

Llenar en computadora con ayuda del oficio de modalidad.

La modalidad de tesis es única para los posgrados

Nivel:	
Licenciatura	
Maestría	X
Doctorado	

Marcar con una X

Modalidad:	TESIS
-------------------	-------

Año:	2016
-------------	------

Poner el número de año p.e. 2015

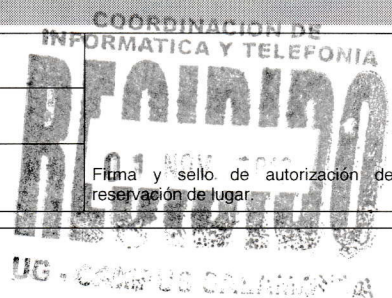
Información sobre Obtención de Grado Académico:

Nombre	Luis Orlando Polanco Vásquez
NUA	144975
Programa	200321 Maestría en Ingeniería Eléctrica (Instrumentación y Sistemas Digitales)

Para modalidades con Jurado completar la siguiente información:

Lugar, hora y fecha de la presentación

Lugar	Auditorio 1 Campus Irapuato Salamanca DICIS
Hora	16:00 hrs.
Fecha	16 de noviembre de 2016



Título del trabajo	Algoritmos de FOP. para el Control Terciario de Micro-redes
---------------------------	---

Jurado

	Nombre con grado académico completo: p.e. Doctor en Informática Industrial Nombre Apellido Paterno Apellido Materno	Firma de autorización para realización de examen de grado o titulación.
Presidente	Doctor en Ciencias en la Especialidad de Ingeniería Eléctrica José Merced Lozano García	
Secretario	Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica Alejandro Pizano Martínez	
Vocal (1)	Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica Enrique Arnoldo Zamora Cárdenas	
Vocal 2 (Doctorado)		
Vocal 3 (Doctorado)		

Asesoría

Director del trabajo	Doctor: Alejandro Pizano Martínez
Codirector	Doctor: Héctor Javier Estrada García

(No llenar para uso exclusivo de la Coordinación.)

Valida (nombre y firma): _____

Una vez terminado de llenar imprimir en dos tantos (uno para entregar al iniciar el trámite de autorización del examen de grado o titulación y otro para firma de recibido).

Asunto: *Notificación de Dictamen de Propuesta de Tesis*

C. Luis Orlando Polanco Vásquez

Estudiante de la Maestría en Ingeniería Eléctrica (Instrumentación y Sistemas Digitales)

PRESENTE.

Una vez concluido el análisis y discusión sobre la propuesta del proyecto de tesis titulada: **“Algoritmos de FOP para el control terciario de Micro-redes”**, bajo la revisión del *Asesor(es)*: Pizano Martínez Alejandro, Dr. y Estrada García Héctor Javier Dr.; en su reunión ordinaria del semestre Enero-Junio 2016, la Comisión de Titulación del Consejo Divisional acordó la siguiente resolución:

Con fundamento en las fracciones primera a cuarta del Artículo 67 y el Artículo 68 del Estatuto Académico, esta comisión acordó **POR UNANIMIDAD DE VOTOS ACEPTAR SU PROPUESTA DE TESIS** designando el siguiente jurado:

Presidente: *Lozano García José Merced, Dr.*

Secretario: *Pizano Martínez Alejandro, Dr.*

Vocal: *Zamora Cárdenas Enrique Arnoldo, Dr.*

Se extiende la presente notificación de la resolución el

ATENTAMENTE
“LA VERDAD OS HARÁ LIBRES”
EL DIRECTOR

Dr. Roberto Rojas Laguna

c.c.p. Dr. Raúl Enrique Sánchez Yáñez – Secretario Académico de la División de Ingenierías
Pizano Martínez Alejandro, Dr. y Estrada García Héctor Javier Dr. – Asesor(es)
Archivo

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS - CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA

Domicilio Conocido, Comunidad de Palo Blanco, Carretera Salamanca-Valle de Santiago km. 3.5 + 1.8
Salamanca, Gto., C.P. 36885, Tel (464) 647-9940, FAX ext. 2311

Salamanca, Gto., a 1 de NoViembre del 20 16.

M. EN I. J. ANTONIO ALVAREZ JAIME
COORDINADOR DE ASUNTOS ESCOLARES
P R E S E N T E.-

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno (a) Luis Orlando Polanco Vázquez del *Programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica* y cuyo número de NUA es: 144975 del cual soy director. El título de la tesis es: Algoritmos de FOP para el control terciario de micro-redes

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los dos sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

ATENTAMENTE



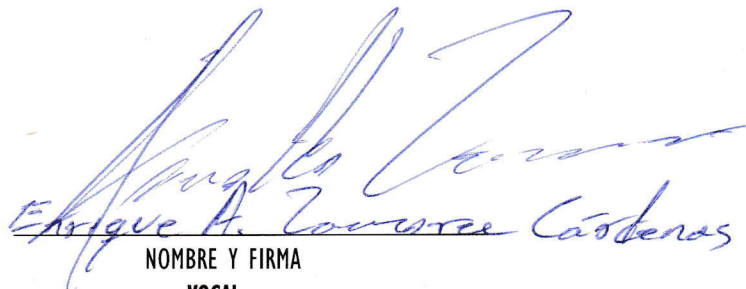
NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS
SECRETARIO



NOMBRE Y FIRMA
DIRECTOR DE TESIS



NOMBRE Y FIRMA
PRESIDENTE



NOMBRE Y FIRMA
VOCAL



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

**“Algoritmos de FOP. para el Control Terciario
de Micro-redes”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

(Instrumentación y Sistemas Digitales)

PRESENTA:

Ing. Luis Orlando Polanco Vásquez

DIRECTORES:

Dr. Alejandro Pizano Martínez

Dr. Héctor Javier Estrada García



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

**“Algoritmos de FOP. para el Control Terciario
de Micro-redes”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

(Instrumentación y Sistemas Digitales)

PRESENTA:

Ing. Luis Orlando Polanco Vásquez

DIRECTORES:

Dr. Alejandro Pizano Martínez

Dr. Héctor Javier Estrada García

Dedicatoria

A Dios y a la Virgen María por permitirme este nuevo logro en la vida.

Agradecimientos

Gracias a toda mi familia, quien, a pesar de la distancia, siempre estuvieron conmigo apoyándome en este proyecto de vida.

Gracias.

Al Dr. Alejandro Pizano Martínez quien me brindó su apoyo incondicional y conocimientos para la elaboración de este trabajo, muchas gracias.

Al Dr. Juan Gabriel Aviña quien siempre estuvo apoyándome en todo este tiempo de la maestría, muchas gracias.

Gracias. Al Pueblo de México que, con el aporte de sus esfuerzos, fue posible este logro personal y que se convierte también un logro para mi país Guatemala, eternamente agradecido.

Agradecimientos Institucionales

Gracias a la Universidad de Guanajuato por brindarme las guías y herramientas necesarias para lograr este nuevo proyecto.

Totalmente agradecido con el CONACYT, quien fue el patrocinador económico para el desarrollo en su totalidad de este proyecto.

Gracias al Dr. Manuel Pérez García y grupo de trabajo por su colaboración en la estancia de investigación en la Universidad de Almería, España, en conjunto con el Centro de Investigación en energía Solar CIESOL.

Summary

In this work the problem of optimal power flow (OPF) for tertiary control of micro-grids operating in non-autonomous mode was addressed. The objective is to find the optimal power dispatch that maximizes the economic benefits, such power can come from renewable sources, storage device or the main supply grid. For this purpose, it was proposed a unified optimization model of micr-ogrids operating in non-autonomous mode. This model was integrated based on the models corresponding to the distribution network (single-phase), photovoltaic panels, wind generator, batteries for energy storage and a vehicle fleet. For the purposes of the present work the predictions of the electric demand, the solar radiation and the wind speed for a period of time T are considered to be already known. The solution of the optimization model is computed by means of using three different algorithms provided by the toolbox of optimization of MatLab®; interior point, genetic algorithm and direct search method. The efficiency and effectiveness of the OPF algorithms for the tertiary control is analyzed and verified by means of their application to different variants of two case studies. Some of these variants consider realistic climatological data of solar radiation and wind speed of the city of Almeria, as well as the electric demand of the Laboratory 6 of CIESOL.

RESUMEN

En este trabajo se aborda el problema de Flujo Óptimo de Potencia (FOP.) para el control terciario de micro-redes operando en modo no autónomo. El objetivo es encontrar el despacho óptimo de energía para maximizar los beneficios económicos, tal energía puede provenir de fuentes renovables, dispositivo de almacenaje o de la red de suministro principal. Para este objetivo, se plantea un modelo de optimización unificado que representa la micro-red operando en modo no autónomo. Este modelo se integra a partir de los modelos correspondientes a una red de distribución (monofásica), paneles fotovoltaicos, generador eólico, baterías para el almacenaje de energía y un parque vehicular que funciona como sistema de almacenamiento. Para los fines del presente trabajo se consideran conocidas predicciones de la demanda eléctrica, la irradiación solar y la velocidad del viento para un periodo de tiempo T . El modelo de optimización es resuelto utilizando tres diferentes algoritmos proporcionados por el toolbox de optimización de MatLab®; método de punto interior, algoritmo genético y un método de búsqueda directa. La eficiencia y eficacia de los algoritmos de FPO para control terciario se analiza y verifica por medio de su aplicación a diferentes variantes de dos casos de estudio. Algunas de estas variantes consideran datos climatológicos reales de irradiación solar y velocidad de viento de la ciudad de Almería, así como la demanda eléctrica de laboratorio 6 de CIESOL.

Contenido

Capítulo 1	1
1 Introducción	1
1.1 Micro-redes eléctricas.....	1
1.2 Objetivos del control jerárquico.....	2
1.2.1 Control primario	3
1.2.2 Control secundario.....	3
1.2.3 Control terciario.....	4
1.3 FOP. para control terciario.....	6
1.4 Justificación	10
1.5 Objetivo general.....	11
1.5.1 Objetivos particulares	11
1.6 Descripción de la tesis	12
Capítulo 2	13
2 Modelo de FOP. para control terciario.....	13
2.1 Modelo genérico de FPO. para micro-redes	13
2.2 Modelo de componentes de la micro-red.....	14
2.2.1 Puntos de acoplamiento común	14
2.2.2 Alimentadores.....	15
2.2.3 Transformadores.....	16
2.2.4 Banco de baterías.....	17
2.2.5 Aerogeneradores.....	19
2.2.6 Módulos fotovoltaicos	19
2.2.7 Cargas eléctricas.....	21
2.2.8 Vehículo eléctrico.....	21
2.3 Modelo explícito de FOP. para micro-Redes.....	23
2.3.1 Función Objetivo	23
2.3.2 Restricciones de igualdad	23
2.3.3 Restricciones de desigualdad a funciones	24
2.3.4 Restricciones de desigualdad a variables.....	24

Capítulo 3	26
3 Algoritmos para la solución del modelo FOP	26
3.1 Herramientas de Optimización	26
3.1.1 Toolbox de optimización de MatLab®	27
3.1.2 Toolbox de algoritmos genéticos y búsqueda directa.....	28
3.1.3 Búsqueda directa (función <i>patternsearch</i>)	28
3.1.4 Algoritmo genético (función <i>ga</i>).....	29
3.2 Implementación computacional	32
3.2.1 Ejecución del método de punto interior (función <i>fmincon</i>).....	32
3.2.2 Ejecución del algoritmo genético (función <i>ga</i>)	34
3.2.3 Ejecución del método de búsqueda directa (función <i>patternsearch</i>)	35
3.2.4 Implementación computacional para el análisis FOP.....	36
 Capítulo 4	 39
4 Resultados	39
4.1 Micro-red de prueba 1 (MRP1)	39
4.2 Micro-red de prueba 2 (MRP2)	40
4.3 Caso de estudio 1	40
4.4 Caso de estudio 2	44
4.5 Análisis de desempeño computacional	47
4.5.1 Método de punto interior (función <i>fmincon</i>)	48
4.5.2 Método búsqueda directa (función <i>Patternsearch</i>)	49
4.5.3 Método de algoritmo genético (función <i>ga</i>).....	50
4.5.4 Comparación de desempeño entre los diferentes métodos.....	53
4.6 Micro-red CIESOL	55
 Capítulo 5	 60
5 Conclusiones y trabajos futuros	60
5.1 Conclusiones.....	60
5.2 Trabajos futuros	61

Apéndice	63
Apéndice A	63
A.1 Datos de micro-red de prueba 1 (MRP1).	63
A.2 Datos de micro-red de prueba 2 (MRP2).	64
A.3 Datos de micro-red de CIESOL	64
Apéndice B	65
B.1 Datos módulos solares de casos de estudio	65
B.2 Datos de sistema fotovoltaico CIESOL.....	66
Apéndice C	67
C.1 Datos de carga de casos de estudio.....	67
C.2 Datos de irradiación solar y velocidad de viento de Salamanca Guanajuato y Almería España	68
 Referencias Bibliográficas	 69

Índice de Figuras

Figura 1.1. Flujo de energía en sistemas de distribución modernos.....	1
Figura 1.2. Niveles de control jerárquico de micro-redes	3
Figura 2.1. Circuito π equivalente de los alimentadores	16
Figura 2.2. Modelo T equivalente de los transformadores.....	17
Figura 2.3. Modelo de banco de batería	18
Figura 2.4. Modelo esquemático de un módulo fotovoltaico.....	21
Figura 2.5. Diagrama de un vehículo eléctrico.....	22
Figura 3.1. Algoritmo computacional FPO. para micro-redes	38
Figura 4.1. Micro-red de estudio MRP1.....	40
Figura 4.2. Micro-red de estudio MRP2.....	40
Figura 4.3. Curvas pronosticadas; a) demanda de potencia activa, b) irradiación solar y c) velocidad de viento.....	41
Figura 4.4. Curvas de generación de la micro-red.....	42
Figura 4.5. Estado de carga de la batería (SOC).	43
Figura 4.6. Comparación de Costo de la energía importada desde la red principal	43
Figura 4.7. Curva de demanda pronosticada para caso de estudio 2	44
Figura 4.8. Curvas de generación de la micro-red.....	46
Figura 4.9. Estado de carga en la batería (SOC%) y Estado de vehículos (SOC%)	46
Figura 4.10. Costo de la energía importada desde la red principal con DGA y sin DGA....	47
Figura 4.11. Análisis FOP. con el método de PI; a) valor de fitness y b) tiempo de ejecución	48
Figura 4.12. Efecto del método de orden de sondeo en malla (Pollingorder); a) valor de fitness y b) tiempo de ejecución	49
Figura 4.13. Efecto del algoritmo de creación de malla (PollMethod); a) valor de fitness y b). tiempo de ejecución.....	50
Figura 4.14. Efecto de la opción hibridación por método de punto interior; a) valor de fitness y b) el tiempo de ejecución	50
Figura 4.15. Efecto del tamaño de población; a) valor de fitness y b) tiempo de ejecución	51
Figura 4.16. Efecto método de selección de padres (SelectionFCN); a) valor de fitness y b) tiempo de ejecución	52
Figura 4.17. Efecto de método de cruce de padres (CrossoverFCN); a) valor de fitness y b) tiempo de ejecución.....	52

Figura 4.18. Efecto de método de escalamiento de fitness (FitnessscalingFCN); a) valor de fitness y b) tiempo de ejecución.	52
Figura 4.19. Efecto de método de hibridación (HybridFCN); a) valor de fitness y b) tiempo de ejecución.	53
Figura 4.20. Comparación de los diferentes métodos de optimización en el valor de fitness	54
Figura 4.21. Comparación de los diferentes métodos de optimización en el tiempo de ejecución.....	54
Figura 4.22. Micro-red de estudio CIESOL	55
Figura 4.23. Costos optimizados por Método de PI, AG+PI, BU+PI; a) Día de invierno despejado, b) Día de invierno nublado, c) Día de verano despejado y d) Día de verano nublado	56
Figura 4.24. Tiempos de ejecución para métodos de optimización con diferentes curvas de irradiación solar	57
Figura 4.25. Comportamiento de batería; a) potencia de carga y descarga batería y b) SOC de carga y descarga de batería	57
Figura 4.26. Potencia de red y aerogenerador; a) potencia de la red y b) potencia de aerogenerador	58
Figura 4.27. Comportamiento del sistema solar; a) potencia de sistema fotovoltaico CIESOL y b) Perfiles de irradiación solar de Almería.....	58
Figura 4.28. Comportamiento de la red en diferentes climáticas; a) costos de la red y b) Perfiles de demanda y sumas de potencias.....	59

Índice de Tablas

Tabla 3.1. Diferencias generales entre algoritmos clásicos y genéticos.....	30
Tabla 3.2. Descripción de los argumentos de entrada IA para función fmincon.	33
Tabla 3.3. Descripción de los argumentos de salida OA para función fmincon.	33
Tabla 3.4. Descripción de los argumentos de entrada IA para función ga.	34
Tabla 3.5. Descripción de los argumentos de salida OA para función ga.	35
Tabla 3.6. Descripción de los argumentos de entrada IA para función patternsearch.	35
Tabla 3.7. Descripción de los argumentos de salida OA para función patternsearch.	36
Tabla 4.1. Estado inicial de carga de vehículos.....	44

Capítulo 1

1 Introducción

1.1 Micro-redes eléctricas

Los avances en las tecnologías de generación han hecho que el costo por unidad de potencia generada sea muy bajo. Este hecho sumado al elevado nivel de eficiencia conseguido en centrales de menor tamaño, la disponibilidad de tecnología para la generación a partir de recursos renovables y para su integración, así como la liberación del mercado eléctrico, han promovido la transición de los sistemas de distribución tradicionales a sistemas inteligentes que permiten aprovechar la energía proveniente de fuentes de generación eléctrica distribuidas (GD). Las fuentes de generación distribuidas aportan energía directamente a la red de distribución o abastecen directamente a un conjunto de consumidores [1]. Esto provoca que el flujo energético en las redes de distribución modernas sea bidireccional, como se ilustra en la Fig. 1.1. Además, en esta nueva tendencia la estructura de los sistemas de distribución se visualiza como un conjunto de subsistemas, los cuales cuentan con generación distribuida, almacenamiento y esquemas de autogestión de la energía. Estos subsistemas han sido denominados como micro-redes.

En general, una micro-red puede definirse como un conjunto de cargas y fuentes de generación distribuida a nivel distribución que son operadas de manera coordinada, controladas de manera descentralizada y percibidas como una entidad única por la red principal (sistema eléctrico). En adición a su contribución en la preservación del medio ambiente y sustentabilidad energética, las micro-redes reducen las pérdidas en líneas de transmisión de alta tensión, mitigan la expansión de la red principal y pueden emplearse para proveer energía eléctrica a zonas rurales, entre otros beneficios [2].

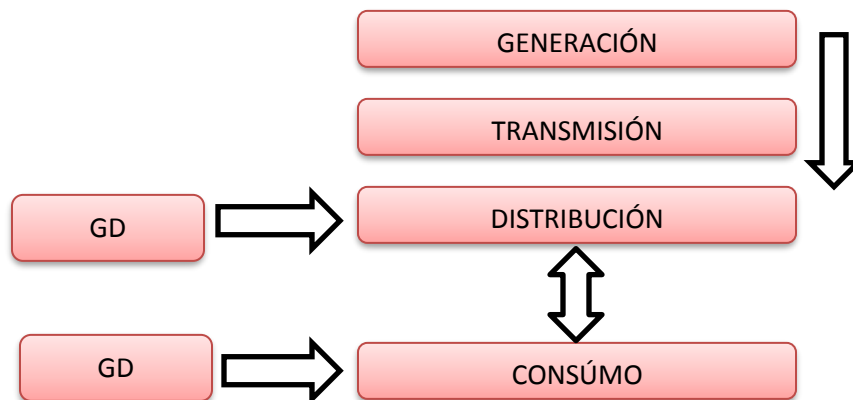


Figura 1.1. Flujo de energía en sistemas de distribución modernos

Una micro-red puede ser vista como una célula controlada del sistema de potencia diseñada para satisfacer sus necesidades especiales, tales como, mejorar la seguridad local, reducir las pérdidas de conexión, soportar tensiones locales, corregir la caída de tensión o proporcionar fuentes de alimentación ininterrumpida, etc. Además, la micro-red podría tener la capacidad de responder en cuestión de segundos para cumplir con necesidades del sistema de transmisión como compensación [3,4, 5].

Los modos de operación de una micro-red son dos; no autónomo (conectada a la red principal) y autónomo (no conectada a la red principal) [6]. En modo no autónomo, típicamente se conectan a la red principal a niveles de baja o media tensión a través de uno o varios puntos de acoplamiento común (PAC). Los requisitos operacionales para cada *uno* de estos modos de operación son diferentes y las especificaciones de control y estabilidad también divergen [7]. Sin embargo, en cualquiera de estos modos de operación, el control de la micro-red se realiza por medio de un control jerárquico de tres niveles; control primario, control secundario y control terciario [8]. Este trabajo se enmarca en el control terciario de micro-redes operando en modo no autónomo. En cuanto al número de fases, las micro-redes pueden tener una configuración monofásica, bifásica o trifásica; aquí se consideran micro-redes con una configuración monofásica.

1.2 Objetivos del control jerárquico

Los principales objetivos del control de una micro-red son los siguientes:

- La regulación de voltaje y frecuencia en cualquier modo de operación.
- Mantener la estabilidad del sistema ante disturbios
- El reparto adecuado de la carga y el balance de potencia del sistema.
- Sincronización de la micro-red a la red principal.
- Control de flujo de potencia entre la micro-red y la red principal.
- La optimización de los costos de operación de micro-redes.

Estos requerimientos son de diferentes importancias y diferentes escalas de tiempo, lo que requiere una estructura de control jerárquico [8]. La estrategia de control jerárquico consta de tres niveles; controles primarios, secundarios y terciarios, como se muestra en la Fig. 1.2. Los objetivos de cada uno de estos niveles de control jerárquico se describen enseguida.

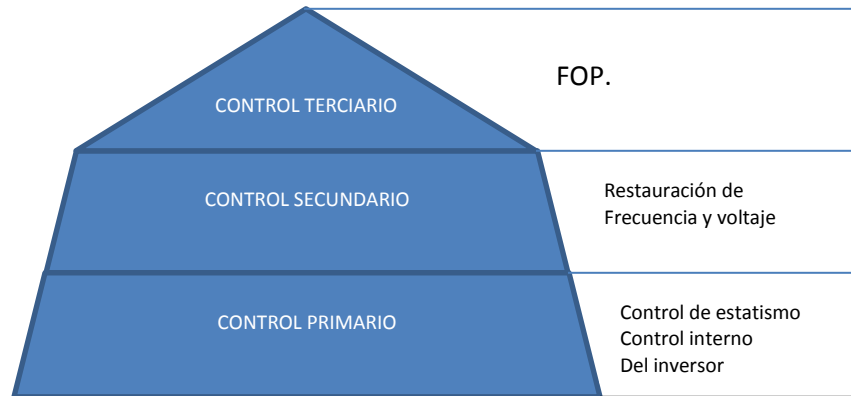


Figura 1.2. Niveles de control jerárquico de micro-redes

1.2.1 Control primario

El control primario se encarga de controlar la regulación tanto de la potencia activa y reactiva generada por las unidades GD. Este nivel de control gestiona la potencia activa de la micro-red a nivel de fuentes de energía con el uso de sistemas de electrónica de potencia. El control primario debe ser un control con una elevada velocidad de respuesta. Este control se encarga de realizar las siguientes tareas dentro de la micro-red. [9].

- Mantener estable la tensión, la frecuencia de la micro-red después del proceso de conexión en el interior de todas las unidades GD. Es esencial para proporcionar potencia activa y reactiva independiente.
- Ofrecer total funcionalidad tipo *Plug and Play* para las unidades GD, así como permitir la distribución de potencia entre estos equipos, preferentemente sin utilizar medios de intercomunicación.
- Tratar de eliminar las corrientes circulantes que puedan generar daño a los componentes electrónicos de potencia y a los bancos de capacitores en los enlaces de CD.

El control primario proporciona los puntos de referencia para los ciclos de control de voltaje y corriente, este ciclo de control interno se implementa generalmente para mantener la calidad de la energía o voltaje dentro de la micro-red.

1.2.2 Control secundario

El control secundario se utiliza para restablecer el valor de la frecuencia y el voltaje a su valor nominal que disminuyen por la interacción entre los GD de la micro-red y el control primario [8, 10]. Para ello se miden la frecuencia y amplitud del voltaje en cada GD, estos se comparan con sus valores de referencia esta diferencia obtenida pasa a un controlador, y de esta manera se obtiene el incremento necesario en las variables de control para alcanzar el valor de referencia [10]. El control secundario también debe encargarse de realizar las siguientes funciones.

- Proporcionar las señales de referencia de potencia y tensión para cada controlador primario.
- Manejar de forma óptima la potencia contenida en los dispositivos de almacenamiento de energía dentro de la micro-red.
- Asegurar que la potencia demandada por la carga local sea suministrada por las unidades DG y los dispositivos de almacenamiento.
- Minimizar las emisiones contaminantes y reducir los niveles de pérdidas dentro de la micro-red.
- Maximizar la eficiencia de cada unidad DG en conjunto con el controlador primario.
- Proporcionar un control eficiente ante eventos de conexión y desconexión entre la micro-red y la red principal.

El control secundario, se encarga de dar las referencias al control primario.

1.2.3 Control terciario

El control terciario es el último nivel del control jerárquico y se enfoca en optimizar globalmente el manejo de la energía de la micro-red [8, 10]. Comúnmente este manejo óptimo de la energía se realiza con el fin de maximizar objetivos de tipo económico, ambiental o técnico. Para este fin, el control terciario se puede visualizar como un sistema de manejo de energía (EMS; por sus siglas en inglés) centralizado, el cual administra en forma óptima la energía consumida por las cargas (cuando se cuenta con la función de respuesta a la demanda), la energía almacenada en los elementos de almacenamiento conectados en la micro-red, la energía intercambiada con la red principal, así como la proveniente de las fuentes de generación renovables y fósiles. Específicamente, en un contexto de micro-redes no autónomas, el manejo de la energía ejecutado por el control terciario implica la manipulación óptima del flujo de potencia, e intercambio energético, bidireccional a través del PAC para maximizar alguno de los objetivos antes mencionados.

El control terciario coordina el uso de la energía en la micro-red a través de ejecutar el despacho óptimo de energía (o potencia) determinado a partir de la solución de un modelo de optimización apropiado. El proceso de determinación de este despacho óptimo es conocido como análisis de Flujo Óptimo de Potencia (FOP.) y por lo tanto constituye el núcleo central del control terciario [6, 11, 12]. En este sentido, el control terciario implica representar el balance energético de la micro-red y el objetivo a maximizar por medio de un modelo que pueda ser resuelto a partir de algoritmos de optimización disponibles. De manera general, el balance energético se formula en base a ecuaciones de balance de potencia eléctrica, mientras que la función objetivo se formula tomando en consideración un aspecto dado que se desea optimizar (económico, ambiental o técnico).

Existen dos enfoques para formular el problema de FOP. para el control terciario de micro-redes [10];

- a) Optimización de Flujo de Potencia. Este enfoque consiste primordialmente en optimizar en tiempo real el flujo de potencia reactiva con la finalidad de garantizar la regulación de voltaje al interior de la micro-red. En este sentido, este tipo de control es primordial para micro-redes operando en modo autónomo. En modo no autónomo, la red principal (o el PAC) se pueden considerar como una gran fuente de potencia reactiva para efectuar una adecuada regulación de voltaje tal que el control terciario tiene un objetivo diferente.
- b) Optimización de Energía. A diferencia del control de flujo de potencia reactiva, el control de flujo de potencia activa está más relacionado con el manejo de la energía. En este enfoque, la optimización de flujo de potencia activa se aborda como un problema de despacho de un día en adelante (conocido como *day ahead dispatch*), en el cual se consideran las correspondientes predicciones de demanda y generación de potencia eléctrica. Es importante mencionar que la predicción de la generación es especialmente importante para las fuentes de generación renovables. Por ejemplo, en este enfoque es indispensable contar con curvas pronosticadas de viento e irradiación solar. Consecuentemente, en este esquema de optimización la solución del problema de despacho de un día en adelante permite determinar las curvas de referencia de potencia generada, almacenada e intercambiada con la red principal a lo largo del día en adelante, i.e., el despacho óptimo de energía. En este sentido, dicho despacho de energía asegura la operación óptima de la micro-red de acuerdo al aspecto considerado en el objetivo de optimización.

Desde un punto de vista práctico, el análisis FOP. asociado al control terciario se ejecuta como una función en la unidad de control central de la micro-red (MGCC; por sus siglas en inglés). Con la finalidad de regular el intercambio de energía a través del PAC, el control terciario compara las curvas de referencia de intercambio de potencia activa y reactiva en dicho punto con las correspondientes mediciones. El error resultante se utiliza entonces para determinar referencias para el control secundario, el cual a su vez determina referencias para los controladores primarios. En respuesta a sus nuevas referencias, los controladores primarios modifican la frecuencia y voltaje de los sistemas de almacenamiento de energía, lo que finalmente regula el intercambio energía a través del PAC.

Es importante resaltar que en este trabajo el problema de FOP. para micro-redes se aborda de acuerdo al enfoque b) Optimización de Energía; por simplicidad de redacción lo denominamos como FOP. para micro-redes. La minimización del costo de la energía importada de la red principal es el aspecto considerado para formular el objetivo de optimización, es decir, se considera un aspecto económico. Además, la determinación de las curvas de referencia de potencia generada, almacenada e intercambiada con la red principal a lo largo del día en adelante, i.e., el despacho óptimo de energía, define el alcance del presente proyecto.

1.3 FOP. para control terciario

El potencial de la generación distribuida (DG) en micro-redes es un hecho, tal potencial está en ofrecer un enfoque alternativo a los servicios públicos para satisfacer la demanda local y que crece con el paso de los años. Hay diversos beneficios que se pueden aprovechar, como un margen de potencia positiva, permitir la reducción de las pérdidas, el ahorro de energía, la reducción del pico de demanda, control de tensión, la transmisión y el aumento de capacidad de potencia de distribución y una mayor calidad de la energía en el sistema. Por otro lado, la preocupación internacional sobre el cambio climático está conduciendo a muchos gobiernos a reducir las emisiones de dióxido de carbono y aumentar el porcentaje de participación de la energía renovable en la matriz energética de cada país. Esto sin embargo implica una serie de nuevos retos tecnológicos y operacionales, tales como la implantación del control terciario de la micro-red a través de FOP. [13].

El estudio de FOP. en el trabajo de micro-redes, es la solución de despacho energético de estado estacionario de la micro-red. La principal información que se obtiene de este estudio incluye las magnitudes y los ángulos de fase de voltajes de los nodos, potencia activa en los nodos de los elementos de la micro-red, flujo real de potencias activa en los alimentadores y otras variables que se especifiquen. Esta información es esencial para el monitoreo continuo del estado actual de la micro-red, para analizar la eficacia de los elementos de generación distribuida para futuras expansiones de la micro-red y para satisfacer una demanda creciente de carga.

Las ecuaciones de red para FOP. pueden ser formuladas de forma sistemática en una variedad de formas. Sin embargo, el método de voltajes de nodos, que es la forma más adecuada para muchos análisis FOP., es el más comúnmente usado. La formulación de las ecuaciones de red en la admitancia nodal forma resultados de ecuaciones algebraicas lineales simultáneas complejas en términos de corrientes de nodo. Sin embargo, en un FOP., las potencias son conocidas y no las corrientes. Por lo tanto, las ecuaciones resultantes en términos de potencia, son conocidas como las ecuaciones de flujo de potencia o balance de potencia, estas se convierten en ecuaciones no lineales y deben ser resueltas por técnicas iterativas. Los estudios de flujo de potencia, son necesarios para el funcionamiento, la programación económica y el intercambio de energía de los generadores distribuidos y la red principal.

El concepto de micro-red (microgrid), es introducido por Lasseter, en 2002[14], desde entonces se ha realizados diferentes trabajos para el estudio de la optimización de la energía generada por los elementos de las micro-redes interactuando con la red principal, esta optimización se conoce como control terciario, en la última década una de las técnicas más utilizada es desarrollada a través de FOP., el cual está asociado originalmente a redes eléctricas convencionales [15]. En 1962 J. Carpentier realizó un planteamiento matemático riguroso para el análisis de FOP., quien lo formuló como un problema de programación no

lineal [16], a partir de esta fecha, se han desarrollado numerosos trabajos e investigaciones en ésta área las cuales son la base de FOP. para el control terciario para micro-redes.

La solución del análisis de FOP. para micro-redes se ha realizado de diferentes maneras. En [17] se presentó la integración de FOP. para micro-redes con diferentes fuentes de generación distribuida DG, turbina eólica, modulo fotovoltaico, almacenamiento de energía a través células de combustible, se integraron fuentes de calor urbana que a través de unidades de calor y potencia combinadas convierten su energía térmica a energía eléctrica para ser incluida en el FOP., en este caso el análisis de FOP. para micro-redes se formula como un problema no lineal restringido estático. Se plantea el modelo por medio de las ecuaciones de balance de potencia activa y reactiva en cada nodo, los límites de generación de potencia y los límites de voltaje de las líneas, además se asume que las líneas de transmisión transportan flujos de potencia que son bidireccionales.

En [18] se incorpora un modelo OPF-LIFO para la administración de flujo de energía distribuido, el cual incluye en el sistema de generación distribuida, turbinas eólicas y módulos fotovoltaicos todo conectado a una red principal. La formulación se basa en el análisis general de FOP. con una pequeña variante “last-in, first-off” (LIFO; por sus siglas en inglés), el único cambio del FOP. normal es en la definición y la formulación de los términos de costos de generación individuales, mientras que en formulación FOP. estos términos reflejan verdaderos costos asociados con la producción de electricidad, o de las curvas de oferta que los generadores presentan en la venta de energía en el mercado, en el OPF-LIFO estos términos reflejan el orden de las conexiones de los generadores. Por lo tanto, cada generador se le asigna un costo constante y tiene un índice que refleja el orden de conexión de cada generador.

En [12] se realiza la inclusión en el modelo de la micro-red de dispositivos de almacenamiento, módulos fotovoltaicos y la carga, todo acoplado por un punto de acoplamiento común a la red principal y de manera dinámica. El análisis de FOP. se formula como un problema no lineal restringido dinámico, el modelo toma en cuenta los límites físicos del dispositivo de almacenamiento, los límites de voltaje, frecuencia y generación de la red y del módulo fotovoltaico, el método propuesto calcula el flujo de energía óptimo a nivel global utilizando un método de FOP. con programación de búsqueda recursiva. Al igual que en el anterior trabajo la base del modelo del sistema son las ecuaciones de balance de potencia y las restricciones nodales de la micro-red. Los elementos de la micro-red se modelan para sistemas monofásicos y sistemas trifásicos, el modelo del sistema de almacenamiento es un sistema dinámico modelado mediante ecuaciones de estado, donde la carga y la descarga son los diferentes estados del sistema.

En [19] se presenta el estudio FOP. dinámico para la administración de una micro-red activa desde el enfoque de mercado eléctrico integrando al modelo la generación no firme o intermitente de los generadores distribuidos renovables con sus límites de generación,

demanda flexible, dispositivos de almacenamiento, además introduce el concepto de la administración intertemporal de una red activa. El modelo se plantea desde el análisis general de FOP. con las ecuaciones de balance de potencia, restricciones nodales y sus límites físicos, es decir también se formula como un problema no lineal restringido dinámico por lo cual para este problema se resuelve por medio de métodos de programación no lineales tales como búsqueda de gradiente. El modelado de la generación no firme se obtiene con la modificación de la función objetivo incluyéndole un término de prioridad y orden de generación. El sistema de almacenamiento es modelado como generadores con la capacidad de inyectar potencia positiva o negativa a la red, Se incluye la variable estado de carga y descarga de la batería (SOC; por sus siglas en inglés) para el seguimiento de la energía almacenada del sistema. La potencia es positiva cuando el sistema se descarga y la potencia es negativa para cuando el sistema se carga. La unidad de demanda flexible se modela como un generador con salida negativa donde la magnitud de salida durante cada etapa de tiempo es una variable de control en este caso la energía total entregada a la carga a través del horizonte de tiempo debe ser igual al requerimiento de energía total.

En [13] desarrollan la simulación de un sistema eléctrico considerando generación distribuida renovable utilizando una combinación del método de Monte Carlo (MCS; por sus siglas en inglés) y FOP. basado en mercado eléctricos, se integra una turbina eólica, la red principal y las cargas a la micro-red. MCS este método se utiliza para modelar las incertidumbres de variaciones estocásticas de generación de energía eólica y la demanda de carga, mientras que mediante FOP. basado en el mercado con restricciones intertemporales se utiliza para minimizar los costos de generación, para la solución del FOP. se utiliza el método de punto interior. La metodología probabilística propuesta permite evaluar la cantidad de energía eólica que se puede inyectar en la red eléctrica, así como el impacto de la penetración de la energía eólica en beneficio de los precios marginales de la energía de distribución. Este trabajo se formula como un problema no lineal restringido dinámico, El método de Monte Carlo genera aleatoriamente la velocidad del viento y las demandas de carga de las distribuciones de probabilidad sobre un dominio de posibles velocidades del viento y las demandas de carga, definido de acuerdo con datos históricos de la red de distribución, incluyendo tanto los valores de velocidad de viento en los lugares propuestos y la demanda de carga en todos los nodos. El FOP. basados en el mercado mediante cálculos determinísticos se llevan a cabo para maximizar la energía eólica. El planteamiento de FOP. que se utiliza es el análisis general de FOP, únicamente variando la función objetivo que además de los costos de generación se restan los beneficios económicos del consumidor otorgados por la utilización de energía eólica.

En [20] se presenta un modelo estocástico de optimización teniendo en cuenta la volatilidad de la energía eólica y la energía fotovoltaica en la micro-red. El modelo optimiza el funcionamiento económico de una micro-red, así como minimiza la desviación del flujo en el PAC a partir de los valores programados. En primer lugar, se introducen el método de

muestreo latino de hipercubo (LHS; por sus siglas en inglés) y la técnica simultánea Reducción hacia atrás (SBR; por sus siglas en inglés) para describir la naturaleza estocástica de la energía eólica y fotovoltaica. A continuación, la característica aleatoria se introduce en la función objetivo del modelo estocástico. La optimización del modelo se plantea como un problema de FOP. restringido estático el cual se resuelve por medio del método de algoritmos genéticos.

En [21] se analiza un método de recocido simulado (SA; por sus siglas en inglés) para abordar la gestión de los recursos energéticos desde el punto de vista de una planta virtual de potencia (VPP; por sus siglas en inglés) que opera en una red inteligente. La generación distribuida, la demanda, y los vehículos eléctricos se gestionan de forma inteligente para multi-periodos de acuerdo a los perfiles y necesidades de los usuarios, para el vehículo se utiliza el concepto V2G traducido significa “del vehículo a la red” esto describe un sistema en el cual la energía del sistema de almacenamiento de un vehículo eléctrico puede ser exportada a la red eléctrica, cuando este es conectado a la red en los momentos que no se use para el transporte. Alternativamente, cuando el sistema de almacenamiento del vehículo necesite ser recargado, el flujo se invertirá y la potencia fluirá de la red al vehículo. Aparte de utilizar la red, la VPP también puede importar energía adicional de un conjunto de proveedores externos en este caso de los generadores distribuidos formando una micro-red. En este trabajo se aplican técnicas de inteligencia artificial para el manejo de la energía. El método de enjambre de partículas se aplica para la optimización de los recursos de generación tradicionales y renovables. El problema se plantea como un problema de programación lineal entera mixta (MILP; por sus siglas en inglés), el objetivo es reducir al mínimo los costos de operación de VPP. Todos los costos involucrados están representados por una función de costo lineal. El modelo también incluye la simulación de la red, a través del cálculo de flujo de potencia de CA, gestión de energía del parque vehicular que se controla por el método propuesto de recocido simulado (SA)

En [22] se incorpora un modelo novedoso de vehículos eléctricos (PEV; por sus siglas en inglés) en una formulación de bus de tensión controlada. El modelo PEV comprende un convertidor de fuente de tensión (VSC; por sus siglas en inglés) y es de diferentes tipos de modelos de PEV basado en un bus PQ con el concepto de unidad factor de potencia. Mientras que la potencia activa se regula en el dispositivo de almacenamiento de acuerdo con el estado de carga y descarga de la batería, la magnitud de la tensión en el punto de acoplamiento común se rige por la VSC. Además, un modelo equivalente PEV basados en VSC integral que refleje con precisión el comportamiento de una flota de vehículos distribuido se propone en este trabajo para llevar a cabo el análisis en estado estacionario. El modelo de PEV basados en VSC comprende un sistema de batería, un convertidor de potencia y una inductancia de acoplamiento. El modelo PEV basados en VSC para estudios de flujo de potencia se representa como una fuente de tensión compleja detrás de la impedancia del transformador.

Básicamente este trabajo comprende un parque vehicular conectado a la red principal intercambiando energía de manera óptima.

En [23] se presenta un modelo específico y simple para los vehículos eléctricos adecuados para estudios de flujo de carga. El modelo propuesto considera los sistemas de demanda EV como nodos PQ con características estocásticas. El desarrollo del modelo se basa en la teoría de colas. Las fórmulas presentadas para la demanda de potencia activa y reactiva estocásticas (P, Q) se desarrollan como una función del tiempo de carga (tiempo para ser conectado a la red eléctrica). En este estudio, el estado de carga instantánea de los sistemas de baterías de los vehículos eléctricos se simula por medio de una función exponencial. El modelo de demanda de potencia del sistema EV en cada nodo de carga está desarrollado basado en el modelo de servicio al cliente originado en la teoría de colas.

A pesar de los desarrollos realizados para FOP. en micro-redes en los anteriores trabajos citados ninguno de ellos muestra un modelo unificado de micro-red, con turbina eólica, modulo fotovoltaico, sistema de almacenamiento, carga y parque vehicular acoplado todo a la red principal por medio de PAC y formulado desde un punto de vista de despacho de un día en adelante. Además, por lo general solo se utiliza un método de optimización para la solución del sistema, en este trabajo se utilizan tres métodos diferentes evaluando su eficacia y eficiencia, para este fin el programa se estructura de manera modular lo cual le permite intercambiar los métodos de optimización en la programación sin cambiar la estructura del mismo. En este trabajo las funciones objetivo de los casos de estudio son continuas. Sin embargo, al utilizar tres métodos diferentes tenemos la flexibilidad de poder utilizar funciones no continuas, esto debido a que el método de optimización de algoritmos genéticos al igual que el método de búsqueda directa no necesita el gradiente de la función objetivo para encontrar el mínimo.

1.4 Justificación

En la actualidad el sector eléctrico a nivel mundial está sujeto a cumplir rigurosas políticas ambientales que promueven el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables. Esto con el fin de contribuir a la sustentabilidad ambiental y energética global. Por ejemplo, en respuesta a esta presión, en Dinamarca la energía eólica proporciona el 30% del total de la energía eléctrica abastecida. Se contempla que este porcentaje alcanzará hasta el 50% en el año 2010 [24, 25] En México en el año 2012 se superó una capacidad eólica total de 590MW. Sin embargo, estudios recientes han revelado que el potencial eólico de México podría ser superior a 7 GW [26].

En años recientes se ha puesto especial atención en la integración de fuentes de energía renovable a niveles de distribución (media y baja tensión). Para este fin, el diseño y operación de los sistemas de distribución actualmente se concibe dentro del nuevo contexto de micro-redes. Esta nueva generación de sistemas de distribución se logra a partir de la

integración de tecnologías que brindan la capacidad de abastecer el consumo eléctrico con un grado de inteligencia superior al de los sistemas de distribución tradicionales. En este sentido, los esquemas de control de las micro-redes deben ser lo suficientemente aptos para aprovechar al máximo dicha capacidad. De acuerdo a esta exigencia, el esquema de control de las micro-redes se compone de tres niveles jerárquicos; primario, secundario y terciario. El control terciario es el encargado de optimizar el manejo de la energía de la micro-red. El núcleo central del control terciario de micro-redes se formula como un problema de optimización denominado como análisis de flujos óptimos de potencia. Desde un punto de vista práctico, este análisis se ejecuta como una función del control central de la micro-red para determinar el manejo óptimo de la energía con el fin de abordar aspectos de vital importancia para la operación de micro-redes, tales como; obtención del máximo beneficio económico, aprovechamiento óptimo de las fuentes de energía renovables y de micro-generación, la reducción de pérdidas eléctricas y la atenuación de inconvenientes técnicos. Dicha importancia motiva la implementación de algoritmos de flujos óptimos de potencia para el control terciario de micro-redes desarrollada en este trabajo. De esta manera, el presente proyecto incide directamente en el interés de realizar una operación y control más inteligente de las micro-redes eléctricas.

1.5 Objetivo general

El objetivo del trabajo de tesis consiste en implementar algoritmos para el análisis de flujos óptimos de potencia del control terciario de una Micro-red operando en modo no autónomo. Lo anterior con el propósito de contar con una herramienta capaz de determinar el manejo óptimo de la energía para minimizar el costo del abastecimiento del consumo energético de una micro-red en un intervalo de tiempo (un día), satisfaciendo a la vez restricciones técnicas y operativas de los componentes eléctricos.

1.5.1 Objetivos particulares

1. Establecer las funciones matemáticas que permitan representar el flujo de potencia en terminales de cada uno de los componentes eléctricos de la micro-red.
2. Formular el análisis de flujos óptimos como un problema de optimización de energía para obtener el despacho de energía de un día en adelante. Teniendo en mente lo anterior, es necesario plantear un modelo de optimización para representar de manera unificada el costo de transferencia de potencia a través del punto de acoplamiento común, el balance energético y los límites operativos de los componentes de la micro-red. Consecuentemente este modelo se formula en base a ecuaciones de balance nodal en términos de inyecciones de potencia activa y reactiva.
3. Utilizar programación estructurada en lenguaje de Matlab[®] para implementar computacionalmente el modelo de optimización para flujos óptimos de micro-redes.

Esta estrategia tiene como finalidad permitir que el modelo de optimización pueda ser resuelto de manera simple por medio de diferentes métodos de optimización.

4. Utilizar los métodos de punto interior, algoritmos genéticos y método de búsqueda directa proporcionados por el toolbox de optimización de Matlab[®] para la implementación computacional de los algoritmos de FOP. para micro-redes.
5. Considerar casos de estudio para analizar y verificar la eficiencia y eficacia de los algoritmos desarrollados en este trabajo.

1.6 Descripción de la tesis

El capítulo 1 presenta la parte introductoria de este trabajo, compuesta principalmente por la introducción de conceptos básicos de micro-redes, revisión bibliográfica, justificación y objetivos de la tesis.

El capítulo 2, presenta los modelos matemáticos de los componentes eléctricos de las micro-redes, los cuales son considerados para presentar la formulación del problema de optimización asociado al análisis de flujos de potencia óptimos para el control terciario de micro-redes.

El capítulo 3 se enfoca en describir las herramientas de optimización que se utilizan para resolver el modelo de optimización. Además, se describe la implementación computacional de los algoritmos para el análisis de flujos óptimos de potencia para el control terciario de micro-redes.

El capítulo 4, presenta los resultados numéricos obtenidos en diferentes casos de estudio. Se realiza la comparación de resultados, se analiza y verifica la eficiencia y eficacia de los algoritmos desarrollados en este trabajo.

Finalmente, el capítulo 5 proporciona las conclusiones de la realización de este trabajo de investigación y sugiere algunas de las ideas que podrían ser abordadas en trabajos futuros.

Capítulo 2

2 Modelo de FOP. para control terciario

Este capítulo presenta en primer lugar el modelo general de optimización a partir del cual se formula el modelo explícito de FOP. para el control terciario de micro-redes. Posteriormente, se establecen las funciones matemáticas que modelan la potencia activa y reactiva en las terminales de cada uno de los componentes eléctricos de la micro-red, así como la formulación matemática de las desigualdades que representan sus límites técnicos y/o operativos. Los componentes eléctricos considerados en este trabajo son los puntos de acoplamiento común, sistemas solares fotovoltaicos, aerogeneradores, sistemas de almacenamientos, cargas, alimentadores y transformadores. Finalmente, estas funciones matemáticas y desigualdades son utilizadas para formular el modelo explícito de FOP. para el control terciario de micro-redes.

2.1 Modelo genérico de FPO. para micro-redes

Considerando conocido el pronóstico de las curvas de demanda eléctrica, irradiación solar y velocidad de viento para un intervalo de tiempo T , el modelo general de FOP. para micro-redes puede ser descrito por medio del modelo de optimización (2.1)-(2.4). Debe notarse que en este modelo, se considera que el periodo de tiempo T está dando en forma discreta y compuesto por un conjunto de etapas de tiempo t_z ($\forall z=0, \dots, end$), tal que $T=[t_0, t_1, \dots, t_{end}]$.

$$\text{Minimize } F_T = \sum_{t_z=1}^{t_{end}} f^{t_z}(\mathbf{y}^{t_z}) \quad (2.1)$$

$$\text{Subject to } \mathbf{h}^{t_z}(\mathbf{y}^{t_z}) = \mathbf{0} ; \forall t_z \in T \quad (2.2)$$

$$\mathbf{g}^{t_z}(\mathbf{y}^{t_z}) \leq \mathbf{0} ; \forall t_z \in T \quad (2.3)$$

$$\underline{\mathbf{y}} \leq \mathbf{y}^{t_z} \leq \bar{\mathbf{y}} ; \forall t_z \in T \quad (2.4)$$

donde tomando en cuenta que t_z representa la z -th etapa de tiempo, la descripción de los términos del modelo (2.1)-(2.4) es como sigue. F_T es la función objetivo o fitness a optimizar a lo largo del intervalo T . $\mathbf{h}(\mathbf{y})$ es el conjunto de restricciones de igualdad que representa las ecuaciones de balance de potencia activa y reactiva en todos los nodos de la micro-red (balance energético), así como otras condiciones de operación que se deben satisfacer incondicionalmente en la operación de la micro-red. $\mathbf{g}(\mathbf{y})$ es un conjunto de restricciones de desigualdad a funciones y representan los límites físicos y operativos de los elementos que componen la micro-red. \mathbf{y} es el conjunto de variables de decisión (a determinar resolviendo el modelo de optimización); compuesto por los subconjuntos \mathbf{y}_{RD} , \mathbf{y}_{MF} y \mathbf{y}_B , tal que $\mathbf{y}=[\mathbf{y}_{RD}, \mathbf{y}_{MF}, \mathbf{y}_B]$. Donde \mathbf{y}_B , \mathbf{y}_{RD} y \mathbf{y}_{MF} representan las variables de decisión relacionadas con las

baterías de los sistemas de almacenamiento, red de distribución y módulos fotovoltaicos, respectivamente. El límite superior $\bar{\mathbf{y}}$ e inferior $\underline{\mathbf{y}}$ de estas variables se formulan por medio de las restricciones de desigualdad a variable (2.4).

2.2 Modelo de componentes de la micro-red

El modelo genérico (2.1)-(2.4) proporciona el marco de referencia para formular el modelo para el análisis de FPO para control terciario de micro-redes. Dado que este último será formulado en inyecciones de potencia activa y reactiva en función de las variables de decisión \mathbf{y} , es necesario primeramente representar matemáticamente cada uno de los componentes de la micro-red en términos de dichas variables, como se muestra a continuación. Además, es importante mencionar que el modelo de FOP. se formula en el dominio fasorial, tal que para el manejo de la energía no se considera la distorsión armónica de las señales eléctricas. En este sentido, se aclara que tanto voltajes como corrientes en CA serán considerados como cantidades fasoriales.

2.2.1 Puntos de acoplamiento común

En este trabajo se considera que la micro-red opera en modo no autónomo. Tal que se conecta a la red principal en N_{pac} ($N_{pac} \geq 1$) puntos de acoplamiento común (*PAC*). Se asume que cada *PAC* es eléctricamente robusto y es una interfaz para el intercambio ilimitado de potencia activa y reactiva entre la micro-red y la red principal. Así mismo, es importante mencionar que, debido a su robustez, los *PAC* determinan la frecuencia de operación de la micro-red, tal que en modo no autónomo el control de frecuencia no es un factor de importancia. En este contexto, los *PAC* se modelan como fuentes de generación que operan a niveles de voltajes de magnitud $V_j^{t_z}$ y ángulos $\theta_j^{t_z}$ dentro de los límites dados por (2.5),

$$\underline{V}_j \leq V_j^{t_z} \leq \bar{V}_j; \underline{\theta}_j \leq \theta_j^{t_z} \leq \bar{\theta}_j \} \forall t_z \in T \ ; \ \forall j \in PAC \quad (2.5)$$

Por otro lado, en este trabajo se pretende determinar el manejo óptimo de la energía para minimizar el costo del abastecimiento del consumo energético de la micro-red en un intervalo de tiempo. De acuerdo a este objetivo, el costo de la potencia activa total intercambiada a través de los *PAC* en el instante t_z se modela por medio de (2.6). Donde a_j , b_j and c_j son coeficientes constantes de costo para el j -th *PAC*. En (2.6) la variable $P_{RPj}^{t_z}$ denota la potencia intercambiada a través del j -th *PAC*. Las variables de decisión asociadas a los *PAC* son $[V_j^{t_z}, \theta_j^{t_z}, P_{RPj}^{t_z}] \in \mathbf{y}_{RD}$ ($\forall t_z \in T, \forall j \in PAC$).

$$f^{t_z}(\mathbf{y}^{t_z}) = \sum_{j=1}^{N_{pac}} a_j + b_j (P_{RPj}^{t_z}) + c_j (P_{RPj}^{t_z})^2 \ ; \ \forall t_z \in T \quad (2.6)$$

Para fines de este trabajo se ha considerado que los coeficientes en (2.6) son constantes a lo largo del día, es decir, se desprecia la volatilidad de los precios de la energía en los PAC. En un contexto de mercado eléctrico los valores de dichos coeficientes cambiarían función del tiempo, sin embargo, su pronóstico debería ser proporcionado por el operador del mercado para ser incorporados en (2.6) y de esta forma considerar directamente la volatilidad de los precios de la energía.

2.2.2 Alimentadores

Los alimentadores proporcionan un camino para el flujo energético en la micro-red. Cada alimentador se modela como una línea de transmisión monofásica, como se ilustra en la Fig. 2.1. Donde I_i y E_i son los fasores de corriente inyectada y voltaje en el nodo i ($i=k,m$) de la micro-red. R , L y B_c representan los parámetros de resistencia serie, inductancia serie y susceptancia en derivación, respectivamente, del alimentador. De acuerdo al diagrama esquemático de la Fig. 2.1, la relación corriente-voltaje en las terminales del alimentador está dada por (2.7) [27]. Donde los elementos de la matriz de admitancias se evalúan de (2.8) y (2.9).

$$\begin{bmatrix} I_k^{t_z} \\ I_m^{t_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{kk} & Y_{km} \\ Y_{mk} & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_k^{t_z} \\ E_m^{t_z} \end{bmatrix} ; \forall t_z \in T \quad (2.7)$$

$$Y_{kk} = Y_{mm} = (y_{km} + j0.5B_c) = G_{kk} + jB_{kk} ; Y_{km} = Y_{mk} = -y_{km} = G_{km} + jB_{km} \quad (2.8)$$

$$G_{km} = R/R^2 + (\omega L)^2 ; B_{km} = -\omega L/R^2 + (\omega L)^2 \quad (2.9)$$

La potencia inyectada en las terminales conectadas al nodo i a través del alimentador conectado entre los nodos i y j , donde $i=k,m, j=k,m, i \neq j$, es descrita matemáticamente como sigue,

$$S_i = P_i + jQ_i = E_i I_i^* = E_i (Y_{ii} E_i + Y_{ij} E_j)^* \quad (2.10)$$

A partir de la Fig. 2.1 y (2.7)-(2.10) se pueden obtener las expresiones que modelan la inyección de potencia activa (2.11) y reactiva (2.12) en el nodo i ($i=k,m$) en cada instante $t_z \in T$ [27] donde $j=k,m$, siendo $j \neq i$. Las variables de decisión $V_n^{t_z}$ y $\theta_n^{t_z}$ ($n=i,j$) representan la magnitud y ángulo del fasor de voltaje E_i del nodo i .

$$P_{inyi}^{t_z} = (V_i^{t_z})^2 G_{ii} + V_i^{t_z} V_j^{t_z} \left[G_{ij} \cos(\theta_i^{t_z} - \theta_j^{t_z}) + B_{ij} \sin(\theta_i^{t_z} - \theta_j^{t_z}) \right] \quad (2.11)$$

$$Q_{nyi}^{inj t_z} = -(V_i^{t_z})^2 B_{ii} + V_i^{t_z} V_j^{t_z} \left[G_{ij} \sin(\theta_i^{t_z} - \theta_j^{t_z}) - B_{ij} \cos(\theta_i^{t_z} - \theta_j^{t_z}) \right] \quad (2.12)$$

Las variables de decisión asociadas a los alimentadores corresponden a los voltajes nodales en sus terminales $[V_k^{t_z}, V_m^{t_z}, \theta_k^{t_z}, \theta_m^{t_z}] \in \mathbf{y}_{RD} (\forall t_z \in T)$.

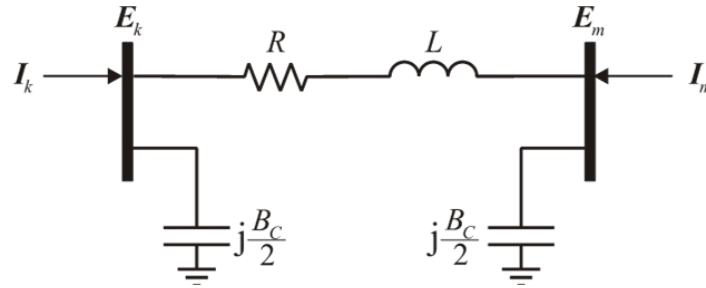


Figura 2.1. Circuito π equivalente de los alimentadores

2.2.3 Transformadores

El transformador es el dispositivo de acoplamiento (o interfaz) que permite la conexión de la micro-red con la red de alimentación principal. Así mismo, al interior de la micro-red puede contarse con transformadores de distribución para fines de regulación de voltaje. A fin de ser capaz de simular micro-redes con transformadores teniendo cambios en la posición nominal del tap ya sea en el lado primario o el secundario, los dos devanados del transformador son modelados con taps complejos sobre ambos devanados primario y secundario. El circuito equivalente esquemático es mostrado en la Fig. 2.2.

El devanado primario es considerado como un transformador ideal con relación de tap complejo $T_v:1$ y $T_i:1$ en serie con la impedancia Z_p (ver la Fig. 2.2). Donde $T_v=T_i^*=T_v\angle\phi_{tv}$, el símbolo * denota complejo conjugado. El devanado secundario también se representa como un transformador ideal con relación de tap complejo $U_v:1$ y $U_i:1$ en serie con la impedancia Z_s . Donde $U_v=U_i^*=U_v\angle\phi_{uv}$. La relación del voltaje V_p y la corriente I_p del primario al voltaje V_s y la corriente I_s del secundario está dada por (2.13) [27].

$$\begin{bmatrix} I_p^{t_z} \\ I_s^{t_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{PP} & G_{PS} \\ G_{SP} & G_{SS} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} B_{PP} & B_{PS} \\ B_{SP} & B_{SS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p^{t_z} \\ V_s^{t_z} \end{bmatrix}; \quad \forall t_z \in T; \quad (2.13)$$

Donde

$$G_{PP} = \frac{F1(U_v^2 + R1) + F2R2}{F1^2 + F2^2},$$

$$B_{PP} = \frac{F1R2 - F2(U_v^2 + R1)}{F1^2 + F2^2},$$

$$G_{SS} = \frac{F1(T_v^2 + R3) + F2R4}{F1^2 + F2^2},$$

$$B_{SS} = \frac{F1R4 - F2(T_v^2 + R3)}{F1^2 + F2^2},$$

$$B_{PS} = T_v U_v (F2 \cos(\phi_1) + F1 \sin(\phi_1)) / (F1^2 + F2^2),$$

$$G_{SP} = -T_v U_v (F1 \cos(\phi_2) + F2 \sin(\phi_2)) / (F1^2 + F2^2),$$

$$B_{SP} = T_v U_v (F2 \cos(\phi_2) + F1 \sin(\phi_2)) / (F1^2 + F2^2),$$

$$\begin{aligned}
 F1 &= T_v^2 R_S + U_v^2 R_P + R_{eq1}, \\
 F2 &= T_v^2 X_S + U_v^2 X_P + X_{eq1}, \\
 R_{eq1} &= (\xi)G_0 - (\zeta)B_0, \\
 X_{eq1} &= (\xi)B_0 + (\zeta)G_0, \\
 \xi &= R_P R_S - X_P X_S, \\
 \zeta &= R_P X_S - R_S X_P, \\
 R1 &= R_S G_0 - X_S B_0, \\
 R2 &= R_S B_0 - X_S G_0, \\
 R3 &= R_P G_0 - X_P B_0, \\
 R4 &= R_P B_0 - X_P G_0, \\
 \phi_1 &= \phi_{iv} - \phi_{uv}, \\
 \phi_2 &= \phi_{uv} - \phi_{iv}.
 \end{aligned}$$

De manera similar a los alimentadores, las inyecciones de potencia activa y reactiva en los nodos de conexión i y j , donde $i=p,s, j=p,s, i \neq j$, se representan por (2.11) y (2.12), pero considerando las matrices de conductancias y susceptancias de (2.13). Se enfatiza que las variables de decisión asociadas a los transformadores corresponden a los voltajes nodales en sus terminales $[V_p^z, V_s^z, \theta_p^z, \theta_s^z] \in y_{RD} (\forall t_z \in T)$.

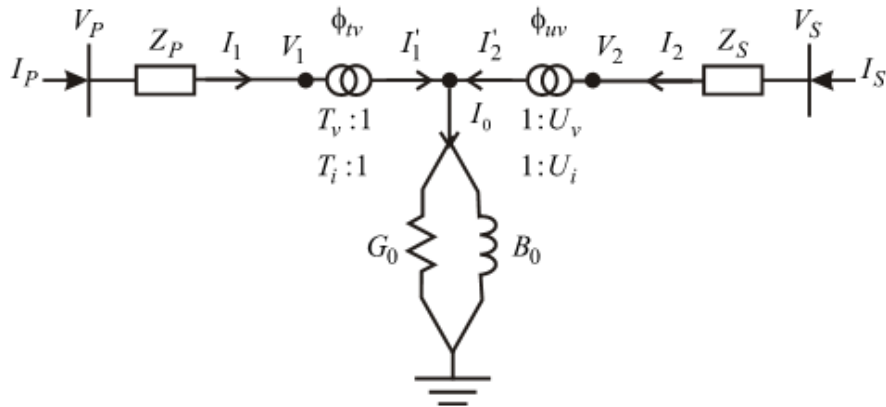


Figura 2.2. Modelo T equivalente de los transformadores

2.2.4 Banco de baterías

Los bancos de baterías permiten almacenar energía proveniente de la red principal o de las fuentes de generación distribuidas conectadas a la micro-red. A diferencia de las fuentes de generación renovables, estos elementos pueden ser considerados como fuentes de energía despachable debido a que la energía almacenada puede ser utilizada de manera controlada.

Las baterías pueden operar en modo de carga o descarga para aportar o consumir una cantidad neta de potencia activa, respectivamente, en su nodo de conexión. Esto permite manejar el nivel de energía almacenada en las mismas. Dicho nivel de energía almacenada se refleja a través del estado de carga (SOC; por sus siglas en inglés). La j -th batería se puede representar entonces por medio de dos fuentes de generación de potencia activa, como se ilustra en la Fig. 2.3 [19]. Una de ellas representa la potencia de carga $P_{Bc j}^{t_z} \leq 0$ y la otra la potencia de descarga $P_{Bd j}^{t_z} \geq 0$, la suma de ambas potencias representa la potencia neta $P_{Bn j}^{t_z}$ aportada o consumida por la batería en su nodo de conexión,

$$P_{Bn j}^{t_z} = P_{Bc j}^{t_z} + P_{Bd j}^{t_z} ; 0 \leq P_{Bd j}^{t_z} ; P_{Bc j}^{t_z} \leq 0; \forall t_z \in T \quad (2.14)$$

En adición, el fasor de voltaje en el nodo de conexión se representa por su magnitud $V_j^{t_z}$ y $\theta_j^{t_z}$ ángulo. Así, las variables de decisión de la j -th batería son $[P_{Bd j}^{t_z}, P_{Bc j}^{t_z}] \in \mathbf{y}_B (\forall t_z \in T)$, mientras que $[V_j^{t_z}, \theta_j^{t_z}] \in \mathbf{y}_{RD} (\forall t_z \in T)$.

Además, el estado de carga de la j -th batería en el instante t_z ($SOC_{B j}^{t_z}$) se puede aproximar por medio de (2.15).

$$SOC_{B j}^{t_z} = SOC_{B j}^{t_0} - \frac{\varepsilon_{c j} \Delta t}{E_{Bnom j}} \sum_{t=1}^{t_z} P_{Bc j}^t - \frac{\Delta t}{E_{Bnom j} \varepsilon_{d j}} \sum_{t=1}^{t_z} P_{Bd j}^t \quad (2.15)$$

Donde $\varepsilon_{c j}$ representa el coeficiente de eficiencia de carga, $\varepsilon_{d j}$ representa el coeficiente de eficiencia de descarga, $E_{Bnom j}$ representa la capacidad de almacenaje, Δt es el cambio en el tiempo y $SOC_{B j}^{t_0}$ el porcentaje de carga inicial de la batería. Se hace notar que se asume que la energía aportada por las baterías no tiene costo, puesto que esta es absorbida y aportada en el mismo nodo de conexión. Sin embargo, en ausencia de un mecanismo de respuesta a la demanda y de otras fuentes despachables, las baterías son un elemento primordial para el manejo óptimo de la energía de la micro-red. Esto debido a que pueden ser cargadas (o descargadas) en periodos que maximizan el beneficio económico global, lo cual debe ser determinado por medio del algoritmo de optimización.

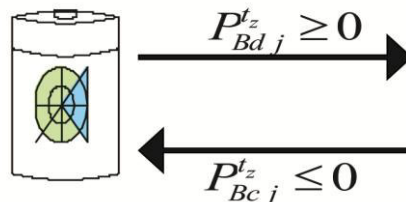


Figura 2.3. Modelo de banco de batería

2.2.5 Aerogeneradores

Para fines de análisis de estado estacionario, el aerogenerador puede considerarse como una fuente no controlada de potencia activa $P_{Aj}^{t_z}$, dependiente únicamente de la velocidad del viento $S_w^{t_z}$ y de su densidad δ_w , así como del área A_w cubierta por las palas de la turbina de viento [28],

$$P_{Aj}^{t_z} = \delta_w A_w (S_w^{t_z})^3 / 2 ; \forall t_z \in T \quad (2.16)$$

Debido a que se considera que la potencia entregada por el aerogenerador no es controlable, este elemento no introduce variables de decisión. Sin embargo, (2.16) se requiere para evaluar la aportación de potencia del j -th aerogenerador para una curva de velocidad de viento $S_w^{t_z} \forall t_z \in T$, densidad δ_w y área A_w dados. Claro, la magnitud $V_j^{t_z}$ y ángulo $\theta_j^{t_z}$ del fasor de voltaje del nodo de conexión sí son considerados como variables de decisión, tal que $[V_j^{t_z}, \theta_j^{t_z}] \in \mathbf{y}_{RD} (\forall t_z \in T)$. Por último, despreciando el costo de inversión y operación, se puede asumir que el costo de la energía proporcionada por el aerogenerador es nulo, puesto que en este tipo de fuente de generación el combustible primario (energía del viento) no tiene costo [25] Además, se considera disponible un buen pronóstico de las curvas de velocidad de viento. Es importante mencionar que modelos detallados de estado estacionario existentes en la literatura también podrían ser directamente incorporados en el modelo para el análisis de FPO presentado en este trabajo.

2.2.6 Módulos fotovoltaicos

La Fig. 2.4 muestra el modelo esquemático de un módulo fotovoltaico conectado al nodo k -th a través de un convertidor de CD/CA [29]. La expresión implícita (2.17) modela el comportamiento de la corriente de CD en las terminales del panel $I_{CDk}^{t_z}$. Donde I_{ph} , I_0 , $V_{CDk}^{t_z}$, R_s , n_s y n_p representan la corriente del panel fotovoltaico, la corriente de saturación, el voltaje de CD en las terminales del módulo, la resistencia en serie, el número de celdas en serie y paralelo, respectivamente. El término R_s se evalúa a partir de (2.18), donde V_{oc} , V_{mp} , I_{sc} , I_{mp} representan el voltaje de circuito abierto, voltaje del punto de máxima potencia, corriente de corto circuito y la corriente del punto de máxima potencia, respectivamente. Los términos I_{sc} y V_{oc} se evalúan a partir de (2.19) y (2.20), respectivamente. Donde $I_{sc,sc}$, G , G_{sc} , k_i , T , T_{sc} , $V_{oc,sc}$ y k_v representan la corriente de corto circuito estándar bajo condiciones de prueba, irradiancia, irradiancia bajo condiciones de prueba, coeficiente de temperatura de corriente, temperatura del panel, temperatura estándar bajo condiciones de prueba, tensión de circuito abierto estándar bajo condiciones de prueba y coeficiente de temperatura de tensión, respectivamente.

$$I_{CDk}^{t_z} = \left[I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V_{CDk}^{t_z} + \frac{I_{CDk}^{t_z}}{n_p} R_s}{n_s V_{CD}^{t_z}} \right) - 1 \right) \right] n_p; \forall t_z \in T \quad (2.17)$$

$$R_s = \frac{\frac{V_{oc} - V_{mp}}{n_s} + V_{CD}^{t_z} \ln \left(\frac{I_{sc} - I_{mp}}{I_{sc}} \right)}{\frac{I_{mp}}{n_p}} \quad (2.18)$$

$$I_{sc}(T, G) = I_{sc, stc} - \frac{G}{G_{stc}} \left[1 + \frac{k_i}{100} (T - T_{stc}) \right] \quad (2.19)$$

$$V_{oc}(T) = V_{oc, stc} \left[1 + \frac{k_v}{100} (T - T_{stc}) \right] \quad (2.20)$$

En este trabajo, los parámetros del módulo fotovoltaico involucrados en (2.17) -(2.20) se tomaron en base a la hoja de datos del módulo policristalino Solartec S60PC-250 [29] y para un sistema fotovoltaico con módulos policristalinos ATERSA A-222P [30], los cuales se muestran en el Apéndice B. Además, se considera disponible un buen pronóstico de las curvas de irradiación solar. Las curvas de irradiación solar consideradas en este trabajo se proporcionan en el apéndice C.2.

De acuerdo con el modelo de la Fig. 2.4, la potencia inyectada en las terminales de CD (generada por el módulo) puede expresarse directamente por (2.21). Además, también se debe satisfacer el balance de potencia entre las terminales de CA y CD del inversor, si se desprecian las pérdidas del convertidor, este balance se representa por (2.22). donde $P_{CAk}^{t_z}$ es la potencia activa inyectada en las terminales del primario del transformador de acoplamiento del módulo. $V_k^{t_z}$ y $\theta_k^{t_z}$ son la magnitud y ángulo, respectivamente, del fasor de voltaje en dichas terminales. Mientras que $V_m^{t_z}$ y $\theta_m^{t_z}$ representan dichas cantidades, pero en las terminales del secundario. Por lo tanto, $P_{CAk}^{t_z}$ en (2.22) se formula de manera explícita por medio de (2.11), pero considerando la matriz de conductancias y susceptancias de (2.13).

$$P_{CDk}^{t_z} (V_{CDk}^{t_z}, I_{CDk}^{t_z}) = I_{CDk}^{t_z} V_{CDk}^{t_z}; \forall t_z \in T \quad (2.21)$$

$$P_{CAk}^{t_z} (V_k^{t_z}, V_m^{t_z}, \theta_k^{t_z}, \theta_m^{t_z}) = P_{CDk}^{t_z} (V_{CDk}^{t_z}, I_{CDk}^{t_z}); \forall t_z \in T \quad (2.22)$$

Es importante mencionar que debido a que se considera un convertidor CD/CA multipulso de 48 pulsos, también se debe cumplir la siguiente relación [31],

$$V_{CDk}^{t_z} = \frac{\pi}{16} V_k^{t_z} ; \forall t_z \in T \tag{2.23}$$

Para el caso de los módulos fotovoltaicos las variables de decisión introducidas son $[V_{CDk}^{t_z}, I_{CDk}^{t_z}] \in y_{MF} (\forall t_z \in T)$, mientras que $[V_k^{t_z}, V_m^{t_z}, \theta_k^{t_z}, \theta_m^{t_z}] \in y_{RD} (\forall t_z \in T)$.

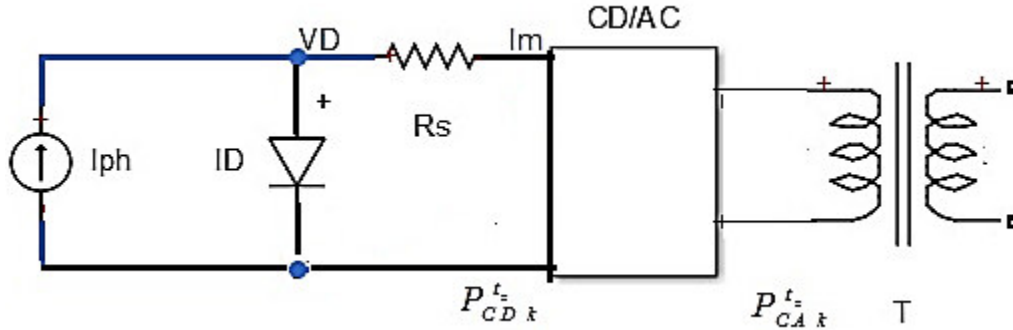


Figura 2.4. Modelo esquemático de un módulo fotovoltaico

2.2.7 Cargas eléctricas

El consumo de energía en los nodos de carga de la micro-red se representa por medio de un modelo de potencia constante para todo el intervalo de tiempo T . La potencia compleja $S_{li}^{t_z}$ consumida en el nodo i -th se representa entonces por (2.24). Donde $P_{li}^{t_z}$ y $Q_{li}^{t_z}$ representan el consumo de potencia activa y reactiva en dicho nodo en el instante t_z , respectivamente.

$$S_{li}^{t_z} = P_{li}^{t_z} + jQ_{li}^{t_z} \quad \forall t_z \in T \tag{2.24}$$

El modelo de demanda de energía no introduce variables de decisión al problema de optimización, pero la magnitud $V_i^{t_z}$ y ángulo $\theta_i^{t_z}$ del fasor de voltaje del nodo de conexión sí son considerados como variables de decisión, tal que $[V_i^{t_z}, \theta_i^{t_z}] \in y_{RD} (\forall t_z \in T)$. Además, se considera que se dispone de un buen pronóstico de las curvas de demanda de potencia ($S_{li}^{t_z} \forall i, t_z \in T$). Las curvas de demanda de potencia consideradas en este trabajo se presentan en la sección 4.3, 4.4 y 4.6.

2.2.8 Vehículo eléctrico

En la actualidad existe la tendencia de hacer más eficiente el consumo energético para satisfacer necesidades de transporte. Para este fin, se ha considerado el uso de vehículos eléctricos. Tomando en cuenta este aspecto, en este trabajo se considera que vehículos eléctricos podrían conectarse a la micro-red para cargar su batería. Pero, además, para operar como un sistema de almacenamiento que participa en la optimización del manejo de la energía en la micro-red. El sistema eléctrico del vehículo está constituido principalmente por

un motor de CA, inversor de potencia trifásica (AC/DC), sistema de almacenamiento de energía (batería) y el convertidor de potencia (DC/AC). Este último, inyecta potencia del sistema almacenador a la red, tal como se observa en la Fig. 2.5. El convertidor de potencia DC/AC se puede considerar como una fuente de voltaje controlada (VSC; por sus siglas en inglés), el cual posee la habilidad de controlar el flujo de potencia activa y reactiva inyectado al punto de conexión [32].

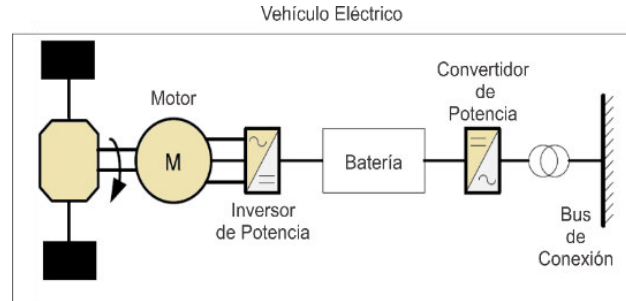


Figura 2.5. Diagrama de un vehículo eléctrico

La inyección de potencia activa y reactiva del VSC en el nodo de conexión en CA se representa mediante las ecuaciones (2.11) y (2.12) respectivamente. Suponiendo que no existen pérdidas en el VSC, la potencia del almacenador de energía y la potencia activa inyectada por el VSC son iguales, generando la restricción de igualdad (2.25).

$$P_{vsc} = P_{ev-s} \quad (2.25)$$

El estado de carga (SOC) del vehículo en un tiempo determinado es descrito en la ecuación (2.26) [21]. El consumo de energía $E_{consumida}(t)$ para el instante de tiempo t , tiene que ser considerado en conjunto con la energía restante del período anterior $E_{Almacenada}(t-1)$ además de la carga $\sum_{t=1}^{tZ} (P(t)_{carga})$ y descarga $\sum_{t=1}^{tZ} (P(t)_{descarga})$ en el instante de tiempo t .

$$SOC(t) = E_{Almacenada}(t) = E_{Almacenada}(t-1) + \Delta t * \eta_c * \sum_{t=1}^{tZ} (P(t)_{carga}) - E_{consumida}(t) - \frac{1}{\eta_d} * \Delta t * \sum_{t=1}^{tZ} (P(t)_{descarga}) \quad (2.26)$$

Donde η_c es la eficiencia de carga del vehículo, η_d la eficiencia de descarga de vehículo y Δt Delta de tiempo operacional.

Se debe tener en cuenta que la potencia de carga es negativa ($P_{carga}^t \leq 0$) y la potencia de descarga es positiva ($P_{descarga}^t \geq 0$), donde la suma de ambas potencias representa la potencia neta P_{pev}^t aportada o consumida por la batería del vehículo eléctrico en su nodo de

conexión.

En adición, el fasor de voltaje en el nodo de conexión se representa por su magnitud $V_j^{t_z}$ y $\theta_j^{t_z}$ ángulo. Así, las variables de decisión de la j -th batería del vehículo eléctrico son $[P_{carga,j}^{t_z}, P_{descarga,j}^{t_z}] \in \mathbf{y}_B (\forall t_z \in T)$, mientras que $[V_j^{t_z}, \theta_j^{t_z}] \in \mathbf{y}_{VH} (\forall t_z \in T)$.

2.3 Modelo explícito de FOP. para micro-Redes

Los modelos de los componentes de micro-redes descritos en las secciones previas se consideran en esta sección para formular el modelo explícito de FOP. para micro-redes no autónomas. Para este fin se considera una micro-red general compuesta de una cantidad de N_{bAC} nodos en CA, N_{bCD} nodos en CD, N_{AI} alimentadores, N_T transformadores, N_B baterías, N_A aerogeneradores, N_{MF} módulos fotovoltaicos, N_{CE} cargas eléctricas y N_{PEV} vehículos eléctricos. Se hace notar que los N_{pac} puntos de acoplamiento común son un subconjunto de los N_{bAC} nodos en CA. Además, los nodos en CD representan las terminales de CD de los módulos fotovoltaicos, tal que $N_{bCD} = N_{MF}$.

2.3.1 Función Objetivo

Se pretende minimizar el costo total de la energía importada para abastecer el consumo energético de la micro-red para un día en adelante. En base a (2.6), dicho objetivo se formula manera explícita por medio de la siguiente función,

$$F_T = \sum_{t_z=1}^{t_{end}} \sum_{j=1}^{N_{pac}} a_j + b_j (P_{RP,j}^{t_z}) + c_j (P_{RP,j}^{t_z})^2 \quad (2.27)$$

Note que (2.27) denota que el objetivo a minimizar es el costo de la energía total importada a través de los PAC a lo largo del periodo de tiempo T para abastecer las curvas de demanda pronosticadas $S_{li}^{t_z} \forall i, t_z \in T$.

2.3.2 Restricciones de igualdad

El conjunto de restricciones de igualdad $\mathbf{h}(\mathbf{y})$ en (2.2) se expresa de manera explícita por medio de las restricciones (2.28), las cuales se describen a continuación. Las restricciones de balance de potencia activa $\Delta P_{RD,i}^{t_z}$ y reactiva $\Delta Q_{RD,i}^{t_z}$ correspondientes a los nodos en CA de la micro-red se expresan por medio del primer bloque en (2.28). Donde el límite inferior $\forall j \in i$ significa todo elemento j -th conectado al nodo i -th. Por ejemplo, el término $\sum_{\forall j \in i} P_{A,j}^{t_z}$ indica la suma de las potencias activas aportadas (generadas) por todos los aerogeneradores conectados al nodo i . Se debe aclarar que el término $\sum_{\forall j \in i | j \in N_{AI}, N_T} P_{iny,j}^{t_z}$ indica la suma de las potencias activas inyectadas al nodo i a través de todas las terminales de alimentadores y transformadores conectadas a dicho nodo. Además, las ecuaciones de balance de potencia reactiva se formulan únicamente para los k -th nodos en CA que no tienen conectadas fuentes

de generación de potencia ($\forall k \notin N_{GEN}$): es decir, no se formulan en nodos PAC ni en nodos en los que se conectan baterías, aerogeneradores, módulos fotovoltaicos y vehículos eléctricos. A partir de (2.11), (2.21) y (2.22) se formulan las restricciones que modelan el comportamiento de estado estacionario de cada batería y de su correspondiente inversor CD/CA, como se muestra en el bloque inferior de (2.28). Donde $P_{CD}(V,I)$ representa el término en el segundo miembro de (2.13). Note que (2.26) se formula para ($\forall t_z \in T$).

$$h^{t_z}(y^{t_z}) = \left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{RD i}^t = P_{RP i}^t + \sum_{\forall j \in i} P_{Bc j}^t + \sum_{\forall j \in i} P_{Bd j}^t + \sum_{\forall j \in i} P_{Aj}^t + \\ \sum_{\forall j \in i} P_{CD j}^t - \sum_{\forall j \in i} P_{lj}^t - \sum_{\forall j \in i | j \in N_{Al}, N_T} P_{inj j}^t(V, \theta) = 0, \\ \Delta Q_{RD k}^t = - \sum_{\forall j \in k} Q_{lj}^t - \sum_{\forall j \in k} Q_{inj j}^t(V, \theta) = 0 \\ \text{---} \\ \Delta I_{CD k}^t = I_{CD k}^t - f_{CD}(V_{CD k}^t, I_{CD k}^t) = 0, \\ \Delta P_{CD k}^t = P_{CA k}^t(V, \theta) - P_{CD k}^t(V_{CD k}^t, I_{CD k}^t) = 0, \\ \Delta V_{CD k}^t = V_{CD k}^t - (\pi/16)V_k^t = 0 \\ k = N_{bAC} + 1, \dots, N_{bAC} + N_{bCD} \end{array} \right\}_{\forall t_z \in T} \quad (2.28)$$

2.3.3 Restricciones de desigualdad a funciones

Las únicas restricciones de desigualdad a funciones $g(y)$ en (2.3) corresponden a las baterías y vehículos eléctricos, como sigue. Las baterías tienen capacidad de carga y descarga finita. Teniendo esto en mente, el *SOC* se modula a lo largo del periodo de tiempo T por medio del primer bloque de (2.29) [10]. Donde SOC_{Bj}^0 es el estado inicial de carga (en t_0), la longitud de cada etapa de tiempo Δt se calcula como la resta de dos instantes consecutivos, i.e, $\Delta t = t_x - t_{x-1}$. ε_{cj} y ε_{dj} representan la eficiencia de carga y descarga, cuya capacidad nominal es $E_{Bnom j}$. Los límites superior e inferior del estado de carga son SOC_{Bj}^{\max} y SOC_{Bj}^{\min} , respectivamente. De manera similar, el *SOC* de los vehículos eléctricos se acota por medio de la restricción correspondiente al segundo bloque de (2.29)

$$h^{t_z}(y^{t_z}) = \left\{ \begin{array}{l} SOC_{Bj}^{\min} \leq SOC_{Bj}^{t_z} \leq SOC_{Bj}^{\max} \\ \text{---} \\ SOC_{PVHk}^{\min} \leq SOC_{PVHk}^{t_z} \leq SOC_{PVHk}^{\max} \end{array} \right\}_{\forall j \in N_B; \forall k \in N_{VH}; \forall t_z \in T} \quad (2.29)$$

2.3.4 Restricciones de desigualdad a variables

Se debe tomar en cuenta que las variables de decisión deben adquirir valores admisibles, de otra forma, la solución proporcionada por el modelo de FOP. podría no tener sentido desde un punto de vista práctico. Por tal razón, las variables de decisión y se limitan a lo largo del intervalo de tiempo T por medio del conjunto de restricciones (2.30).

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{y}_{RD} \leq y_{RD}^t \leq \bar{y}_{RD} \\ \underline{y}_{MF} \leq y_{MF}^t \leq \bar{y}_{MF} \\ \underline{y}_B \leq y_B^t \leq \bar{y}_B \end{array} \right\} \forall t_z \in T \quad (2.30)$$

Donde de manera explícita el conjunto de variables de decisión asociadas a la red de distribución está dado por la magnitud y ángulo del fasor del voltaje en cada nodo de la misma, así como de las potencias activas intercambiadas con red principal, tal que $y_{RD} = [V \in V_j^t, \theta \in \theta_j^t, P_{RPj}^t]; \forall t_z \in T$ y $\forall j \in N_{bCA}$. Mientras que las variables de decisión de las baterías y vehículos eléctricos son $y_B = [P_{Bdk}^t, P_{Bck}^t]; \forall t_z \in T$ y $\forall k \in N_B$ y $y_{VH} = [P_{carga k}^t, P_{descarga k}^t]; \forall t_z \in T$ y $\forall k \in N_{pev}$ respectivamente.

Capítulo 3

3 Algoritmos para la solución del modelo FOP.

En este capítulo se describen las herramientas de optimización de MatLab® que se utilizan para resolver el modelo de optimización presentado en la Sección 2.3. Además, se describe la implementación computacional de los algoritmos para el análisis de flujos óptimos de potencia para el control terciario de micro-redes.

3.1 Herramientas de Optimización

En esta sección se presentan las herramientas de optimización útiles para determinar el manejo óptimo de la energía en micro-redes. Dado que en el ámbito del diseño de FOP. es muy habitual trabajar en un entorno de cálculo numérico como MatLab®, la sección se centra en las herramientas disponibles en este entorno para abordar problemas de optimización.

Las técnicas de optimización permiten encontrar los valores de un conjunto de variables de decisión $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ que pueden ser considerados como óptimos [33]. Una formulación típica de un problema de optimización consiste de una función objetivo $f(x)$ a ser minimizada o maximizada, y que podría ser objeto de restricciones, ya sean de igualdad, $G(x) = 0 (i = 1, \dots, me)$, de desigualdad, $G_i(x) \leq 0 (i = me + 1, \dots, m)$, límites inferiores xl y superiores xu de las variables de decisión x . Una descripción general del problema puede verse como,

$$\begin{cases} \min_x f(x) \\ G_i(x) = 0 & i = 1, \dots, me \\ G_i(x) \leq 0 & i = me + 1, \dots, m \end{cases} \quad (3.1)$$

Debido a las características del problema FOP. para micro-redes descrito en la Sección 2.3, su solución requiere de métodos de programación no lineal; en los que la función objetivo y/o las restricciones contienen términos no lineales de las variables de decisión. La resolución de los problemas de programación no lineal normalmente requiere un procedimiento iterativo, en el que en cada iteración se establece la dirección de búsqueda del punto óptimo y se actualizan las variables de decisión de acuerdo a dicha dirección.

La plataforma MatLab®, en su versión R2015, nos provee de herramientas para la solución de problemas de optimización. La información que incluimos en este capítulo para describir el uso de estas herramientas es en su mayoría extraída de las respectivas guías de usuario.

3.1.1 Toolbox de optimización de MatLab®

Este toolbox incluye funciones de optimización de muchos tipos [34];

- Minimización no lineal sin restricciones.
- Minimización no lineal con restricciones, incluyendo problemas de minimización semi-infinita
- Programación lineal y cuadrática
- Ajuste de curvas y mínimos cuadrados no lineales
- Mínimos cuadrados lineales con restricciones
- Problemas dispersos y estructurados de gran escala, incluyendo programación lineal y minimización no lineal con restricciones

Para los fines de este trabajo, de este toolbox únicamente las herramientas relacionadas con la minimización no lineal con restricciones son de interés. En particular, la función *fmincon* contempla métodos de optimización que realizan búsqueda de un óptimo local de un problema de optimización no lineal con restricciones, por lo cual se ajusta para abordar el problema de FOP. para micro-redes. Algunos de los parámetros que deben ser configurados para el uso de dicha herramienta, son los siguientes;

- a) *LargeScale*: Activa (on) o desactiva (off) las características de algoritmo de gran escala.
- b) *Algorithm*: Permite especificar el algoritmo que usa *fmincon* interiormente. Existen cuatro opciones válidas para este problema: interior-point, trust-region-reflective, sqp, active-set.
- c) *Hessian*: Permite definir el método con el cual se aproximará el Hesiano de lagrange para un problema con restricciones, existen dos opciones bfgs y lbfgs. La opción bfgs regresa una aproximación realizada por el método Quasi-Newton para el Hesiano en el punto final, lbfgs calcula el Hesiano con una memoria limitada utilizando método de aproximación Quasi-Newton de gran escala..
- d) *Display*: Configura el nivel de visualización.
- e) *TolCon*: Tolerancia máxima de la violación de restricciones.
- f) *TolFun*: Terminación de tolerancia en el valor de la función.
- g) *MaxIter*: El número máximo de iteraciones permitido.
- h) *MaxFunEvals*: El número máximo de evaluaciones de la función permitidas.

Es importante aclarar que el método de punto interior (IP, por sus siglas en Inglés) es uno de los métodos determinísticos que han adquirido un mayor nivel de madurez. Aunado a lo anterior, se encuentra disponible en el toolbox a través de la función *fmincon*. Por estas razones, será considerado en este trabajo.

3.1.2 Toolbox de algoritmos genéticos y búsqueda directa

El toolbox de MatLab® denominado Genetic Algorithm and Search Toolbox[35], provee de los métodos de optimización de algoritmos genéticos, recocido simulado y búsqueda directa para la solución de problemas de optimización globales complejos, los cuales se disponen en funciones independientes. De este toolbox son de interés el método de búsqueda directa invocado por la función *patternsearch* y de algoritmos genéticos invocado por la función *ga*, las cuales se describen a continuación.

3.1.3 Búsqueda directa (función *patternsearch*)

Este método de optimización no requiere ninguna información del gradiente de la función objetivo por lo cual se puede utilizar para funciones no continuas. A diferencia de los métodos de optimización tradicionales que utilizan la información sobre el gradiente y derivadas sucesivas para encontrar un punto óptimo. El método de búsqueda directa explora un conjunto de puntos alrededor del punto actual hasta encontrar un punto en el que no se logra decaimiento considerable de la función objetivo. El toolbox incluye dos algoritmos de búsqueda directa, llamados de búsqueda de patrón generalizada (GPS) y el algoritmo de búsqueda de malla adaptiva (MADS). Ambos son algoritmos de búsqueda de patrones que calculan una secuencia de puntos aproximados al punto más óptimo. El algoritmo busca un conjunto de puntos que se denomina malla, estos son cercanos al punto actual. Si el algoritmo encuentra un punto en la malla que mejora el valor de la función objetivo, el nuevo punto se convierte en el punto actual para el siguiente paso del algoritmo [34].

La herramienta *patternsearch* (Búsqueda Directa) al igual que la función *fmincon*, puede catalogarse como una herramienta de búsqueda local con restricciones para funciones multivariable no lineales. En este sentido, dicha herramienta (o método de búsqueda directa) podría también aplicarse para resolver el problema de FOP. en micro-redes. En este caso, los parámetros que deben especificarse para la configuración de la herramienta *patternsearch* son los siguientes (para una descripción detallada de los mismos se puede consultar [34]):

- a) *InitialMeshSize*: Tamaño inicial de la malla.
- b) *MeshContraction*: Factor por el que se multiplica la malla para contraerla cuando se aproxima a un mínimo.
- c) *MeshExpansion*: Factor por el que se multiplica la malla para expandirla cuando está lejos de un mínimo.
- d) *ScaleMesh*: Activa (on) o desactiva (off) el escalado de la malla.
- e) *PollMethod*: Método empleado para realizar el sondeo. Existen las siguientes posibilidades: *GPSPositiveBasis2N*, *GPSPositiveBasisNp1*, *MADSPositiveBasis2N*, *MADSPositiveBasisNp1*.

- f) CompletePoll: Activa (on) o desactiva (off) el análisis completo de todos los puntos. Si está activo, se examinan todos los puntos de la malla y se selecciona como siguiente punto el mejor. Si no está activo, se elige como siguiente punto el primero que mejore al actual, deteniendo en ese momento el examen.
- g) PollingOrder: Orden para realizar el sondeo. Admite tres opciones: Consecutive, Random y Success.
- h) SearchMethod: Tipo de búsqueda usada en el patrón de búsqueda. Si se indica un método en cada iteración, antes de realizar el sondeo, se usa el método para buscar un mejor punto y si se encuentra se omite el sondeo. Admite las siguientes opciones: ninguno, GPSPositiveBasisNp1, GPSPositiveBasis2N, MADSPositiveBasisNp1, MADSPositiveBasis2N, searchga, searchlhs y searchneldermead.
- i) CompleteSearch: Sólo tiene sentido si se han indicado algunos tipos de búsqueda (SearchMethod). Activa (on) o desactiva (off) la búsqueda completa en cada iteración para esos métodos de búsqueda.
- j) Augmented Lagrangian Pattern Search (ALPS): Método de solución de las restricciones. El patrón de búsqueda minimiza una secuencia de subproblemas, cada uno de los cuales es una aproximación del problema original, cada subproblema tiene un valor fijo de λ , s , y ρ . Cuando el subproblema se minimiza con una precisión requerida y se satisfacen las condiciones de viabilidad las estimaciones de Lagrange se actualizan, de lo contrario, el parámetro de penalty se incrementa por un factor de penalización (PenaltyFactor).
- k) Display: Configura el nivel de visualización.
- l) TolCon: Tolerancia máxima de la violación de restricciones.
- m) TolFun: Terminación de tolerancia en el valor de la función.
- n) MaxIter: El número máximo de iteraciones permitido.
- o) MaxFunEvals: El número máximo de evaluaciones de la función permitió.

3.1.4 Algoritmo genético (función *ga*)

Un algoritmo genético (AG) es un método para solucionar problemas de optimización con o sin restricciones basándose en un proceso de selección natural que imita la evolución biológica. Este algoritmo modifica repetidamente una población de soluciones individuales. En cada paso, el algoritmo genético selecciona individuos de la población actual aleatoriamente y los utiliza como padres para producir los hijos de la siguiente generación. Tras varias generaciones sucesivas, la población "evoluciona" hacia una solución óptima [34]. El algoritmo genético se puede aplicar para solucionar problemas que no se adaptan bien a los algoritmos de optimización estándar, incluidos aquellos problemas en los que la función objetivo es discontinua, no diferenciable, estocástica o altamente no lineal como se puede dar en el FOP. donde es altamente no lineal y en algunos casos puede presentar funciones discontinuas. El algoritmo genético difiere de un algoritmo de optimización clásico

basado en derivadas de dos formas principales, tal y como se resume en la tabla siguiente [34].

Tabla 3.1. Diferencias generales entre algoritmos clásicos y genéticos.

Algoritmo Clásico	Algoritmo Genético
Genera un solo punto en cada iteración. La secuencia de puntos se aproxima a la solución óptima.	Genera una población de puntos en cada iteración. El mejor punto de la población se aproxima a la solución óptima.
Selecciona el siguiente punto de la secuencia de una forma determinista.	Selecciona la siguiente población mediante un cálculo que suele basarse, al menos en parte, en el azar.

Los algoritmos genéticos usan principalmente tres tipos de reglas en cada paso para crear la siguiente generación a partir de la actual: a) *reglas de selección*: de los individuos, llamados *padres*, que contribuirán a la población de la siguiente generación, b) *reglas de cruzamiento*: para combinar los padres por parejas y obtener hijos para la siguiente generación y c) *reglas de mutación*: que aplican cambios a padres individuales para obtener hijos.

La herramienta *ga* se adapta a la optimización global de problemas no lineales con o sin restricciones en este caso tenemos el problema de FPO en micro-redes con restricciones. Además, aporta una gran flexibilidad, ya que aparte de los múltiples parámetros de los que dispone. Por ejemplo, es posible personalizar las funciones principales de la herramienta, tales como la función de selección, de cruce, de mutación y de creación de la población inicial, permitiendo proporcionar funciones a la medida del problema que se trate. Así mismo, permite aplicar una función de búsqueda local, tales como *fmincon* y *patternsearch*, para mejorar el resultado final. Los parámetros estándar que deben ser configurados para la ejecución de la función *ga* son los siguientes [34],

- a) *PopulationSize*: Tamaño de la población inicial.
- b) *InitialPopulation*: Población inicial dada en un vector de filas del tamaño de la población, y columnas el número de variables del problema.
- c) *Generations*: Número máximo de generaciones de la subpoblación.
- d) *StallGenLimit*: El algoritmo se detiene si el cambio relativo medio en el mejor valor de la función objetivo o *fitness* sobre *Maxstar* Generaciones es menor o igual a la función *Tolerancia*.
- e) *Display*: Configuras el nivel de visualización.
- f) *TolCon*: Tolerancia máxima de la violación de restricciones.
- g) *TolFun*: Terminación de tolerancia en el valor de la función.

- h) **NonlinConAlgorithm**: Especifica el método para considerar las restricciones no lineales para la solución del problema de optimización. Existen dos opciones; la cual se selecciona por medio del parámetro **NonlinearConstraintAlgorithm**, el cual se especifica como 'auglag' (Lagrangiano aumentado) o 'penalti' (penalización de restricciones). Por defecto el algoritmo genético utiliza el Lagrangiano aumentado para resolver los problemas de restricción no lineales sin restricciones [44]. Enseguida se proporciona una descripción más detallada estas opciones,
- **Augmented Lagrangian Genetic Algorithm (ALGA)** El algoritmo genético minimiza una secuencia de subproblemas, cada uno de los cuales es una aproximación del problema original, cada subproblema tiene un valor fijo de λ , s , y ρ . Cuando el subproblema se minimiza con una precisión requerida y se satisface las condiciones de viabilidad las estimaciones de Lagrange se actualizan. De lo contrario, el parámetro de penalty se incrementa por un factor de penalización (**PenaltyFactor**).
 - **PenaltyFactor**: Especifica un valor inicial (**InitialPenalty**) del parámetro de penalización que es utilizado por el algoritmo. La sanción inicial debe ser mayor o igual que 1, y tiene un valor predeterminado de 10. El factor de penalización (**PenaltyFactor**) aumenta el parámetro de penalización cuando el problema no se resuelve con la precisión requerida y no satisface los límites. factor de penalización debe ser mayor que 1, y tiene un valor predeterminado de 100.
- i) **EliteCount**: Número de individuos pertenecientes a la élite que sobreviven de una generación de la subpoblación.
- j) **CrossoverFraction**: Fracción de nuevos individuos que se obtienen por cruce en contraposición a los que se obtienen por mutación.
- k) **FitnessScalingFcn**: Función de escalado del valor de fitness. Convierte las puntuaciones de fitness de baja calidad que son devueltos por el fitness principal a valores que están en un rango que es adecuado para la función de selección. Los posibles valores de esta función son: **fitscalingrank** (asigna un valor de expectativa igual a su valor de orden de mejor a peor valor de fitness), **fitscalingprop** (asigna un valor de expectativa proporcional al valor de fitness), **fitscalingtop** (Top escalamiento de los individuos superiores o iguales a la escala), **fitscalingshiftlinear** (escalamiento de desplazamiento lineal de los puntajes brutos, se coloca de modo que la expectativa del individuo más apto es igual a una constante multiplicada por la puntuación media).
- l) **CreationFcn**: Función de creación de la población inicial. La única de las funciones estándar que se adapta a las características de este problema es:

gacreationlinearfeasible (crea una población inicial al azar normalmente distribuida tomando en cuenta los límites establecidos).

- m) SelectionFcn: Función de selección de padres en base al valor de expectativa. Los valores posibles son: selectionremainder (selecciona a los padres de forma proporcional a la parte entera de su valor de expectación, y usa un método de ruleta basándose en la parte decimal), selectionstochunif (usando un muestreo universal estocástico), selectionroulette (usando una ruleta en la que cada padre tiene un área proporcional a su valor de expectación) y selectiontournament (selecciona varios padres al azar y se queda con el que tiene mejor valor de expectación).
- n) CrossoverFcn: Función de cruce de parejas de padres. Las funciones disponibles de serie son: crossoversscattered (cada uno de los genes se coge o de un padre o de otro de forma aleatoria), crossoverheuristic (se obtiene un nuevo elemento situado en la línea que une los cromosomas de ambos padres interpretados como puntos en el espacio, más cerca del padre con más expectativa), crossoverintermediate (se obtiene un nuevo elemento situado entre ambos padres considerando sus cromosomas como vectores), crossoversinglepoint (se cruzan los cromosomas de los padres por un punto), crossovertwopoint (se cruzan los cromosomas de los padres por dos puntos) y crossoverarithmetic (se obtiene la media aritmética de ambos padres considerando sus cromosomas como vectores).
- o) MutationFcn: Función de mutación. En las funciones disponibles, solamente mutationadaptfeasible (mutación al azar teniendo en cuenta los límites) es adecuada para este problema.
- p) HybridFcn: Función de hibridación. Es posible aplicar una función de búsqueda local al mejor elemento obtenido por el algoritmo a su término, con el objetivo de buscar entre sus vecinos una solución de más calidad más eficientemente. Las opciones son: ninguna, fmincon y patternsearch.

3.2 Implementación computacional

A continuación, se describe el desarrollo de la implementación computacional de los algoritmos para efectuar el análisis de FOP. de micro-redes. El desarrollo de esta implementación tiene como objetivo utilizar las herramientas proporcionadas por el toolbox de MatLab[®] descritas en la sección anterior. Por lo tanto, es necesario primeramente revisar como dichas herramientas son ejecutadas el entorno de MatLab[®], pues esto brinda los lineamientos para proceder a la implementación, como se describe a continuación.

3.2.1 Ejecución del método de punto interior (función *fmincon*)

El método de punto interior se puede aplicar por medio de la ejecución de la función *fmincon*, lo cual se discute enseguida. Esta función se ejecuta como cualquier otra función de MatLab[®]. Sin embargo, es necesario especificar los valores de los argumentos del conjunto

de entradas I_A y salidas O_A que están establecidos y normados para su ejecución. La forma general para el llamado (ejecución) de esta función es,

$$[O_A]=fmincon(I_A) \tag{3.2}$$

Las tablas 3.2 y 3.3 describen los elementos principales de esos conjuntos de argumentos de acuerdo al orden en que deben ser proporcionados a la función *fmincon* para su ejecución para mayores detalles de los parámetros I_A y O_A ver [36]. A partir de la Tabla 3.2 se observa que, para la ejecución de la función *fmincon*, es necesario implementar la función objetivo (2.27) en una función, la cual se ha codificado en la función denominada como *objfun_OPF.m*. Similarmente, se observa que es necesario implementar las restricciones de igualdad (2.28) y de desigualdad a funciones (2.29) en otra función; lo cual se codificó en la función denominada como *constraints_OPF.m*. Por último, las restricciones de desigualdad a variables (2.30) se expresaron por medio de los vectores de límites inferiores **Lb** y superiores **Ub**. De esta manera, el modelo de optimización queda implementado en funciones estructuradas en lenguaje MatLab® y está listo para ser resuelto por el método de punto interior a través de la función *fmincon*.

Tabla 3.2. Descripción de los argumentos de entrada IA para función *fmincon*.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
@fun	Es el “handler” del archivo .m que contiene la función objetivo, en nuestro caso; @(x)objfun_OPF(x)
x	Vector que contiene los valores numéricos de las condiciones iniciales de las variables de decisión, i.e. $y^0=[y_{RD}^0, y_{MF}^0, y_B^0]$.
A	Estos parámetros no son de interés en este trabajo, se refieren a restricciones igualdad y desigualdad lineales. Por lo tanto se deben asignar como argumentos vacíos (Por ejemplo, A=[]:).
b	
Aeq Beq	
Lb	Vector que contiene los valores de los limites inferiores de las variables de decisión y.
Ub	Vector que contiene los valores de los limites superiores de las variables de decisión y.
@nonlcon	Es el “handler” de la funcion que contiene las restricciones funcionales de igualdad no-lineal y desigualdad, la cual se ha denominado como <i>constraints_OPF.m</i>
Options	Estructura de parámetros opcionales para configurar la aplicación del “solver” de optimización, dados mediante la función <i>optimset</i> de MatLab®. Los parámetros de interés se muestran en la Sección 3.1.1.

Tabla 3.3. Descripción de los argumentos de salida OA para función *fmincon*.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
--------	-------------

x	Este vector contiene los valores numéricos de las variables de decisión en la solución del modelo de optimización, y es la misma variable como entrada en I_A .
Fval	Valor de la función objetivo en la solución x .
exitflag	Describe las condiciones de salida de <i>fmincon</i> ; si $e\text{flag}>0$, la convergencia fue alcanzada. Si $e\text{flag}=0$, el número máximo de iteraciones fue excedido. Si $e\text{flag}<0$, no hubo convergencia.
output	Estructura que contiene información de los resultados del proceso de optimización.
lambda	Vector de los multiplicadores de lagrange en la solución x .
grad	Valor del gradiente de la función objetivo en la solución x .
hessian	Valor del Hessiano de la función objetivo en la solución x .

3.2.2 Ejecución del algoritmo genético (función *ga*)

De manera similar a la función *fmincon*, la función *ga* sugiere especificar los valores de los argumentos del conjunto de entradas I_A y salidas O_A que están establecidos y normados para su ejecución. La forma general para el llamado (ejecución) de esta función es,

$$[O_A]=ga(I_A) \tag{3.3}$$

Las tablas 3.4 y 3.5 describen los elementos principales de esos conjuntos de argumentos de acuerdo al orden en que deben proporcionarse a la función *ga* para su ejecución. Los detalles de los parámetros I_A y O_A son dados en [34]. La Tabla 3.4 muestra que la ejecución de la función *ga* requiere que el modelo de optimización sea implementado de la misma manera a como es requerido para la función *fmincon*. Por lo tanto, el modelo de optimización implementado para la ejecución de la función *fmincon* puede ser directamente reutilizado para su solución por medio de la función *ga*.

Tabla 3.4. Descripción de los argumentos de entrada IA para función *ga*.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
@fitnessfcn	Es el “handler” del archivo .m que contiene la función objetivo, en nuestro caso; $@(x)\text{objfun_OPF}(x)$
nvar	Variable escalar en la que se indica la cantidad de variables asociadas al modelo de optimización.
A	Estos parámetros no son de interés en este trabajo, se refieren a restricciones igualdad y desigualdad lineales. Por lo tanto se deben asignar como argumentos vacíos (Por ejemplo, $A=[];$).
B	
Aeq	
Beq	
Lb	Vector que contiene los valores de los límites inferiores de las variables de decisión y .
Ub	Vector que contiene los valores de los límites superiores de las variables de decisión y .

@nonlcon	Es el “handler” de la función que contiene las restricciones funcionales de igualdad no-lineal y desigualdad, la cual se a denominado como constraints_OPF.m.
options	Estructura de parámetros opcionales para configurar la aplicación de “solver” de optimización, dados mediante la función <i>optimset</i> de MatLab®. Los parámetros de interés se muestran en la Sección 3.1.4.

Tabla 3.5. Descripción de los argumentos de salida OA para función *ga*.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
x	Este vector contiene los valores numéricos de las variables del sistema en la solución del modelo DED, y es el mismo vector considerado en I_A en nuestro caso VP.
fval	Valor de la función objetivo en la solución x
exitflag	Describe las condiciones de salida de <i>ga</i> ; si $exitflag > 0$, la convergencia fue alcanzada. Si $exitflag = 0$, el número máximo de iteraciones fue excedido. Si $exitflag < 0$, no hubo convergencia.
output	Estructura que contiene información de los resultados del proceso de optimización
population	Matriz cuyas filas contienen los miembros de la población final
scores	Vector columna de los valores de fitness (puntuaciones para los problemas enteros limitaciones) de la población final.

3.2.3 Ejecución del método de búsqueda directa (función *patternsearch*)

De manera similar a las dos funciones previas, la función *patternsearch* sugiere especificar los valores de los argumentos del conjunto de entradas I_A y salidas O_A que están establecidos y normados para su ejecución. La forma general para el llamado (ejecución) de esta función es,

$$[O_A] = patternsearchf(I_A) \tag{3.4}$$

Las tablas 3.6 y 3.7 muestran los elementos principales de los conjuntos de argumentos de entrada y salida de acuerdo al orden en que deben proporcionarse la función *patternsearch*. Los detalles de los parámetros I_A y O_A son dados en [34]. A partir de observar estas tablas, así como las tablas 3.2 a 3.5, es posible concluir que el modelo de optimización codificado en forma estructurada en funciones .m puede ser reutilizado directamente para su solución por los diferentes métodos de optimización considerados en este trabajo. Consideraciones mínimas deberán tomarse en cuenta para proveer los parámetros de entrada apropiados para cada una de las funciones del toolbox (*fmincon*, *ga* y *patternsearch*).

Tabla 3.6. Descripción de los argumentos de entrada IA para función *patternsearch*.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
--------	-------------

@fun	Es el “handler” del archivo .m que contiene la función objetivo, en nuestro caso; @(x)objfun_OPF(x)
x	Vector que contiene los valores numéricos de las condiciones iniciales de las variables de decisión, i.e. $y^0 = [y_{RD}^0, y_{MF}^0, y_B^0]$.
A	Estos parámetros no son de interés en este trabajo, se refieren a restricciones igualdad y desigualdad lineales. Por lo tanto se deben asignar como argumentos vacíos (Por ejemplo, A=[];
b	
Aeq	
Beq	
Lb	Vector que contiene los valores de los límites inferiores de las variables de decisión y.
Ub	Vector que contiene los valores de los límites superiores de las variables de decisión y.
@nonlcon	Es el “handler” de la función que contiene las restricciones funcionales de igualdad no-lineal y desigualdad, la cual se ha denominado como constraints_OPF.m
Options	Estructura de parámetros opcionales para configurar la aplicación del “solver” de optimización, dados mediante la función <i>optimset</i> de MatLab®. Los parámetros de interés se muestran en la Sección 3.1.3.

 Tabla 3.7. Descripción de los argumentos de salida OA para función *patternsearch*.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
x	Este vector contiene los valores numéricos de las variables de decisión en la solución del modelo de optimización, y es la misma variable como entrada en I_A .
Fval	Valor de la función objetivo en la solución x
exitflag	Describe las condiciones de salida de <i>fmincon</i> ; si <i>eflag</i> >0, la convergencia fue alcanzada. Si <i>eflag</i> =0, el número máximo de iteraciones fue excedido. Si <i>eflag</i> <0, no hubo convergencia.
output	Estructura que contiene información de los resultados del proceso de optimización.

3.2.4 Implementación computacional para el análisis FOP.

La similitud de los requerimientos impuestos para la ejecución de las funciones *fmincon*, *ga* y *patternsearch*, permite que los algoritmos para el análisis de FOP. de micro-redes sean implementados con una estructura similar. En este sentido, la diferencia significativa entre ellos prácticamente radica en el método de optimización elegido para la solución del modelo de FOP. para el control terciario de micro-redes (2.27)-(2.30). Por esta razón, la descripción de la implementación de los algoritmos se resume por medio del algoritmo representativo mostrado en el Fig. 3.1. Los componentes de este algoritmo se describen enseguida.

Lectura de Datos: la implementación computacional del análisis FPO para el control terciario inicia leyendo los datos de la micro-red y los parámetros para configurar la ejecución del método de optimización seleccionado (método de punto interior, ga o búsqueda directa). Dichos datos y parámetros son proporcionados por el usuario por medio de variables en un archivo .m independiente.

Conversión a p.u.: en esta etapa el algoritmo normaliza los datos del sistema proporcionados por el usuario de acuerdo al sistema en por unidad. Esta normalización permite evitar problemas de escalamiento del modelo de optimización.

Despacho económico inicial: para proceder a la solución del modelo (2.27)-(2.30), es primeramente necesario obtener un valor aproximado de la potencia compensada entre la micro-red y el sistema principal a través de los *PAC* a lo largo del intervalo T . Para este fin, se resuelve un modelo de optimización similar a (2.27)-(2.30) que no incluye las restricciones de igualdad (2.28); lo cual se ha denominado como despacho económico inicial. En este modelo el balance de potencia de la micro-red se plantea por medio de una restricción de balance general que modela la igualdad entre la potencia entregada y consumida de la micro-red; asumiendo que las fuentes de generación (*PAC*, baterías, aerogeneradores, etc.) y las cargas se conectan en un mismo nodo, es decir, sin considerar las ecuaciones de balance nodal. La función objetivo de este modelo es exactamente la misma utilizada en el modelo de FOP. (2.7)-(2.30). Por lo tanto, en esta etapa, el algoritmo invoca la evaluación tanto de la función objetivo (2.27) y de la restricción de balance general, para evaluar y resolver el modelo de despacho económico inicial. La solución de este modelo se considera el valor inicial de las variables de decisión que representan la potencia compensada entre la micro-red y el sistema principal a través de los *PAC*.

Condiciones iniciales: En esta etapa del algoritmo se asignan las condiciones iniciales de las variables de decisión y . En particular, las condiciones iniciales de la potencia intercambiada entre la micro-red y el sistema principal a través de los *PAC*, se obtiene del despacho económico inicial. Mientras que las variables de voltaje se les da un valor inicial de 1 p.u. y los ángulos de los fasores de voltaje nodales se les da un valor inicial de cero.

Análisis FOP.: En esta etapa, por medio del método de optimización seleccionado se resuelve el modelo (2.27)-(2.30). Cuya solución proporciona el valor óptimo y^* de las variables de decisión. De esta manera, el manejo óptimo de la energía está determinado. Note que el modelo (2.27)-(2.30) ha sido implementado en dos funciones (función objetivo y restricciones FOP.), las cuales son invocadas por el método de optimización seleccionado.

Flujos de red: En esta etapa, el algoritmo realiza los cálculos de flujo de potencia activa y reactiva a través de cada uno de los elementos que componen la micro-red.

Impresión de resultados: El algoritmo termina proporcionando la impresión de resultados obtenidos del análisis FOP. para el control terciario de micro-redes.

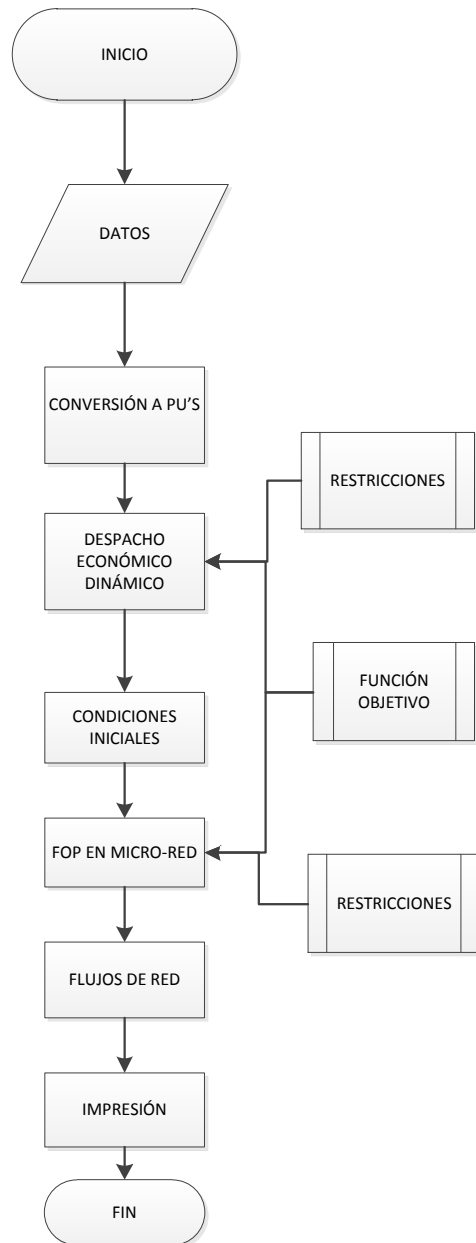


Figura 3.1. Algoritmo computacional FPO. para micro-redes

Capítulo 4

4 Resultados

En este capítulo se presentan y discuten los resultados numéricos relacionados al manejo óptimo de la energía en micro-redes obtenidos por medio de las herramientas computacionales para el análisis de FOP. implementadas en este trabajo. Para este fin, primeramente, se describen dos micro-redes de prueba consideradas en este capítulo. La primera es denominada como (MRP1) y está compuesta de elementos básicos; modulo fotovoltaico, batería, red principal y aerogenerador. La segunda red de prueba se denomina como (MPR2) y se obtiene de una modificación de la primera (MRP1) con la finalidad de considerar la inclusión de un parque de vehículos eléctricos. Estas dos redes son entonces consideradas en casos de estudio para mostrar los resultados del manejo óptimo de la energía obtenidos a partir de las herramientas desarrolladas. Posteriormente, se presenta un análisis del desempeño computacional del método de punto interior, algoritmo genético y búsqueda directa, lo cual permite identificar los métodos más efectivos para la solución del modelo (2.27)-(3.30). Una vez identificados, los métodos más efectivos son aplicados para determinar el manejo óptimo de la energía considerando datos reales de irradiación solar, velocidad de viento de la ciudad de Almería y la curva de demanda eléctrica de laboratorio 6 de CIESOL, ante distintas climáticas. En todos los casos de estudio, los análisis FOP. fueron ejecutados en una computadora personal PC DELL, 8 GB de memoria RAM y procesador i5-4210U CPU@ 2.40 GHz.

4.1 Micro-red de prueba 1 (MRP1)

La micro-red de prueba 1 (MRP1) se muestra en la Fig. 4.1 y está compuesta de elementos básicos; batería, módulo fotovoltaico, aerogenerador, carga, alimentadores y transformadores. La micro-red se conecta a la red principal a través del único *PAC* (nodo 1). Se aclara que los elementos de la red que conectan los pares de nodos 3-6, 4-7 y 5-8 son transformadores. Los demás elementos que interconectan dos nodos adyacentes representan segmentos de líneas de transmisión que forman parte del alimentador principal de la micro-red. En este caso, los elementos que tienen capacidad de proporcionar soporte de potencia activa son la red principal (*PAC*), aerogenerador, módulo fotovoltaico y la batería. Los parámetros considerados en los modelos de los componentes de esta micro-red de prueba, así como los coeficientes de costo asociados a la energía importada a través del *PAC* se presentan en el Apéndice A.1.

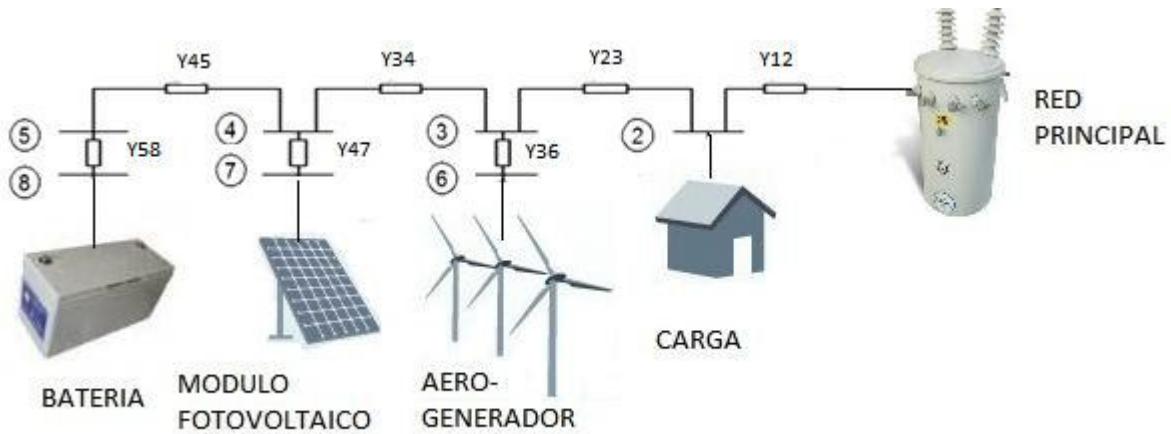


Figura 4.1. Micro-red de estudio MRP1.

4.2 Micro-red de prueba 2 (MRP2)

La micro-red de prueba 2 (MRP2) se ilustra en la Fig. 4.2, como en el caso anterior, la micro-red se conecta a la red principal a través del único *PAC* (nodo 1). Note que la MRP2 se obtiene al modificar la MRP1 para contemplar el efecto de un parque vehicular en el manejo óptimo de la energía. Los datos asociados a los nuevos elementos de la micro-red, en comparación con MRP1, se proporcionan en el Apéndice A.2.

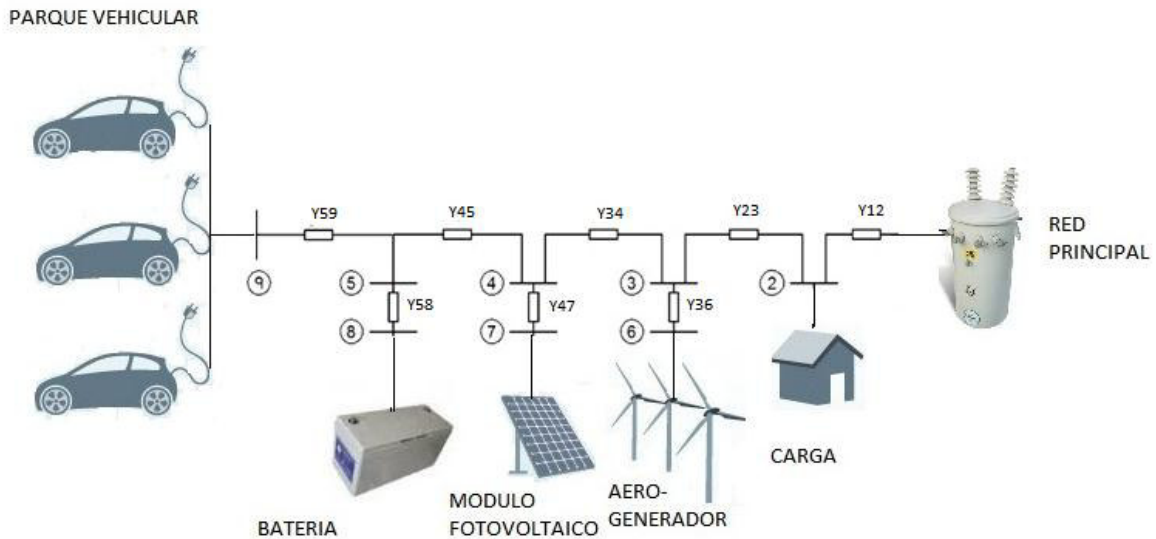


Figura 4.2. Micro-red de estudio MRP2.

4.3 Caso de estudio 1

Para el caso de estudio se ha considerado la micro-red de prueba MRP1. Para fines de análisis se considera la curva de demanda de potencia activa mostrada en la Fig. 4.3.a. Las curvas de irradiación solar y velocidad de viento consideradas se muestran en las figuras. 4.3.b y c, respectivamente. Estas dos curvas son típicas de la ciudad de Salamanca, Gto., y fueron

proporcionadas por el Centro de Ciencias Atmosféricas de la Universidad de Guanajuato. Las series de tiempo asociadas a las curvas de demanda, irradiación solar y velocidad de viento se muestran en el Apéndice C. En relación al sistema en p.u. se tomó una potencia y voltaje base de 100VA y 100V, respectivamente. Los límites de las magnitudes de voltaje para todos los nodos en CA de la micro-red son $0.95 \leq V \leq 1.05$ pu. Los límites del estado de carga de las baterías son $0.2 \leq SOC_B(t_i) \leq 0.95$ (en %). Además, se ha especificado que la batería tiene un estado inicial de $SOC_B(t_0) = 0.2$ (en %). Para este caso de estudio, el análisis FOP. fue realizado utilizando el método de punto interior proporcionado por la función *fmincon*. Los resultados obtenidos se muestran y discuten a continuación. Los resultados obtenidos utilizando el método de búsqueda directa y el algoritmo genético se discuten en secciones posteriores.

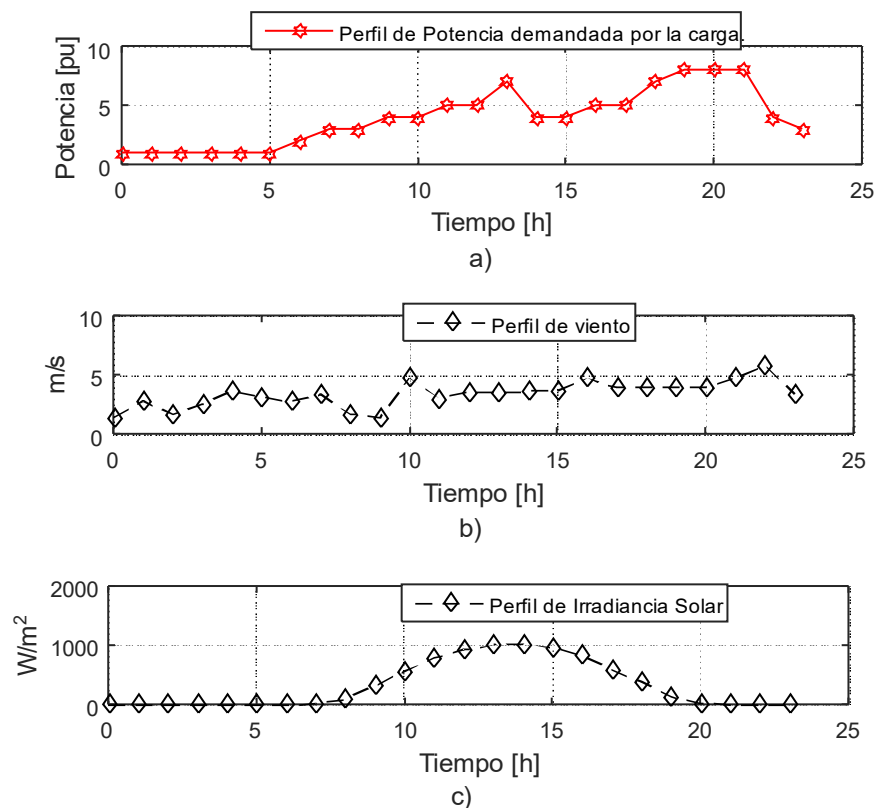


Figura 4.3. Curvas pronosticadas; a) demanda de potencia activa, b) irradiación solar y c) velocidad de viento.

La Fig. 4.4 muestra la potencia activa proporcionada por la batería, aerogenerador, módulo fotovoltaico y la importada desde la red principal a través del PAC. Se observa que un mayor porcentaje de la curva de demanda (ver Fig. 4.3.a) se abastece de la red principal. Se observa además que el panel fotovoltaico tiene su mayor aportación de energía entre las 10:00 y 18:00 hrs, lo cual coincide con el periodo de mayor irradiación (ver Fig. 4.2.b). Es claro que la potencia proporcionada por el aerogenerador tiene una tendencia similar a la curva de velocidad de viento mostrada en la Fig. 4.3.c. La batería experimenta periodos de

carga ($P_{Bn}^t < 0$) y descarga ($P_{Bn}^t > 0$). En particular, se observa que en los periodos donde existe mayor generación eólica (p.e. en las hrs. 4, 10 y 22) la batería se encuentra en proceso de carga ($P_{Bn}^t < 0$). Esta energía es útil para reducir el costo de la energía en horas de demanda pico (p.e. en la hora 13 y 20). Lo anterior coincide con el SOC resultante e ilustrado en la Fig. 4.5, además se ve que en la ultima hora la batería se descarga hasta su límite inferior, supliendo junto con el aerogenerador toda la potencia de la carga en esa hora.

La Fig. 4.6 ilustra el costo total (\$/hr) para el abastecimiento de la demanda de potencia activa de la micro-red con y sin generación distribuida y almacenamiento. En esta figura se observa que el costo de la energía varía en función de la potencia importada de red principal ya que es la de única que tiene costo, pero la aportación de energía de los generadores distribuidos de la micro-red reduce el costo de la energía total consumida por la carga, si estas no fueran tomadas en cuenta el costo se elevaría sobre todo en las horas pico del día, la comparación en esta figura ilustra lo anteriormente dicho y muestra que alrededor de la hora 20 se produce el mayor pico de demanda. Estos resultados claramente revelan el beneficio económico generado por los elementos de generación distribuida y almacenamiento.

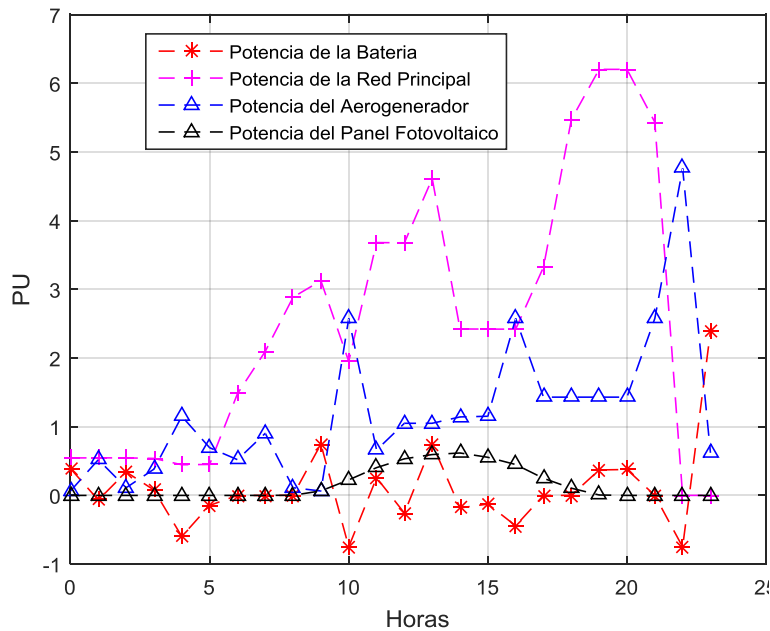


Figura 4.4. Curvas de generación de la micro-red

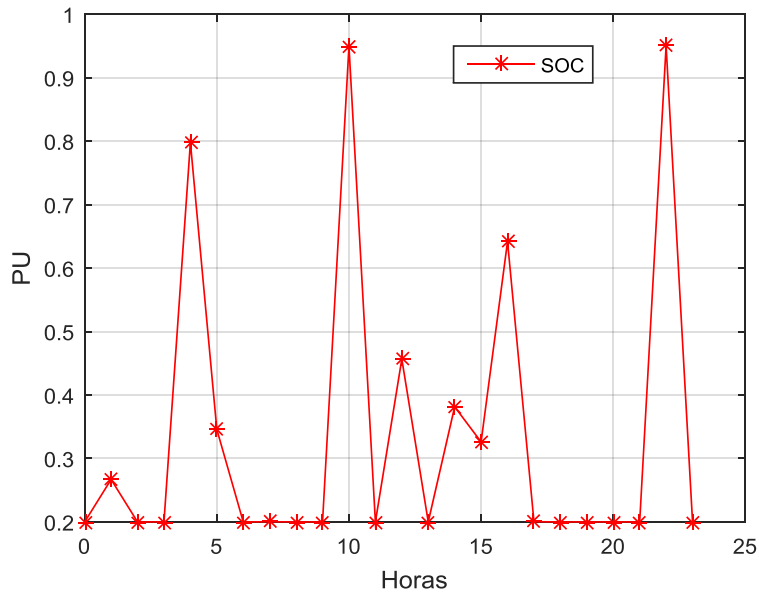


Figura 4.5. Estado de carga de la batería (SOC).

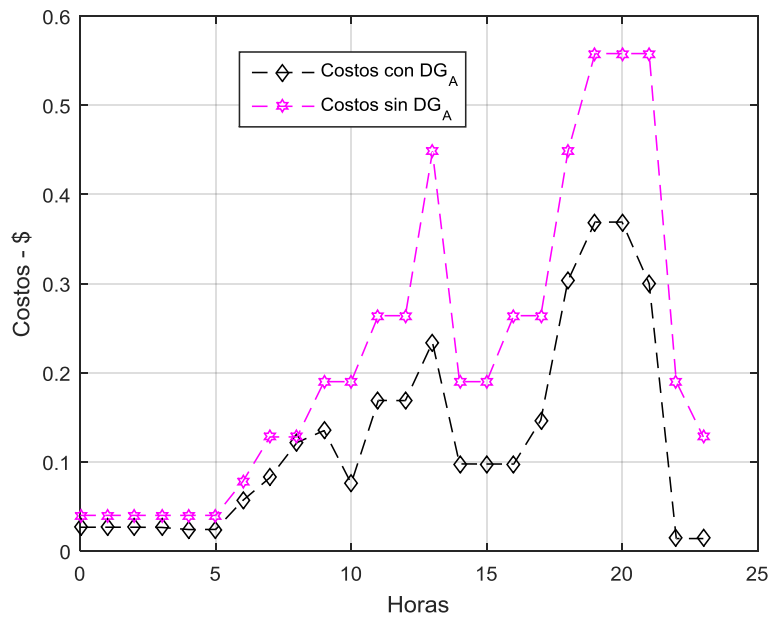


Figura 4.6. Comparación de Costo de la energía importada desde la red principal

4.4 Caso de estudio 2

En este caso de estudio se considera la micro-red de prueba MRP2, la cual contempla un pequeño parque vehicular compuesto de 3 vehículos eléctricos. Las curvas pronosticadas de irradiación solar y velocidad de viento corresponden a las mostradas en las figuras. 4.3.b y c. Sin embargo, la curva de demanda considerada es la mostrada ahora en la Fig. 4.7. En referencia al sistema en p.u., la potencia y voltaje base del sistema fueron seleccionados como 100kW y 100V, respectivamente. Los límites de las magnitudes de voltaje para todos los nodos en CA de la micro-red son $0.95 \leq V \leq 1.05$ pu. Los límites del SOC de la batería son $0.2 \leq SOC_B(t_z) \leq 0.95$ (en %), mientras que el estado inicial de carga es considerado como $SOC_B(t_0) = 0.9$ (en %). Además, se asume que los 3 vehículos que conforman el parque vehicular se conectan a la micro-red a las 8hrs. con una carga inicial indicada en la Tabla 4.1 y se desconectan a las 18hrs. También se asume que, durante dicho periodo, los propietarios de los vehículos cumplen un contrato con el operador de la micro-red para que las baterías de sus vehículos sean utilizadas como dispositivos de almacenamiento para mejorar aún más la optimización de la energía: a cambio, al final del periodo (a las 18:00hrs.) sus vehículos deberán tener una carga del 100%, es decir, $SOC_{PVH}(t_{end}) = 1.0$. Los límites del SOC de las baterías de los vehículos eléctricos son $0.2 \leq SOC_{PVH}(t_z) \leq 1$ (en %). Similar al caso de estudio anterior, el análisis FOP. fue realizado utilizando el método de punto interior proporcionado por la función *fmincon*. Los resultados obtenidos se muestran y discuten a continuación. Los resultados obtenidos utilizando el método de búsqueda directa y el algoritmo genético se discuten en secciones posteriores.

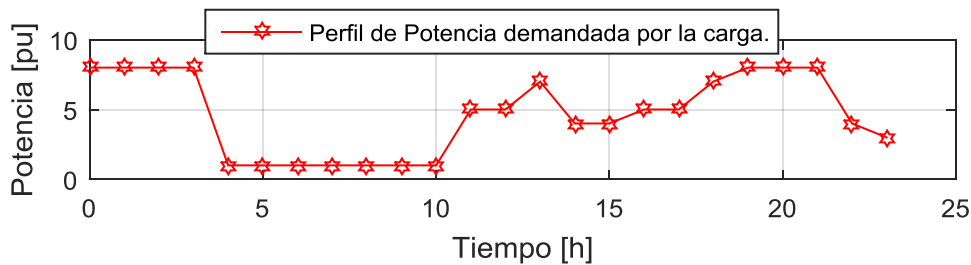


Figura 4.7. Curva de demanda pronosticada para caso de estudio 2

Tabla 4.1. Estado inicial de carga de vehículos

No. Vehículo	SOC inicial %
1	0.50
2	0.40
3	0.30

La Fig. 4.8 muestra la potencia activa proporcionada por la batería, parque vehicular, aerogenerador, sistema fotovoltaico y la importada desde la red principal. Se observa en las

etapas 0 a 4 hrs. y 18 a 23 hrs. es donde tenemos los mayores picos de demanda, en estos horarios es donde el banco de batería entra a funcionar para reducir esos picos, claramente el sistema fotovoltaico aerogenerador, batería y parque vehicular eléctrico no son capaces de satisfacer la demanda de potencia en la carga, por tal motivo, la potencia se importa de la red principal para todo los intervalos de tiempo pero los elementos logran reducir la energía que proviene de la red reduciendo el costo. Se observa además que el sistema fotovoltaico tiene su mayor aportación de energía entre las 10:00 y 18:00 hrs, lo cual coincide con el periodo de mayor irradiación. Es claro que la potencia proporcionada por el aerogenerador tiene una tendencia similar a la curva de velocidad de viento mostrada en la Fig. 4.3.b).

Tanto la batería como el parque vehicular eléctrico experimentan periodos de carga ($P_{Bnj}^{tz} < 0, P_{pevcarga j}^{tz} < 0$) y descarga ($P_{Bnj}^{tz} > 0, P_{pevdescarga j}^{tz} > 0$). El parque vehicular eléctrico muestra su periodo de trabajo entre las 8 y 18 hrs. En particular, se observa que en los periodos donde existe mayor generación eólica y solar (p.e. en las hrs. 14 y 18) la batería y el parque vehicular eléctrico se encuentran en proceso de carga ($P_{Bnj}^{tz} < 0, P_{pevcarga j}^{tz} < 0$). Esta energía es útil para reducir el costo de la energía en horas de demanda pico (p.e. entre las hrs. 11-13 con el parque vehicular y de 18-21 hrs. únicamente con la batería). Lo anterior coincide con el estado de carga (*SOC*) resultante e ilustrado en la Fig. 4.9 donde se muestra la carga de la batería y 3 vehículos que conforman el parque vehicular cada uno con 100%=70 KWH de carga lo que es suficiente para un desplazamiento de 400 Km en un automóvil Nissan Leaf [37].

La Fig. 4.10 ilustra el costo (\$/hr) de la energía total importada sin incluir la generación distribuida de la micro-red comparada con la importada de la red principal incluyendo la generación distribuida. Se observa que la curva de costo tiene sus mayores valores alrededor de las 0 - 4 y 18 - 23 hrs., que es donde ocurren los mayores niveles de demanda. Los resultados muestran el beneficio económico que se obtiene por los elementos de generación distribuida, almacenamiento y parque vehicular.

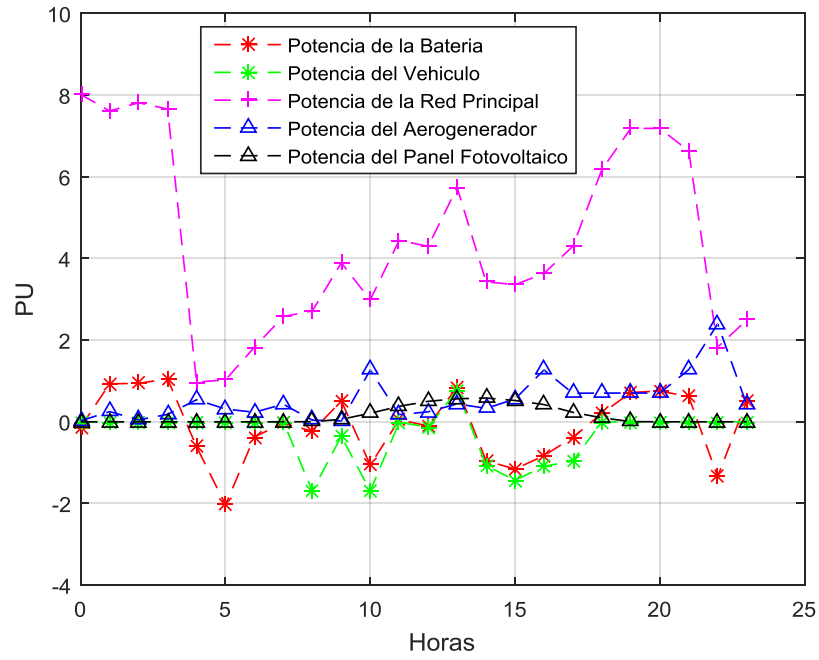


Figura 4.8. Curvas de generación de la micro-red

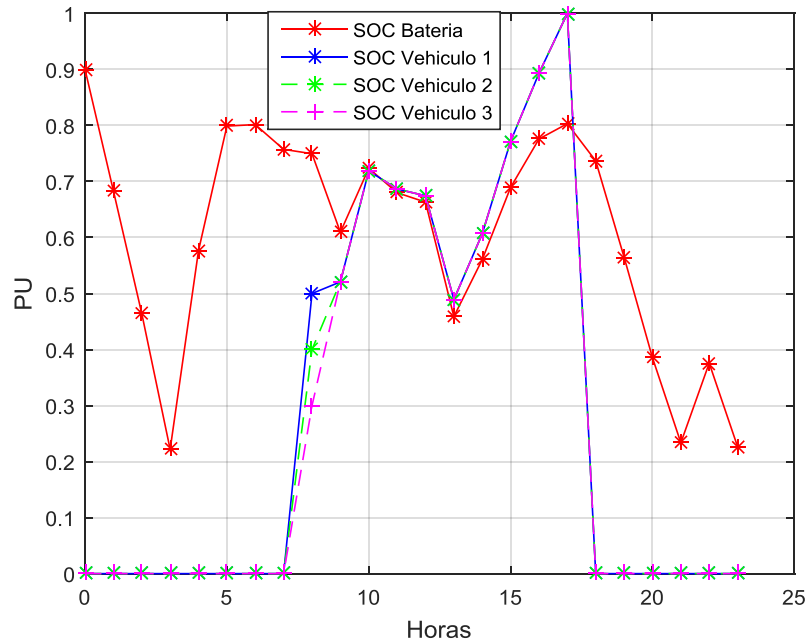


Figura 4.9. Estado de carga en la batería (SOC%) y Estado de vehículos (SOC%)

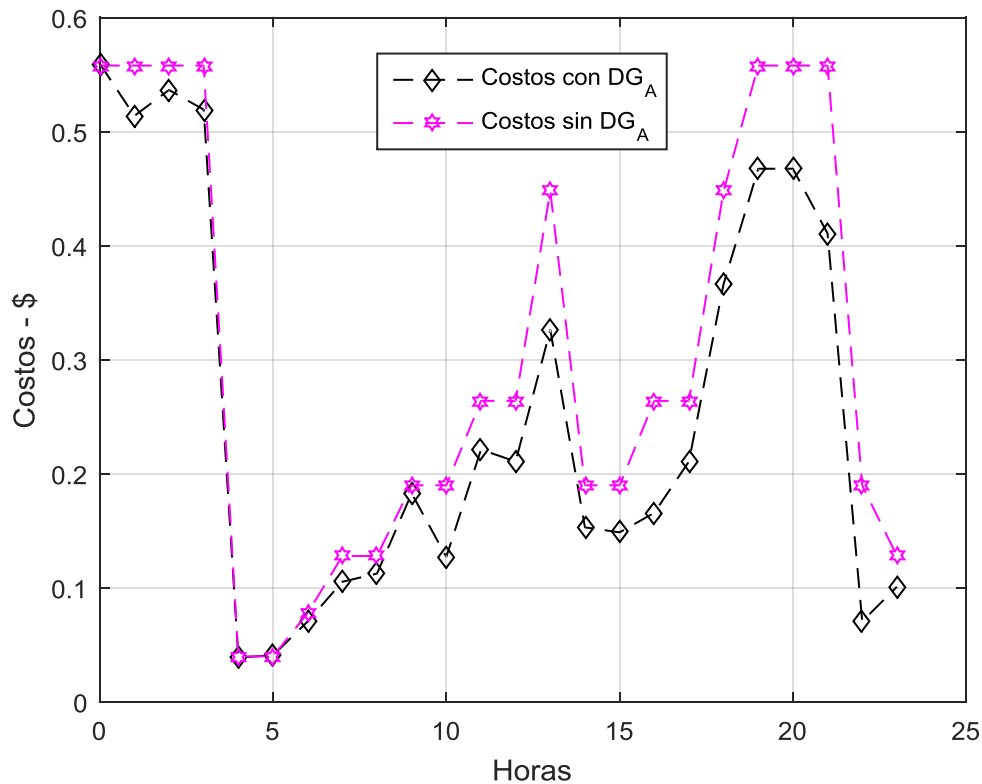


Figura 4.10. Costo de la energía importada desde la red principal con DG_A y sin DG_A

4.5 Análisis de desempeño computacional

En esta sección se presenta un análisis del desempeño computacional de los diferentes métodos utilizados para resolver el modelo de optimización (2.27)-(2.30). En particular, se hace énfasis en los métodos meta-heurísticos; método de búsqueda directa y algoritmos genéticos. Para el caso del método de punto interior (función *fmincon*), únicamente se presenta el tiempo CPU requerido para la ejecución completa del análisis de FOP. Se considera la micro-red de prueba MRP1 bajo las condiciones de simulación indicadas en el primer párrafo de la Sección 4.1 (Caso de estudio 1).

De acuerdo a lo anterior, para llevar a cabo el análisis del desempeño computacional de los métodos meta-heurísticos, se han contemplado los siguientes aspectos,

- Se ha repetido múltiples veces la ejecución de la simulación y se ha calculado la media aritmética y la desviación típica de los resultados obtenidos.
- Se ha evaluado el efecto de la modificación de los parámetros más importantes en el desempeño de los métodos meta-heurísticos. Los parámetros se ajustan individualmente, excepto cuando la interacción entre dos o más de ellos es conocida de antemano (parámetros dependientes), en cuyo caso se ha probado todas las combinaciones entre los mismos.

- c. Los parámetros relativos al número de iteraciones/generaciones y, en su caso, el tamaño de la población, se han tratado de modo distinto para ver su efecto en el resto de los parámetros.
- d. En el caso de las herramientas que requieren un punto inicial para realizar la optimización, en cada uno de los ciclos de ejecución se ha fijado un punto inicial al que se calculó con un despacho económico inicial es el mismo para la evaluación de todas las configuraciones.

4.5.1 Método de punto interior (función *fmincon*)

Debido a que este es un método determinístico su desempeño depende principalmente de la condición inicial dada para un problema dado. Sin embargo, es de recordar que la condición inicial para el problema de FOP. para control terciario de micro-redes está muy bien definido, así que su modificación arbitraria carece de sentido práctico. Sin embargo, es posible determinar el tiempo de CPU requerido para la ejecución completa del análisis FOP. y el valor de la función objetivo (“fitness”) asociado. Éstos servirán como referencia para fines de comparación con los asociados a los métodos meta-heurísticos. En este caso, en la convergencia, la solución proporcionada por el método de punto interior se asocia a un fitness de aproximadamente \$3 unidades monetarias, mientras que el tiempo de cómputo es de aproximadamente 3630s. Podemos observar que el tiempo de cómputo requerido por el método de punto interior es aparentemente elevado. Sin embargo, este no es un aspecto que se pueda adjudicar a dicho método, se debe principalmente al uso de la función *fmincon*. En este trabajo no se proporcionan las expresiones matemáticas del vector gradiente y matriz hessiana a la función *fmincon*. Por lo tanto, dicha función utiliza algoritmos de diferencias finitas para el cálculo de dicho vector y matriz, requiriendo de esta manera de un mayor esfuerzo y tiempo de cómputo. En este sentido, proporcionar las expresiones matemáticas del vector gradiente y matriz hessiana podría reducir drásticamente el tiempo de cómputo reportado. Además, se debe recordar que se ha utilizado una computadora convencional de características ordinarias.

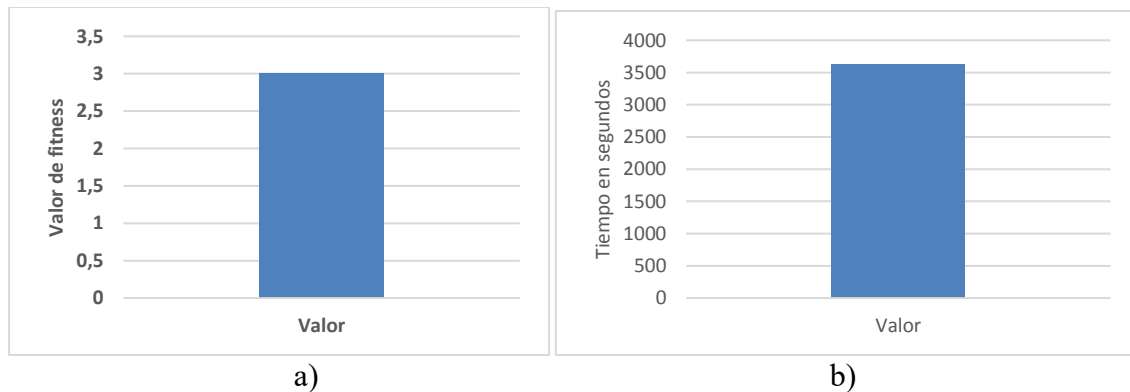


Figura 4.11. Análisis FOP. con el método de PI; a) valor de fitness y b) tiempo de ejecución

4.5.2 Método búsqueda directa (función *Patternsearch*)

El análisis FOP, utilizando este método proporcionó los siguientes resultados. Se puede observar en la Fig. 4.12 a) que utilizando el método de orden de sondeo en malla de forma consecutiva (*PollingOrder 'Consecutive'*) se obtienen mejores resultados en el valor de fitness, la Fig. 4.12 b) muestra que en tiempo de ejecución, utilizando el método de orden de sondeo en malla de forma aleatoria (*PollingOrder 'Random'*) se obtiene una ejecución en menos tiempo con respecto a las otras opciones, por lo cual en este caso se recomienda utilizar el método aleatorio para reducir el tiempo de ejecución. En las figuras 4.13 a) y b) se muestra el efecto de los diferentes algoritmos para creación de la malla de búsqueda invocada por la función (*Pollmethod*), hay dos algoritmos para esta tarea, el algoritmo generalizado de patrones de búsqueda (GPS) y el algoritmo de malla adaptiva de búsqueda directa (MADS) el que más se adapta a nuestro problema es el algoritmo de malla adaptiva de búsqueda directa. Este algoritmo tiene dos variantes; base positiva $2N$ (*MADSPositiveBasis2N*) y el de base positiva $N+1$ (*MADSPositiveBasisNp1*). Utilizando el algoritmo de malla adaptiva de búsqueda directa con base positiva $N+1$ se obtienen los mejores resultados tanto para valores de fitness como en tiempo de ejecución, por tal razón utilizaremos este algoritmo de creación de malla para la resolución de la optimización. Para la hibridación el método de búsqueda directa el cual se invoca por la función *Patternsearch* no acepta directamente la opción de hibridación, pero del punto mínimo que el método calcula se puede partir a realizar una optimización más refinada con el método de punto interior invocado por la función *fmincon*. Los resultados se pueden observar en la Fig. 4.14 a). Los valores de fitness son mucho mejores con la hibridación, aunque la hibridación tiene un costo en tiempo.

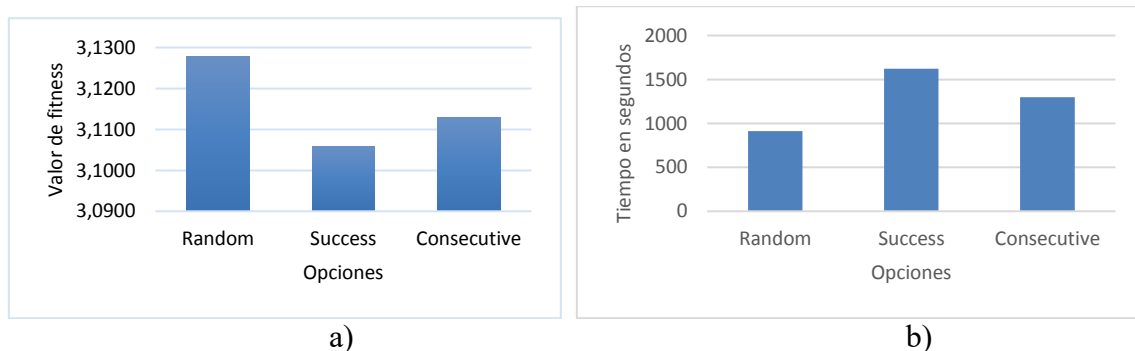


Figura 4.12. Efecto del método de orden de sondeo en malla (*Pollingorder*); a) valor de fitness y b) tiempo de ejecución

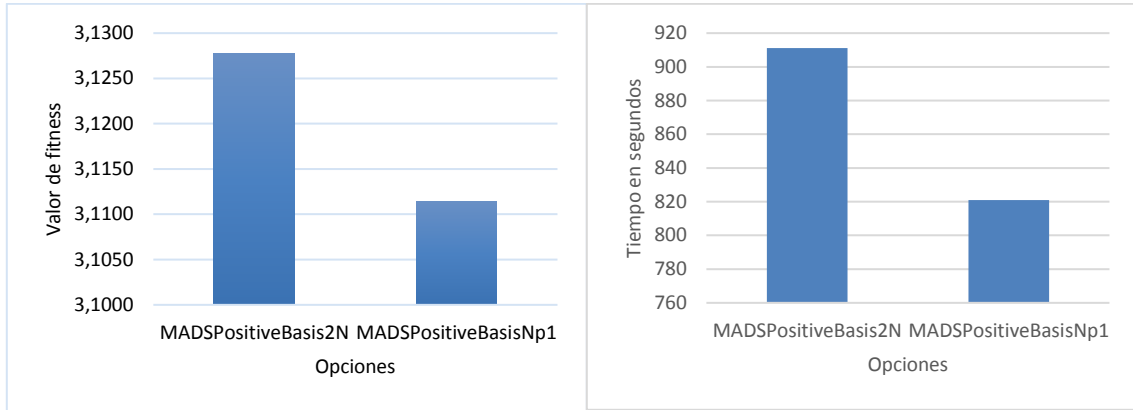


Figura 4.13. Efecto del algoritmo de creación de malla (*PollMethod*); a) valor de fitness y b). tiempo de ejecución

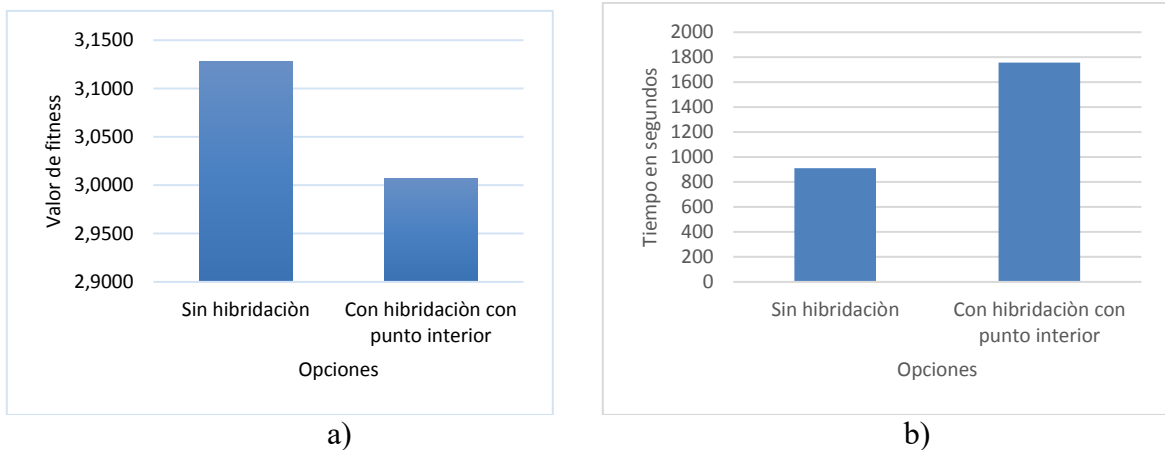


Figura 4.14. Efecto de la opción hibridación por método de punto interior; a) valor de fitness y b) el tiempo de ejecución

4.5.3 Método de algoritmo genético (función *ga*)

En relación a la aplicación del algoritmo genético se tienen los siguientes resultados. En este caso se realizan diversas simulaciones para verificar el impacto asociado a la modificación de diferentes parámetros del método. Al modificar el tamaño de la población por medio del parámetro (*PopulationSize*) como se observa en la Fig. 4.15 a), se observa que por lo general al aumentar el tamaño de la población se obtiene un mejor resultado en el valor de fitness. Sin embargo, también vemos en la Fig. 4.15 b) que en el tiempo de ejecución tendrá un incremento a medida que se incremente el tamaño de la población. De acuerdo a estos resultados, se fijará el tamaño de población en 25 para tener un equilibrio entre tiempo y mejor valor de fitness.

Por otro lado, las figuras. 4.16 a) y b) muestran el efecto del método de selección de padres (*SelectionFcn*) utilizado para la reproducción de las próximas generaciones. Para

nuestro problema se adaptan el método de selección por torneo (*selectiontournament*) y el método de selección uniforme (*selectionuniform*). Se observa que los mejores valores de fitness y tiempo de ejecución se asocian al método de selección por torneo. En la Fig. 4.17 a) se evalúan los métodos de cruce de padres para la formación de las próximas generaciones por medio de la función (*CrossoverFcn*) en la cual evaluamos los métodos de cruce aritmético (*crossoverarithmetic*), cruce disperso (*crossoverscatterd*) y cruce heurístico (*crossoverheuristic*). Se observa que el mejor resultado en valor de fitness lo proporciona el método de cruce disperso y en la Fig. 4.17 b) se observa que el menor tiempo de ejecución corresponde al método de cruce heurístico. Con el fin de mejorar el tiempo de ejecución usaremos el método de cruce heurístico.

Por último, se muestra la evaluación de los métodos de escalamiento de fitness (*FitnessscalingFCN*). En este caso evaluamos los siguientes métodos escalamiento proporcional (*fitscalingprop*); escalamiento Top de los mejores individuos (*fitscalingtop*) y el método de escalamiento por rango (*fitscalingrank*). Las figuras. 4.18 a) y b) muestran los valores del fitness y tiempo de computo a los diferentes métodos de escalamiento. El método de escalamiento que proporciona los mejores resultados en valores de fitness y tiempo de ejecución es el método de escalamiento proporcional, por lo cual utilizaremos esta opción para la optimización. En las figuras. 4.19 a) y b) se muestra la evaluación del método de hibridación invocando la función (*HybridFCN*) que tiene dos opciones el método de búsqueda directa (*Patternsearch*) y el método de punto interior (*fmincon*), de los cuales se muestra que el método de punto interior obtiene un mucho mejor resultado tanto para el valor de fitness como en el tiempo de ejecución por lo cual el método de hibridación que utilizaremos será el método de punto interior.

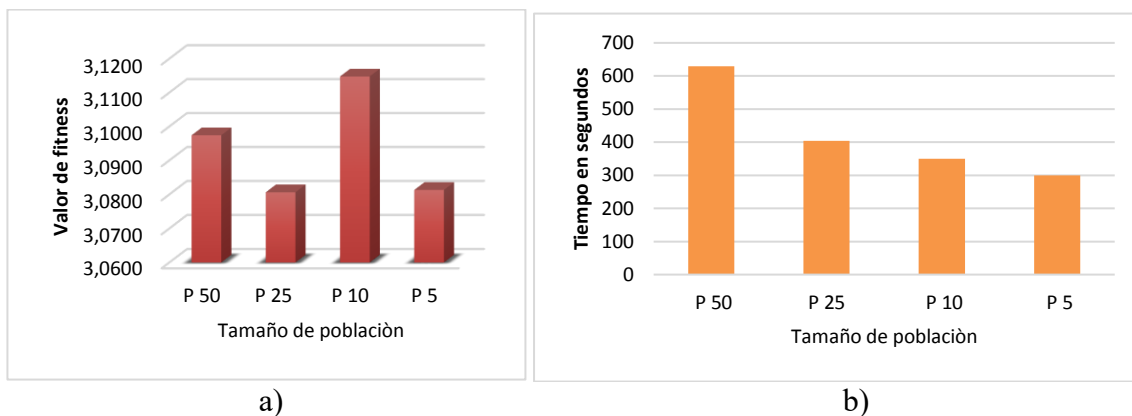
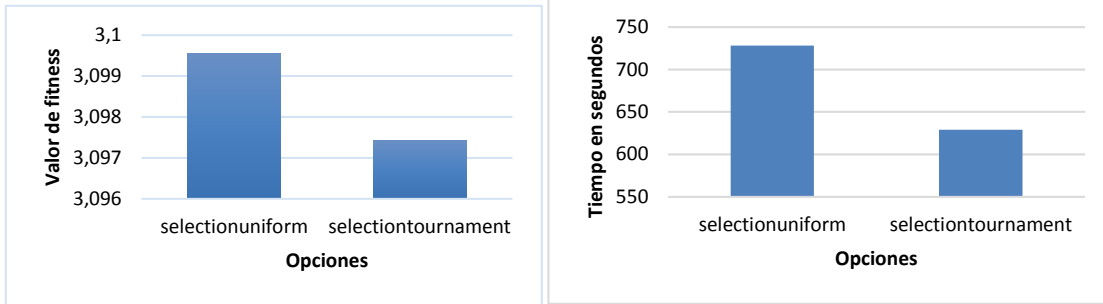
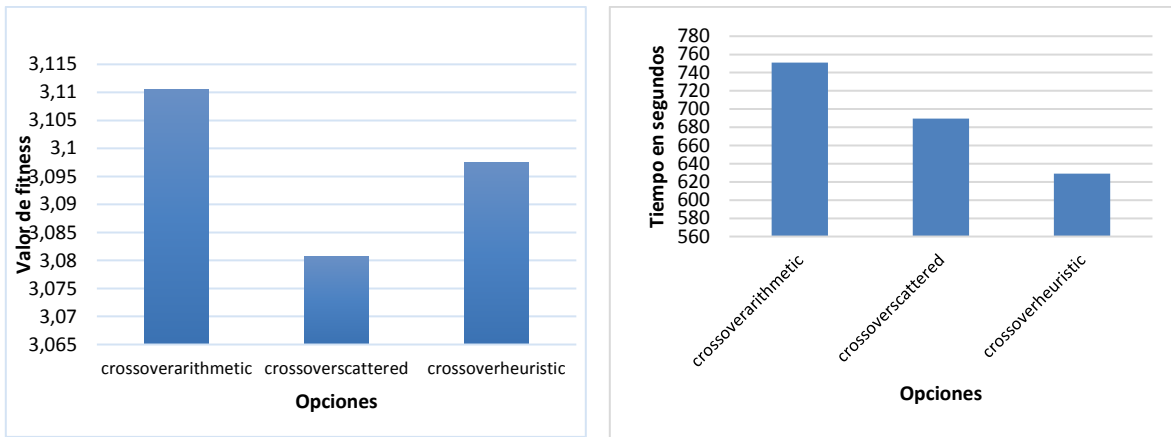


Figura 4.15. Efecto del tamaño de población; a) valor de fitness y b) tiempo de ejecución



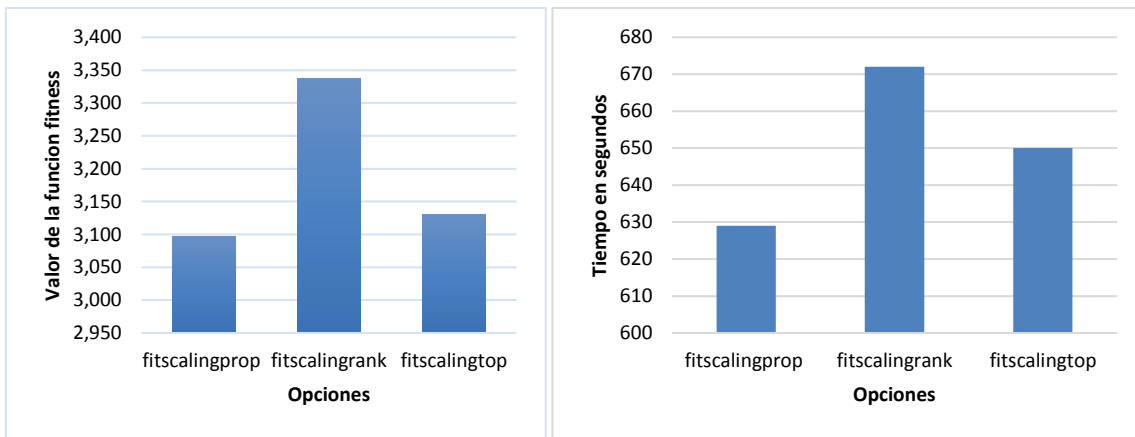
a) b)

Figura 4.16. Efecto método de selección de padres (*SelectionFCN*); a) valor de fitness y b) tiempo de ejecución



a) b)

Figura 4.17. Efecto de método de cruce de padres (*CrossoverFCN*); a) valor de fitness y b) tiempo de ejecución



a) b)

Figura 4.18. Efecto de método de escalamiento de fitness (*FitnessscalingFCN*); a) valor de fitness y b) tiempo de ejecución.

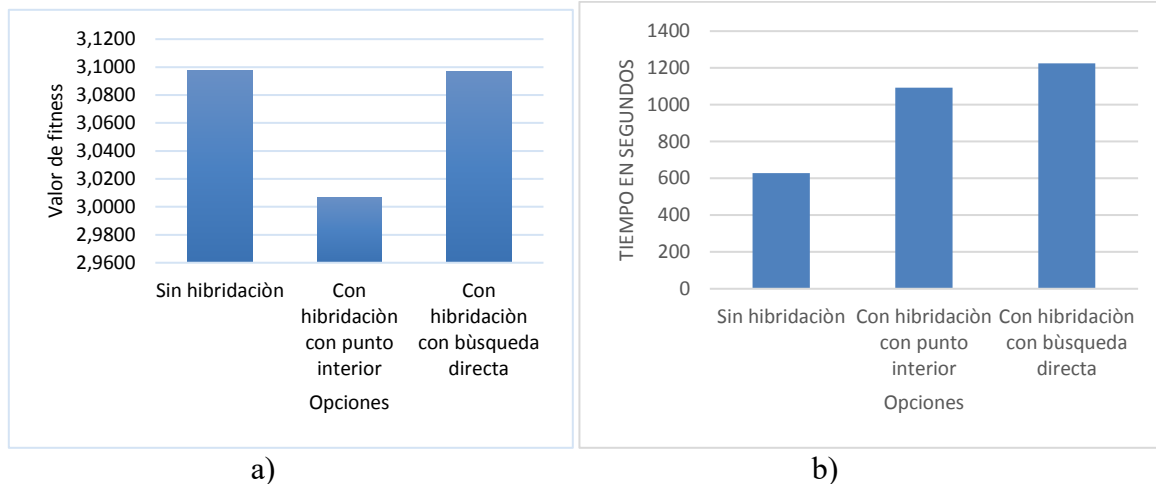


Figura 4.19. Efecto de método de hibridación (*HybridFCN*); a) valor de fitness y b) tiempo de ejecución.

4.5.4 Comparación de desempeño entre los diferentes métodos

En referencia al valor del fitness, se puede observar en la Fig. 4.20 los tres métodos que obtienen una solución con un mejor valor de fitness son el método de punto interior (función *fmincon*), el de algoritmos genéticos (función *ga*) híbrido con el método de punto interior y el método de búsqueda directa (función *patternsearch*) híbrido con el método de punto interior. Por otro lado, la Fig. 4.21 se observa que en cuestión de tiempo el método que reduce mucho más el tiempo de ejecución del programa es el algoritmo genético híbrido con el método de punto interior, por lo cual es el que presenta mejores resultados en cuanto a tiempo de cómputo y valor del fitness. A partir de este análisis es posible concluir que los tres métodos anteriores se pueden considerar como métodos efectivos para realizar el análisis de FOP. para el control terciario de micro-redes, es importante destacar que el método de algoritmo genético puede resolver funciones de costo no continuas esto es importante ya que podría evaluar funciones de fitness que tienen diferentes comportamientos entre el día y la noche.

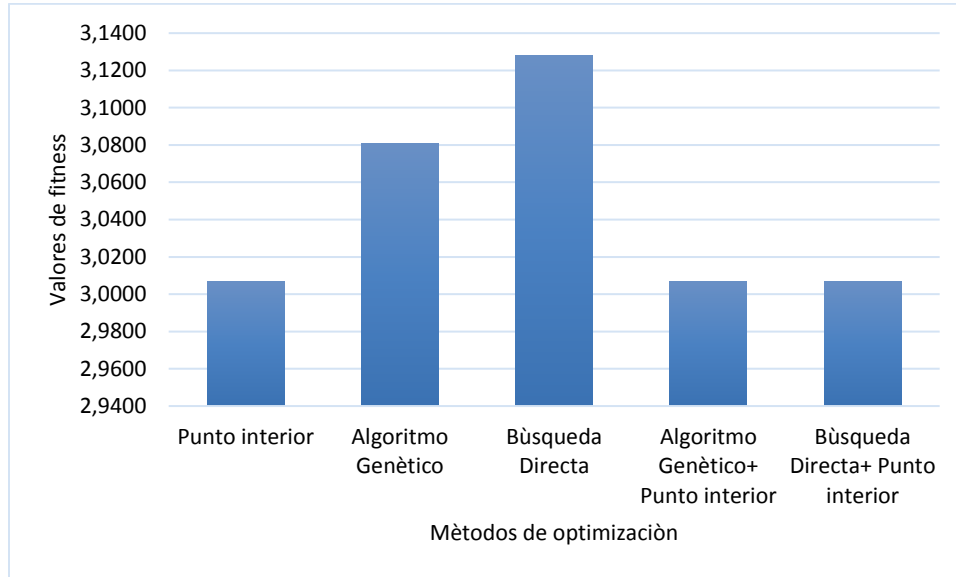


Figura 4.20. Comparación de los diferentes métodos de optimización en el valor de fitness

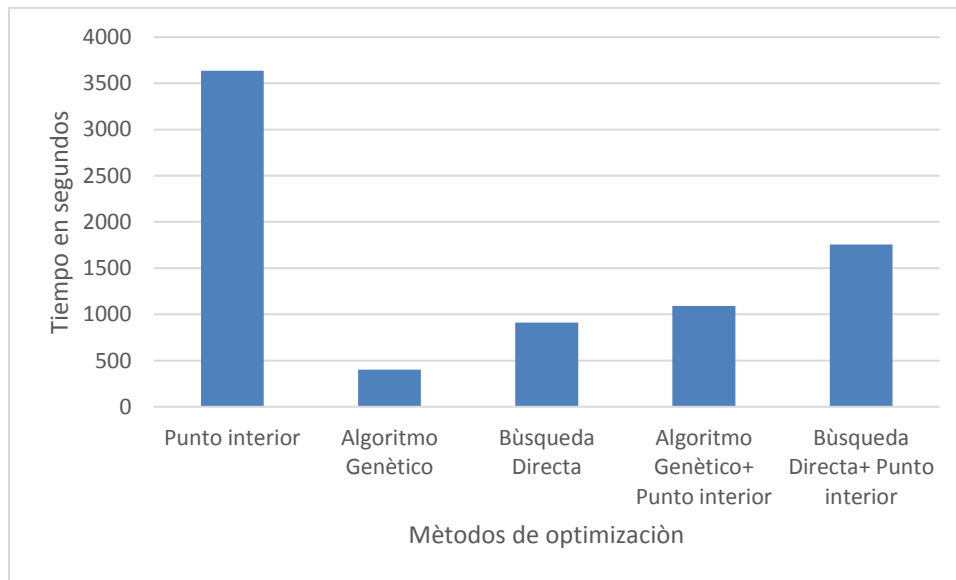


Figura 4.21. Comparación de los diferentes métodos de optimización en el tiempo de ejecución

Por lo anterior, las configuraciones que se recomienda utilizar para los métodos meta-heurísticos son las siguientes:

- Algoritmo genético (*función ga*): La opción 'Populationsize' en 25, 'SelectionFcn' en selectiontournament, 'CrossoverFcn' en crossoverheuristic, 'FitnessScalingFcn', en fitscalprop.
- Búsqueda directa (*función patternsearch*): La opción 'Pollingorder' en Consecutive, 'Pollmethod' en MADSPositiveBasisNp1, las demás opciones se utilizaron en su valor por defecto.

- Algoritmo genético (*función ga*) híbrido con punto interior: La opción 'Populationsize' en 25, 'SelectionFcn' en selectiontournament, 'CrossoverFcn' en crossoverheuristic, 'FitnessScalingFcn', en fitscalingprop, 'HybridFcn' en {fmincon, options}.
- Búsqueda directa (*función patternsearch*) híbrido con punto interior: La opción 'Pollingorder' en Consecutive, 'Pollmethod' en MADSPositiveBasisNp1. Dado que esta herramienta no tiene la opción de 'HybridFcn', se utilizó como condición inicial la solución proporcionada por el método para ejecutar el método de punto interior por medio de la función *fmincon*.

Se hace énfasis en que los métodos que resultaron más efectivos para realizar el análisis de FOP. para control terciario de micro-redes son método de punto interior, algoritmo genético híbrido con punto interior y búsqueda directa híbrida con punto interior.

4.6 Micro-red CIESOL

En esta sección se realiza la aplicación de los tres métodos más efectivos de optimización; el método de punto interior, algoritmo genético híbrido con el método de punto interior y búsqueda directa híbrido con el método de punto interior. Para lo anterior, se realiza una adaptación de la micro-red MRP1 dada en al Fig. 4.1, para considerar los parámetros del sistema fotovoltaico del **Centro de Investigación en Energía Solar CIESOL** (ver Apéndice B.1 y B.2). Así mismo, se consideró el perfil de carga del laboratorio 6 de CIESOL que se muestra en el apéndice C.1, se utilizaron perfiles de irradiación solar para diferentes condiciones climatológicas y un perfil promedio de velocidad de viento. Estos datos de irradiación solar y velocidad de viento corresponden a la ciudad de Almería España y se proporcionan en el apéndice C.2.



Figura 4.22. Micro-red de estudio CIESOL

Se realiza la evaluación para los días de irradiación solar de invierno despejado, invierno nublado, verano despejado y verano nublado. Los resultados obtenidos de los costos

de abastecimiento de la demanda resultaron idénticos para los tres métodos de optimización, como se puede corroborar en las figuras 4.23 a) – 4.23 d).

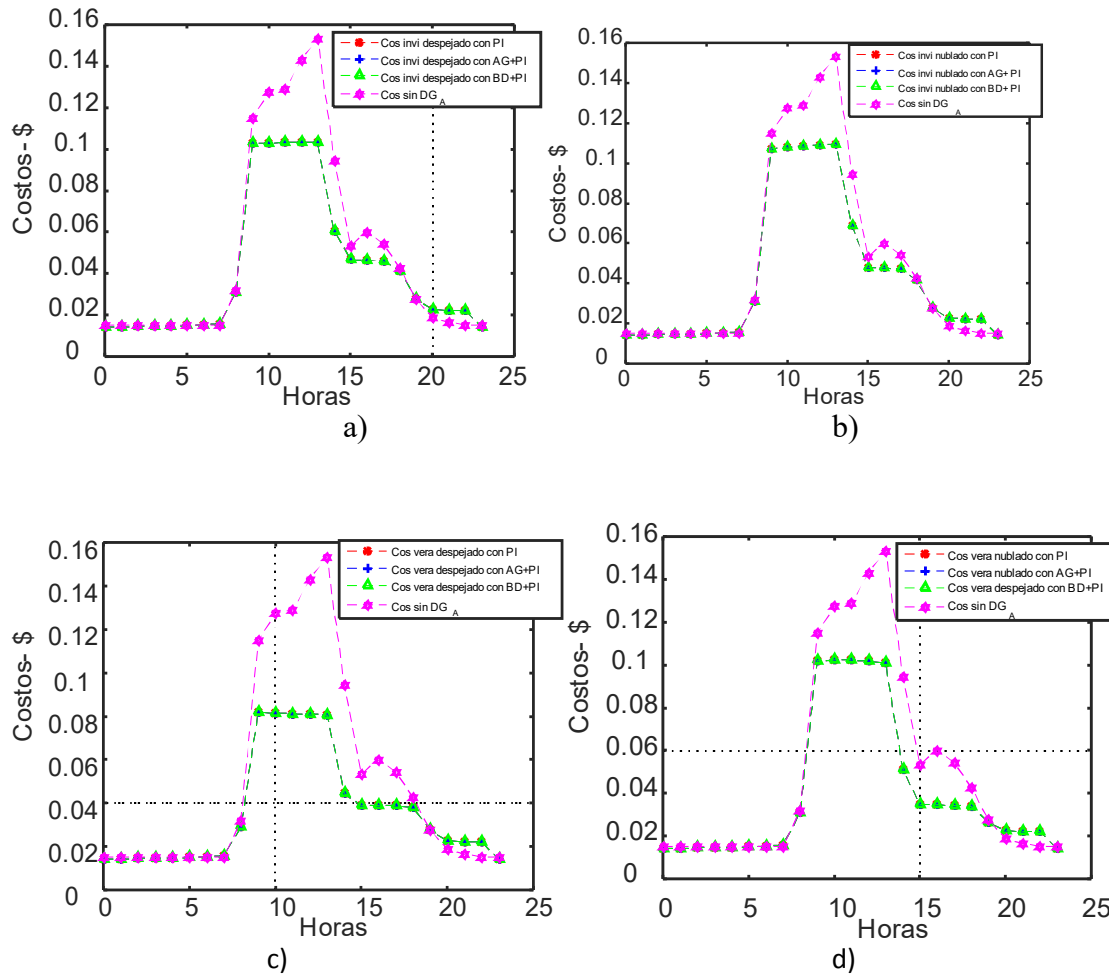


Figura 4.23. Costos optimizados por Método de PI, AG+PI, BU+PI; a) Día de invierno despejado, b) Día de invierno nublado, c) Día de verano despejado y d) Día de verano nublado

En la Fig. 4.24 se muestra los tiempos de ejecución utilizados por los métodos de optimización en las diferentes condiciones de irradiación solar. Se observa que el método más rápido para resolver el problema de optimización es el método de algoritmo genético híbrido con el método de punto interior, el método de punto interior siempre requiere del mayor tiempo de cómputo.

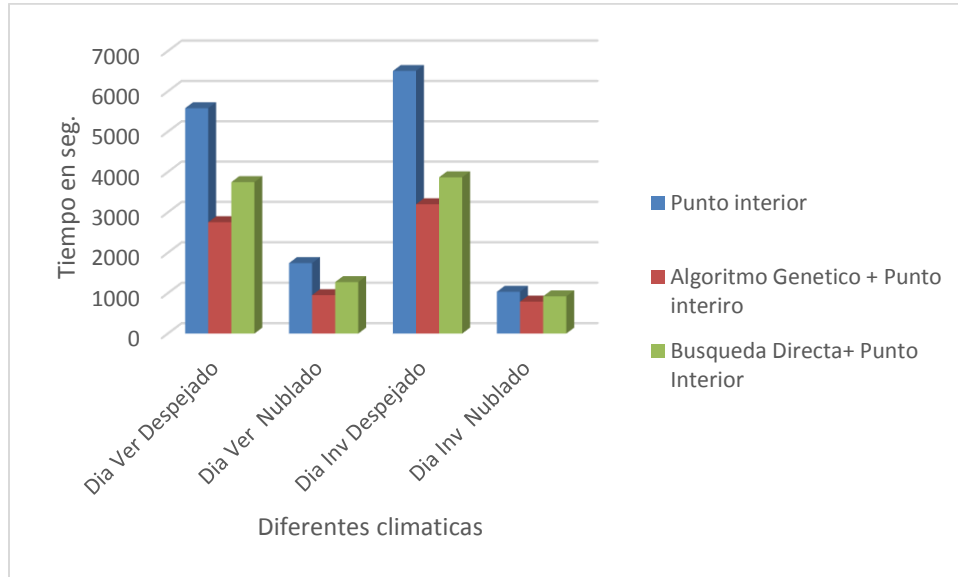


Figura 4.24. Tiempos de ejecución para métodos de optimización con diferentes curvas de irradiación solar

En esta parte de la sección nos enfocaremos en el análisis de resultados del despacho energético de la micro-red. Se observa en la Fig. 4.25 a) el comportamiento de potencia de carga y descarga del banco de batería y en la Fig. 4.25 b) se muestra el porcentaje o SOC de carga y descarga de la batería. De donde se observa que el mayor aprovechamiento para cargar la batería se realiza en las horas donde mayor producción de energía tienen el sistema fotovoltaico y aerogenerador. Además, corresponde con el día con mayor producción de energía por parte del sistema fotovoltaico.

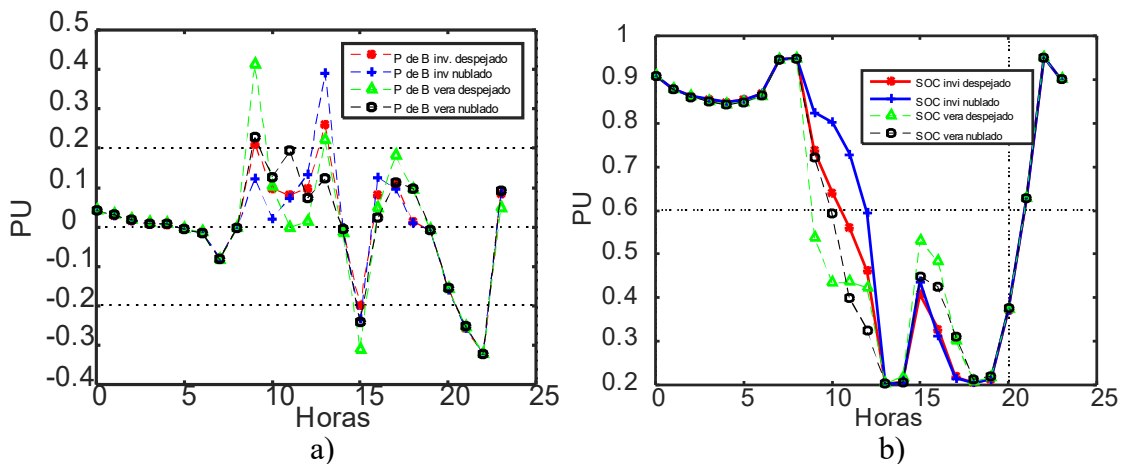


Figura 4.25. Comportamiento de batería; a) potencia de carga y descarga batería y b) SOC de carga y descarga de batería

En la Fig. 4.26 a). se muestra la potencia importada de la red para los diferentes perfiles de irradiación solar. Se puede ver que el día de menor aportación de la red es el día de verano despejado y el día que mayor aportación es el día de invierno nublado. Lo anterior

resulta lógico, puesto que son los días de mayor y menor aportación del sistema fotovoltaico, lo que permite compensar la energía despachada. En la Fig. 4.26.b se muestra la potencia generada por el aerogenerador, para este caso por simplicidad se ha considerado el mismo perfil promedio de viento para los diferentes épocas y estaciones del año.

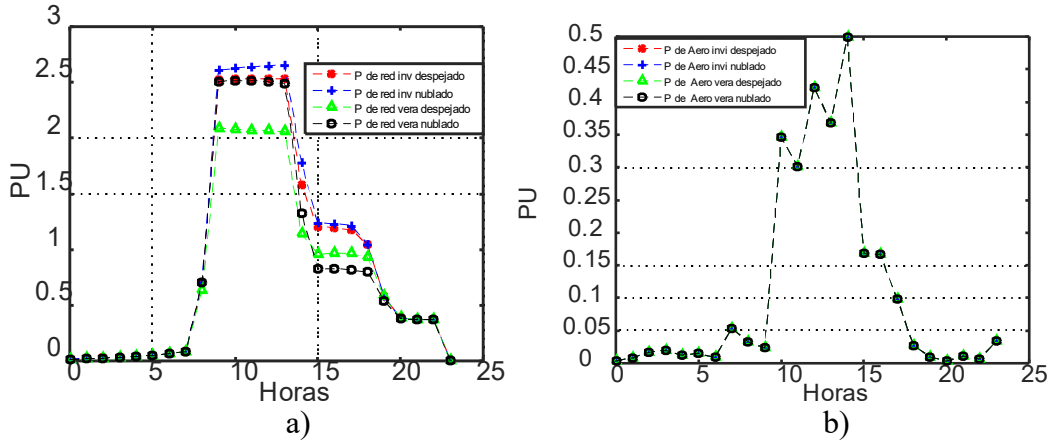


Figura 4.26. Potencia de red y aerogenerador; a) potencia de la red y b) potencia de aerogenerador

En la Fig. 4.27 a) se observa la potencia aportada por el sistema fotovoltaico de CIESOL a la carga de laboratorio 6 de este edificio, en las diferentes épocas del año. Se puede ver que el día de mayor irradiación solar el máximo de potencia aportada es de 8 KW el cual es un valor muy cercano a la potencia máxima del sistema fotovoltaico real, el cual es 9.2 KW. Lo cual afirma que el modelo fotovoltaico proporciona resultados realistas. En la Fig. 4.27 b) se muestra los diferentes perfiles de irradiación solar que concuerdan con los resultados de producción de energía fotovoltaica.

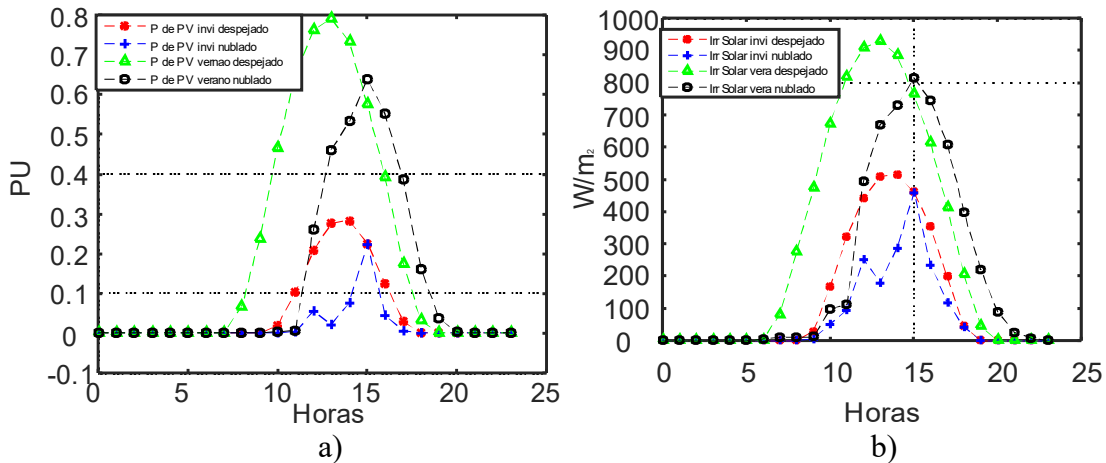


Figura 4.27. Comportamiento del sistema solar; a) potencia de sistema fotovoltaico CIESOL y b) Perfiles de irradiación solar de Almería

En la Fig. 4.28 a) se muestra la gráfica de costos de la energía importada de la red para los diferentes perfiles de irradiación solar comparada con el costo de la energía sin

generación distribuida. Es posible observar que el costo se incrementa; sobre todo en las horas de máximo consumo. En la Fig. 4.28 b) se observa el total de sumas de potencia generadas más pérdidas comparadas con la carga; es posible ver que se cumple el balance energético de la micro-red y por ende se reafirma que la implementación computacional proporciona la solución correcta.

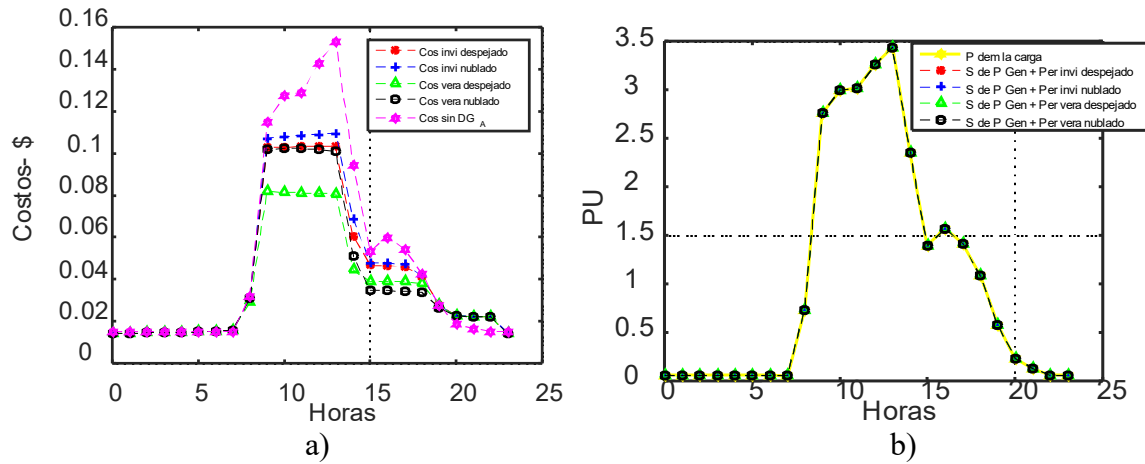


Figura 4.28. Comportamiento de la red en diferentes climaticas; a) costos de la red y b) Perfiles de demanda y sumas de potencias

Capítulo 5

5 Conclusiones y trabajos futuros

5.1 Conclusiones

En este trabajo se ha abordado la implementación computacional de algoritmos para el análisis de FOP. asociado al control terciario de micro-redes no autónomas. Para este fin, la determinación del manejo óptimo de la energía del control terciario se ha formulado como problema de despacho de un día en adelante. El modelo de optimización asociado se ha planteado a partir de considerar elementos de generación distribuida y elementos para almacenamiento de energía. Pero, además, diferente a los modelos tradicionales, el modelo de optimización planteado también contempla las restricciones que representan las ecuaciones de balance de potencia nodal. De esta manera, la solución del modelo brinda la posibilidad de determinar el manejo óptimo de la energía que minimiza el costo de abastecimiento de la demanda eléctrica y que, a la vez, garantiza satisfacer límites operativos de todos los elementos que componen la micro-red.

La implementación de los algoritmos se desarrolla en el entorno de programación proporcionada por Matlab[®]. Este objetivo se cumple implementando el modelo de optimización asociado al análisis FOP. de micro-redes en un enfoque de programación estructurada. El modelo implementado es entonces resuelto por medio de las herramientas de optimización proporcionados por el toolbox de optimización de Matlab[®]; método de punto interior, algoritmos genéticos y método de búsqueda directa. La implementación desarrollada tiene una gran flexibilidad para considerar los diferentes métodos de optimización proporcionados por Matlab[®], lo cual permitió obtener resultados con versiones híbridas del algoritmo genético y del método de búsqueda directa. En adición, la implementación estructurada desarrollada tiene un elevado grado de flexibilidad para incluir modelos de nuevos componentes. Es importante también aclarar que la implementación no está limitada para su aplicación particular a los casos de estudio abordados en este trabajo, es decir, micro-redes de distinta composición, tamaño y topología pueden ser analizadas directamente al simplemente proporcionar el archivo de datos apropiado.

La implementación computacional desarrollada fue aplicada a dos redes de prueba; MRP1 y MRP2, de lo cual se derivaron distintos casos de estudio. Los resultados obtenidos revelan la eficiencia y eficacia de dicha implementación. En particular, en cuanto a la eficiencia, se puede concluir que las herramientas de optimización de Matlab[®]; método de punto interior, algoritmo genético y búsqueda directa, presentan tiempos de cómputo considerablemente elevados. El método de punto interior es el que requiere de un mayor tiempo de cómputo. Sin embargo, en cuanto a la eficacia, se observa que dicho método proporciona una solución que produce el mejor fitness (valor de la función objetivo más

bajo). Es importante aclarar que, debido a su característica de búsqueda global, el algoritmo genético tiene la capacidad de proporcionar una solución que produce un mejor fitness en comparación al método de punto interior. Sin embargo, para lograr dicha solución requiere de una gran cantidad de generaciones y por ende de un excesivo tiempo de cómputo (en el orden de horas). Con la finalidad de lograr reducir los tiempos de cómputo y a la vez mantener la eficacia de la solución, se abordó una versión híbrida de algoritmo genético y método de búsqueda directa con el método de punto interior. Los resultados obtenidos muestran que los métodos híbridos obtienen la solución con una reducción importante de tiempo de CPU y con un fitness igual al proporcionado por el método de punto interior.

Como parte de los casos de estudio se contemplaron mediciones de irradiación, velocidad de viento y la curva de demanda del laboratorio 6 del Centro de Investigación en Energía Solar CIESOL de la Universidad de Almería. Los resultados obtenidos son prometedores, ya que estos son compatibles (aproximados) con las mediciones de generación y consumo de dicho laboratorio de CIESOL.

Por último, se concluye que el modelo planteado y los algoritmos desarrollados para el análisis de FOP de micro-redes permiten determinar una solución eficaz para el manejo óptimo de la energía. Sin embargo, los tiempos de cómputo asociados a las herramientas de optimización de Matlab® pueden ser mejorados. Además, en un contexto de control terciario, los algoritmos implementados tienen una gran flexibilidad que puede ser aprovechada para fines de investigación referente a prueba y desarrollo de modelos de componentes de micro-redes.

5.2 Trabajos futuros

El trabajo desarrollado proporciona elementos de apoyo para continuar desarrollando trabajos de investigación relacionados al control terciario de micro-redes. A este respecto, algunos aspectos particulares que merecen de atención adicional son los siguientes,

1. *Desarrollar y considerar modelos más detallados de componentes de la micro-red.* Es necesario considerar modelos de líneas y transformadores de transmisión con parámetros comerciales, diferente cantidad de fases y diferentes configuraciones de conexión. Esto con la finalidad de considerar las típicas condiciones de operación desbalanceada. Así mismo, considerar modelos más detallados de los elementos de almacenamiento de energía (incluyendo su envejecimiento debido a ciclos de carga y descarga), aerogeneradores, vehículos eléctricos, etc.
2. *Consideración de casos de estudio prácticos.* En ausencia de una micro-red física, es necesario realizar una investigación documental detallada para identificar al menos una micro-red que se encuentre en operación, a partir de la cual se puedan disponer parámetros y mediciones reales que permitan establecer casos de estudio prácticos. Esto con la finalidad de validar los resultados obtenidos para el manejo de la energía. Alternativamente, utilizar los módulos disponibles en el laboratorio para implementar físicamente una micro-red de prueba.

3. *Paralelización de algoritmos.* Tomando en cuenta que desde un punto de vista de operación práctica el análisis de despacho de un día en adelante se debe ejecutar cada 15 minutos, es de interés incrementar la velocidad de cómputo para el análisis de FOP. de micro-redes. En este sentido, la programación en paralelo se vuelve una vertiente de interés; en particular, para la paralelización de algoritmos meta-heurísticos.
4. *Implementación de algoritmos en unidades de procesamiento de datos especializadas.* Se debe investigar la posibilidad de implementar los algoritmos para el análisis FOP. en tarjetas para el procesamiento de datos, esto con el objetivo de que el análisis sea integrado en un módulo portable e independiente para esta aplicación.
5. *Implementación práctica.* Es necesario investigar a profundidad los requerimientos que implican la implementación práctica del algoritmo FOP. y su integración al esquema de control jerárquico de micro-redes. Teniendo en mente inclusive aspectos del sistema de comunicación entre los diferentes niveles del control jerárquico. Investigar la estrategia óptima para compensar la desviación de las variables pronosticadas respecto de su valor pronosticado; por ejemplo, velocidad de viento, irradiación solar, demanda eléctrica y variabilidad de costos de la energía.
6. *Respuesta a la demanda y asignación de unidades.* Con la finalidad de ampliar las posibilidades para el manejo óptimo de la energía, es necesario que el modelo y algoritmo de FOP. para micro-redes contemple la función de respuesta a la demanda.
7. *Micro-redes autónomas.* La operación en modo autónomo de las micro-redes impone requerimientos importantes en lo referente al manejo óptimo de la energía. Por ejemplo, el control de frecuencia y flujo de potencia reactiva son aspectos de vital importancia para la operación en modo autónomo y, dentro de la estructura de control jerárquico, el control terciario es el encargado de estos aspectos. En este sentido, se debe investigar la implementación del análisis FOP. para micro-redes operando en modo no autónomo.
8. *Operación de múltiples micro-redes.* En referencia a la operación de micro-redes, la tendencia que actualmente se empieza a promover es la operación de múltiples micro-redes; es decir, micro-redes interconectadas. Esto con la finalidad de proporcionar robustez al suministro de energía eléctrica y aprovechar al máximo las fuentes de generación distribuida y los sistemas de almacenamiento. En este sentido, es de interés investigar como coordinar el control terciario de las múltiples micro-redes con el fin de lograr el manejo óptimo de la energía desde un punto de vista global. Este aspecto podría investigarse desde un punto de vista de sistemas multi-agente.

Apéndice

Apéndice A

En el siguiente apéndice se muestran los datos de los componentes utilizados en la primer Micro-red de prueba 1 (MRP1), el segundo caso de estudio Micro-red de prueba 2 (MRP2) y los datos del sistema de CIESOL:

A.1 Datos de micro-red de prueba 1 (MRP1).

Tabla A.1. Número de nodos y componentes de la micro-red

Nodos	Líneas	Bateria	Cargas	WT	Panel FV	Nodo Slack red
8	6	1	1	1	1	1

Datos de potencia de los componentes de la micro-red

$$P_{\text{eolico}} = 500 \text{ w}, -100 < Q_{\text{eolico}} > 150\text{VA}$$

$$P_{\text{bateria}} = 300 \text{ w}$$

$$P_{\text{red}} = 800, -100 < Q_{\text{red}} > 150\text{VA}$$

$$P_{\text{panel solar}} = 250 \text{ w}$$

coeficientes de costos de red $a = 0.014, b = 0.020, c = 0.0060$

limites de voltaje generales $\text{Min} = 0.95 \text{ pu}, \text{Max} = 1.05$

Tabla A.2. Líneas de transmisión

Nodo envió	Nodo recepción	R (P.U.)	L (P.U.)	Bc (P.U.)
3	2	0.00029	0.00086	0
4	3	0.00029	0.00086	0
5	4	0.00029	0.00086	0
1	2	0.00029	0.00086	0
6	3	0.00029	0.00086	0
5	8	0.00029	0.00086	0

A.2 Datos de micro-red de prueba 2 (MRP2).

Tabla A.3. Número de nodos y componentes de la micro-red

Nodos	Líneas	Batería	Cargas	WT	Panel FV	Parque Vehicular	Nodo Slack red
9	7	1	1	1	1	1	1

Datos de potencia de los componentes de la micro-red

$$\begin{aligned}
 P_{\text{eolico}} &= 300\text{KW}, -100 < Q_{\text{eolico}} > 150\text{KVA} \\
 P_{\text{bateria}} &= 200 \text{ KW} \\
 P_{\text{Pvehicular}} &= 200\text{KW} \\
 P_{\text{red}} &= 800 \text{ KW}, -50 < Q_{\text{red}} > 75\text{KVA} \\
 P_{\text{panel solar}} &= 70\text{KW} \\
 \text{coeficientes de costos de red } a &= 0.014, b = 0.020, \quad c = 0.0060 \\
 \text{limites de voltaje generales Min} &= 0.95 \text{ pu}, \quad \text{Max} = 1.05
 \end{aligned}$$

A.3 Datos de micro-red de CIESOL

Tabla A.4. Número de nodos y componentes de la micro-red.

Nodos	Líneas	Batería	Cargas	WT	Panel FV	Nodo Slack red
8	6	1	1	1	1	1

Datos de potencia de los componentes de la micro-red

$$\begin{aligned}
 P_{\text{eolico}} &= 7\text{KW}, -1 < Q_{\text{eolico}} > 1.25\text{KVA} \\
 P_{\text{bateria}} &= 5\text{KW} \\
 P_{\text{red}} &= 35\text{KW}, -5 < Q_{\text{red}} > 7.5\text{KVA} \\
 P_{\text{panel solar}} &= 9.2\text{KW} \\
 \text{coeficientes de costos de red } a &= 0.014, b = 0.020, \quad c = 0.0060 \\
 \text{limites de voltaje generales Min} &= 0.95 \text{ pu}, \quad \text{Max} = 1.05
 \end{aligned}$$

Apéndice B

En el siguiente apéndice se muestran los datos técnicos de los módulos fotovoltaicos utilizados para los modelos de panel fotovoltaico y sistema fotovoltaico de CIESOL.

B.1 Datos módulos solares de casos de estudio

Tabla B.1. Datos de modulo fotovoltaico SOLARTEC S60PC-250

Numero de celdas	60(60X10)	
Condiciones de Medición		
Voltaje de circuito abierto	36.30 V	29.04 V
Voltaje en el punto de máxima potencia	30.60 V	24.32 V
Corriente de cortocircuito	8.71 A	6.96 A
Corriente en el punto de máxima potencia	8.17 A	6.53 A
Potencia máxima	250 W	200 W
Eficiencia del modulo	15.36%	

Tabla B.2. Datos de modulo fotovoltaico ATERSA A-222P

Numero de celdas	60(60X10)	
Condiciones de Medición		
Voltaje de circuito abierto	36.42V	
Voltaje en el punto de máxima potencia	29.32 V	
Corriente de cortocircuito	8.17 A	
Corriente en el punto de máxima potencia	7.57 A	
Potencia máxima	222 W	
Eficiencia del modulo	13.63%	

B.2 Datos de sistema fotovoltaico CIESOL

Tabla B.3. Datos de sistema fotovoltaico CIESOL

TIPO DE MODULO	A-222P
Potencia máxima de modulos	222 W
Potencia máxima del sistema fotovoltaico	9324 W
No. De Módulos totales del campo PV	42
No de módulos en serie por grupo	14
No. De grupo en paralelo por inversor	1
Modelo de Inversor	CICLO 3000
Conexión a red	TRIFASICA

Apéndice C

En este apéndice se muestran los datos de las curvas de carga, irradiación solar y viento utilizados para los diferentes casos de estudio.

C.1 Datos de carga de casos de estudio

Tabla C.1. Datos de las curvas de carga

Hora	Potencia de la carga MPR1	Potencia de la carga MPR2	Potencia de la carga Caso de estudio CIESOL
	W	KW	KW
1	100	800	0,594
2	100	800	0,594
3	100	800	0,605
4	100	800	0,609
5	100	100	0,603
6	100	100	0,603
7	200	200	0,581
8	300	300	0,567
9	300	300	7,331
10	400	400	27,576
11	400	400	29,908
12	500	500	30,161
13	500	500	32,605
14	700	700	34,344
15	400	400	23,55
16	400	400	13,939
17	500	500	15,685
18	500	500	14,171
19	700	700	10,855
20	800	800	5,804
21	800	800	2,316
22	800	800	1,275
23	400	400	0,571
24	300	300	0,586

C.2 Datos de irradiación solar y velocidad de viento de Salamanca Guanajuato y Almería España

Tabla C.2. Datos de irradiación solar y perfiles de viento para casos de estudio

HORA	IRRADIACION SOLAR	IRRADIACION SOLAR VERANO DESPEJADO	IRRADIACION SOLAR VERANO NUBLADO	IRRADIACION SOLAR INVIERNO DESPEJADO	IRRADIACION SOLAR INVIERNO NUBLADO	PERFIL DE VIENTO	PERFIL DE VIENTO
	SALAMANCA GTO	ALMERIA ESP.	ALMERIA ESP.	ALMERIA ESP.	ALMERIA ESP.	SALAMANCA GTO.	ALMERIA ESP.
	W/M2	W/M2	W/M2	W/M2	W/M2	M/S	M/S
1	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	1.38	1.4359
2	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	2.77	1.9126
3	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	1.66	2.4233
4	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	2.50	2.5448
5	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	3.61	2.1973
6	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	3.05	2.3348
7	0.000001	2.79	5.50	0.000001	0.000001	2.77	1.9409
8	1.85	81.25	11.36	0.000001	0.000001	3.33	3.5255
9	92.90	274.21	11.50	0.000001	0.000001	1.66	2.9952
10	314.98	472.90	11.82	27.6854	5.5016	1.38	2.6990
11	561.85	673.09	98.47	168.0018	50.6795	4.72	6.5591
12	782.34	818.78	112.31	323.3958	94.0326	3.00	6.2634
13	930.95	907.18	495.35	441.9157	253.1320	3.50	7.0141
14	1001.78	928.37	668.87	508.7814	179.7592	3.50	6.6986
15	1027.59	885.35	728.91	515.2144	286.4108	3.60	7.4110
16	956.49	764.24	814.48	461.0763	459.6405	3.61	5.1615
17	835.75	613.05	745.34	352.9698	233.7556	4.72	5.1399
18	591.57	411.34	609.01	199.5915	118.9922	3.88	4.3198
19	386.21	206.16	397.40	45.0230	42.7538	3.88	2.8272
20	128.25	43.86	220.20	0.000001	0.000001	3.88	1.9773
21	6.043	0.134	89.04	0.000001	0.000001	3.88	1.3768
22	0.000001	0.000001	26.10	0.000001	0.000001	4.72	2.0464
23	0.000001	0.000001	6.54	0.000001	0.000001	5.83	1.7211
24	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	3.33	3.0200

Referencias Bibliográficas

- [1] Ackermann, Thomas; Andersson, Göran and Söder, Lennart. Distributed Generation: A Definition. *Electric Power Systems Research*, vol. 57, no. 3. pp. 195-204. ISSN 0378- 7796, Abril, 2001.
- [2] Hatziargyriou, N.; Asano, H.; Iravani, R.; Marnay, C., "Microgrids," in *Power and Energy Magazine*, IEEE, vol.5, no.4, pp.78-94, July-Aug. 2007.
- [3] Chowdhury S. P., Crossley P., Chowdhury S., *Microgrids and active distribution networks*. London, UK: Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [4] Majumder R, *analysis and control*. VDM Verlag, 2010.
- [5] Momoh J., *fundamentals of design and analysis*. New Jersey, USA: WileyBlackwell, 2012.
- [6] Olivares, D.E.; Cañizares, C.A.; Kazerani, M., "A Centralized Energy Management System for Isolated Microgrids," in *Smart Grid*, IEEE Transactions on, vol.5, no.4, pp.1864-1875, July 2014.
- [7] Ustun, Selim T.; Ozanyoy, Cagiland L. Zayegh, Aladin M., *Recent Developments in Microgrids and Example Cases Around the world—A Review.*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, vol. 15, no. 8. pp. 4030-4041. ISSN 1364-0321. 2011
- [8] Bidram, A., Davoudi, A., *Hierarchical Structure of Microgrids Control System*. IEEE Transactions on Smart Grid. 3(4), 1963-1976, 2012.
- [9] Engler A., *Control of parallel operating battery inverters*, de *The PV hybrid power systems conference*, Aix en Provence, France, 2000.
- [10] Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Matas, J., de Vicuña, L.G. y Castilla, M., «Hierarchical Control of droop Controlled AC and DC Microgrids - A General Approach Toward Standardization, » *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, nº 1, pp. 158-172, January 2011.
- [11] Katiraei, F., Iravani, R., Hatziargyriou, N., Dimeas, A., *Microgrids management*. IEEE Power and Energy Magazine. 6(3), 54-65, 2008.
- [12] Levron, Y.; Guerrero, J.M.; Beck, Y., "Optimal Power Flow in Microgrids with Energy Storage," in *Power Systems*, IEEE Transactions on, vol.28, no.3, pp.3226-3234, Aug. 2013.
- [13] P. Siano and G. Mokryani, "Probabilistic Assessment of the Impact of Wind Energy Integration into Distribution Networks," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4209-4217, Nov. 2013. doi: 10.1109/TPWRS.2013.2270378

- [14] Lasseter. R.H., Micro Grids, Fellow, IEEE, 2002
- [15] Abdel, Moamed M. A. y Narayana, Prasad Padhy, "*Power Flow Control and Transmission Loss Minimization Model with TCSC for Practical Power Networks*", Power Engineering Society General Meeting, Julio, 2003, 2, pp. 880-884.
- [16] Ahmad, A., "*Tesis doctoral; Optimal Power Flow Solution Using Second Order Newton Method*", Universidad de Manchester Institute of Engineering and Electronics, 1991.
- [17] B. Awad, M. Chaudry, J. Wu and N. Jenkins, "Integrated optimal power flow for electric power and heat in a MicroGrid," *Electricity Distribution - Part 1, 2009. CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on*, Prague, Czech Republic, pp. 1-4, 2009.
- [18] M. J. Dolan, E. M. Davidson, I. Kockar, G. W. Ault and S. D. J. McArthur, "Distribution Power Flow Management Utilizing an Online Optimal Power Flow Technique," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 790-799, May 2012.
- [19] Gill, S.; Kockar, I.; Ault, G.W., "Dynamic Optimal Power Flow for Active Distribution Networks," in *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol.29, no.1, pp.121-131, Jan. 2014.
- [20] D. Liu, Q. Li and X. Yuan, "Economic and optimal dispatching of power microgrid with renewable energy," *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Shenzhen, pp. 16-20, 2014.
- [21] T. Sousa, H. Morais, Z. Vale, P. Faria and J. Soares, "Intelligent Energy Resource Management Considering Vehicle-to-Grid: A Simulated Annealing Approach," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 535-542, March 2012.
- [22] A. Jimenez and N. García, "Power flow modeling and analysis of voltage source converter-based plug-in electric vehicles," *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, pp. 1-6, 2011.
- [23] R. Garcia-Valle and J. G. Vlachogiannis, "Electric vehicle demand model for load flow studies," *Elect. Power Compon. Syst.*, vol. 37, no. 5, pp. 577-582, May 2009.
- [24] Bose, B.K., "Global Warming: Energy, Environmental Pollution, and the Impact of Power Electronics," in *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, vol.4, no.1, pp.6-17, March 2010.
- [25] P. Larsen, Energy Policy Toolkit on System Integration of Wind Power Experiences from denmark. Low Carbon Transition Unit, Dinamarca, [En línea], Disponible en: <http://www.ens.dk/>

- [26] V. V. Doniz-Gonzales, C. Montaña-Fernández, E. Espinosa-Bustamante, *Prospectiva del Sector Eléctrico 2005–2014*, Dirección General de Planificación Energética, México, [en línea], Disponible en: http://www.sener.gob.mx/webSener/Electrico_2005_2014.pdf
- [27] E. Acha.; C. R. Fuerte.; H. Ambriz.; C. Camacho, "FACTS Modelling and Simulation in Power Network", 1nd ed., England: John Wiley & Sons LTD, pp. 117-125, 2004.
- [28] Li Wang; Tai-Her Yeh; We-Jen Lee; Zhe Chen, "Benefit Evaluation of Wind Turbine Generators in Wind Farms Using Capacity-Factor Analysis and Economic-Cost Methods," in *Power Systems*, IEEE Transactions on, vol.24, no.2, pp.692-704, May 2009.
- [29] Bellini, A.; Bifaretti, S.; Iacovone, V.; Cornaro, C., "Simplified model of a photovoltaic module," in *Applied Electronics*, AE 2009, vol., no., pp.47-51, 9-10 Sept. 2009.
- [30] Grupo Elecnor, Hoja técnica Modulo fotovoltaico A-222P/A-232/A-238 ATERSA, noviembre, 2011. En línea en http://www.sfe-solar.com/wp-content/uploads/2011/06/Atersa_A222-238P.pdf.
- [31] Pável Zúñiga Haro, "Analysis and control of a series compensator", Ph.D. dissertation, Dept. Electrical Power Systems, CINVESTAV Gdl., Guadalajara, México, 2006. [En línea]. Disponible en: http://orion.gdl.cinvestav.mx/~jramirez/Tesis_pavel2006.pdf.
- [32] A. Jimenez and N. García, "Power flow modeling and analysis of voltage source converter-based plug-in electric vehicles," *Power and Energy Society General Meeting*, 2011 IEEE, San Diego, CA, pp. 1-6, 2011.
- [33] Nocedal J., Wright S. J., *Numerical Optimization*. Springer, New York, second edition, 2006.
- [34] The MathWorks Inc., "Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox™ 2", Users Guide Version 2, [Online], Available in: http://cda.psych.uiuc.edu/matlab_pdf/gads_tb.pdf
- [35] The MathWorks Inc., "Global Optimization Toolbox", Users Guide R2015a, [En línea], Available in: http://files.matlabsite.com/docs/books/matlabdocs/global_optimization_toolbox_gads_tb_r_2015a.pdf
- [36] The MathWorks Inc., "Matlab Optimization Toolbox", Users Guide Version 2, [En línea], Available in: <http://www.mathworks>
- [37] NISSAN, NISSAN LEAF Autonomía Recarga, [En línea], <https://www.nissan.es/vehiculos/nuevos-vehiculos/leaf/autonomia.html>.