Demand Response. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(6):2637–2647.
- [Wang et al., 2015] Wang, Z., Chen, B., Wang, J., Begovic, M. M., and Chen, C. (2015). Coordinated energy management of networked microgrids in distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(1):45–53.
- [Wang et al., 2016] Wang, Z., Chen, B., Wang, J., and Kim, J. (2016). Decentralized Energy Management System for Networked Microgrids in Grid-Connected and Islanded Modes. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(2):1097–1105.
- [Wang et al., 2020b] Wang, Z., Yu, X., Mu, Y., and Jia, H. (2020b). A distributed Peer-to-Peer energy transaction method for diversified prosumers in Urban Community Microgrid System. *Applied Energy*, 260(92):114327.
- [Wu et al., 2020] Wu, X., Xu, Y., Wu, X., He, J., Guerrero, J. M., Liu, C. C., Schneider, K. P., and Ton, D. T. (2020). A Two-Layer Distributed Cooperative Control Method for Islanded Networked Microgrid Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(2):942–957.
- [Yao et al., 2021] Yao, W., Wang, Y., Xu, Y., Lin, P., Qi, Y., and Wu, Q. (2021). Distributed layered control and stability analysis of islanded networked-microgrids. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 129(December 2020):106889.
- [Zaery et al., 2021] Zaery, M., Wang, P., Wang, W., and Xu, D. (2021). A novel fully distributed fixed-time optimal dispatch of DC multi-microgrids. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 129(July 2020):106792.
- [Zamboni de Souza and Castilla, 2018] Zamboni de Souza, A. C. and Castilla, M. (2018). *Microgrids design and implementation*.

-
- [Zhou et al., 2020] Zhou, Q., Shahidehpour, M., Paaso, A., Bahramirad, S., Alabdulwahab, A., and Abusorrah, A. (2020). Distributed Control and Communication Strategies in Networked Microgrids. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 22(4):2586–2633.
- [Zou et al., 2019] Zou, H., Mao, S., Wang, Y., Zhang, F., Chen, X., and Cheng, L. (2019). A Survey of Energy Management in Interconnected Multi-Microgrids. *IEEE Access*, 7:72158–72169.