

Despacho Económico y su aplicación en Microrredes Eléctricas

Diana Marcela Hernández Vargas

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniera Electricista

Director

Ricardo Alzate Castaño

Doctorado en Ingeniería Informática y Automática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Este trabajo viene dedicado para todas aquellas personas que apoyaron el desarrollo y ejecución de este trabajo de grado.

En especial reconozco la permanente presencia de Dios en mi camino de vida.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por el apoyo económico y moral que tuvieron para conmigo durante el desarrollo de mi carrera. También agradezco a mis amigos y compañeros por las vivencias de estos inolvidables años de universidad.

Un reconocimiento y agradecimiento importante lo realizo a mi director de trabajo de grado, por dedicar su tiempo, experiencia y conocimiento en la guía de mi proyecto.

Tabla de Contenido

Introducción	13
1. Objetivos	18
2. Optimización energética	19
2.1. Despacho económico	19
2.1.1. Multiplicadores de Lagrange	20
2.1.2. Solución numérica	23
3. Microrredes aisladas	27
3.1. Sistemas de generación distribuida	27
3.1.1. Microrred eléctrica	28
3.1.2. Normatividad	29
3.1.3. Dimensionamiento para microrred aislada	30
3.2. Análisis numérico de la microrred	31
4. Optimalidad en generación distribuida	33
4.1. Formulación del problema de optimización	33
4.1.1. Costo de generación del recurso renovable	35
4.1.1.1. Anualidad en términos del valor presente	36

4.1.1.2. Costo para generación fotovoltaica	38
4.1.1.3. Costo para generación eólica	40
4.1.2. Costo de generación del recurso no renovable	41
4.2. Verificación del despacho óptimo de recursos de la microrred	43
5. Recomendaciones	50
6. Trabajo futuro	52
7. Conclusiones	53
Referencias Bibliográficas	54
Apéndices	59

Lista de Figuras

Figura 1.	Evolución para C_{P_G} en $fmincon(.)$ sin restricciones sobre P_{G_i}	25
Figura 2.	Evolución para C_{P_G} en $fmincon(.)$ con restricciones sobre P_{G_i}	26
Figura 3.	Microrred empleada como caso estudio	31
Figura 4.	Simulación en <i>RAPSim</i> ilustrando potencias en el tiempo	34
Figura 5.	Aproximación para coeficientes de función de costo en generador <i>Diesel</i>	44
Figura 6.	Simulación despacho económico de potencias ante carga constante	45
Figura 7.	Costos de generación ante carga constante	47
Figura 8.	Costos acumulados de generación ante carga constante	48
Figura 9.	Costo acumulado total de generación ante carga constante	49
Figura 10.	Simulación despacho económico de potencias ante carga variable	51
Figura 11.	Costo acumulado total de generación ante carga variable	52
Figura 12.	Ventana principal de <i>RAPSim</i>	60
Figura 13.	Secuencia de pasos para crear un campo de operación para una microrred	61
Figura 14.	Microrred de prueba	62
Figura 15.	Microrred de prueba	63
Figura 16.	Ejecución de simulación	64
Figura 17.	Activación superposición de colores	65

Lista de Tablas

Tabla 1.	Costos inversión, operación y mantenimiento recurso renovable	40
Tabla 2.	Consumo promedio de combustible para generador Diesel	42
Tabla 3.	Costo acumulado para escenarios de operación del sistema	49

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Simulador RAPSim	59

Resumen

Título: Despacho Económico y su aplicación en Microrredes Eléctricas *

Autor: Diana Marcela Hernández Vargas **

Palabras Clave: Algoritmo de Optimización, Despacho Económico, Generador Diesel, Microrredes, Recurso Renovable.

Descripción: El presente proyecto de grado presenta el despacho económico de recursos de generación en una microrred aislada. Inicialmente se realiza la definición de los conceptos fundamentales sobre los cuales se constituye el despacho económico de recursos energéticos. Posteriormente, se procede con el dimensionamiento y análisis de simulación (empleando la herramienta RAPSim) para una microrred aislada consistente en un generador fotovoltaico de 1 kW, un generador eólico de 1 kW y dos generadores Diesel de 0.5 kW cada uno, alimentando simultáneamente una carga fija de 1 kW. Los resultados anteriores fueron contrastados posteriormente con los perfiles de generación para las fuentes no renovables, programados a través de la función *fmincon(.)* de MATLAB, empleando una estrategia de despacho económico basada en la definición de costos para el recurso renovable y tomando una forma cuadrática para la relación entre potencia y consumo de combustible de los generadores Diesel. A partir de lo anterior fue posible obtener una reducción del costo total acumulado para satisfacer la demanda de la carga, a través del método propuesto. Resultados adicionales fueron obtenidos considerando variaciones de carga. Trabajo complementario incluye el análisis de dinámicas de los lazos de control que garantizan los valores nominales de los generadores y la verificación experimental de las predicciones presentadas, sobre una microrred real.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

Abstract

Title: Economic Dispatch and its Application into Electrical Microgrids *

Author: Diana Marcela Hernández Vargas **

Keywords: Diesel Generator, Economic Dispatch, Microgrids, Optimization Algorithm, Renewable Resource.

Description: In this work the economic dispatch of energy resources in an isolated microgrid is presented. Initially, definition of fundamental concepts regarding economic dispatch of energy resources is performed over the basis of formulation for cost functionals on renewable type of sources. Then, sizing and simulations of a microgrid consisting of a photovoltaic array of 1 kW, an eolic generator of 1 kW and two Diesel generators of 0.5 kW each, feeding simultaneously a fixed load of 1 kW, were performed on a specialized simulation package called RAPSIm. These results were further contrasted with the power scheduling for nominal values of the Diesel generators provided by an optimization algorithm performed in MATLAB with the *fmincon(.)* function, programmed with an economic dispatch strategy fitted to the aforementioned situation. According to this, it was showing that a reduction in the total cost required to feed the load under the proposed method was achieved after comparing with the RAPSIm schedule and the worst case consisting of Diesel generators only. Additional results were also obtained by considering load variations. Ongoing work includes the analysis of control loops allowing to keep nominal conditions of sources and experimental verification of the proposed method on a real isolated microgrid.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

Introducción

La necesidad de nuevas formas de gestionar la energía eléctrica, ha motivado avances tecnológicos para el mejoramiento de la calidad del suministro y la expansión de cobertura. Por tanto, proveer de energía a la mayor cantidad de usuarios con el menor costo ha sido la premisa de sistemas de generación y distribución de energía eléctrica desde sus formas ancestrales hasta versiones más actuales (red inteligente o *Smart Grid* González et al. (2017)) que incorporan tecnologías de información y comunicación con la red de potencia. Un subconjunto interesante de estas redes inteligentes lo constituyen las *microrredes*, definidas como sistemas compuestos por generadores y cargas, capaces de autoabastecerse y funcionar de manera autónoma de la red de distribución eléctrica González et al. (2017). Su funcionamiento se sustenta con la idea de un modelo descentralizado, soportado en el uso de fuentes renovables de energía, además del desarrollo de técnicas de almacenamiento energético que permitan mitigar las problemáticas de generación intermitente asociadas con estas clases de sistemas de generación distribuida Trujillo Rodríguez et al (2015).

Una *microrred* tiene la capacidad de operar conectada a la red o en forma aislada. La operación de forma aislada se produce por una causa obligada como un desastre natural, en comunidades alejadas o por elección en aplicaciones especiales. En este modo la *microrred* genera potencia internamente, incluyendo transferencias entre unidades almacenadoras, buscando balancear oferta y demanda Cortes Fuertes (2016). Las *microrredes* representan una solución viable para las exigencias de energía eléctrica en áreas aisladas o no electrificadas, ofreciendo alternativas más eficientes,

con mayor vida útil y menor costo de manutención que otras opciones tradicionales (generadores diésel, por ejemplo), además de aprovechar los recursos renovables existentes Pablo (2011).

Por todo esto, las energías renovables se han convertido en tema central de políticas de gobierno a nivel mundial, posibilitando inversiones del sector público y privado para desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías de producción energética libre de carbono (*descarbonización* de la economía energética Romero Hernández et al. (2011)). De hecho en Colombia estudios de prospectiva y viabilidad de energías renovables (eólica y solar), muestran los beneficios del cambio hacia generación de energía no convencional Serrano Reyes and Zarate Torres (2014).

Sin embargo, a pesar de todas estas potenciales ventajas aún queda un amplio recorrido por ser realizado en cuanto respecta a apropiaciones tecnológicas que faciliten en una *microrred* la capacidad de generar energía suficiente y sin intermitencias, constituyéndose en un reto técnico y tecnológico la determinación de escenarios adecuados para un suministro energético confiable y de calidad.

De esta manera se requieren métodos especiales de operación, control y planificación para *microrredes*, que permitan optimizar recursos y garantizar independencia con respecto al sistema de potencia. En sistemas tradicionales, se define el *despacho económico* como aquel conjunto de métodos que propician la gestión optimizada de fuentes de energía para predecir y ajustar los costos de una operación más eficiente Giraldo Gómez (2016).

A manera de ilustración, considere un sistema de potencia cuyo sector de generación está conformado por tres plantas térmicas que tienen como objetivo suplir una carga total de 975 MW , con límites de generación dados por:

$$200\text{MW} \leq P_1 \leq 450\text{MW};$$

$$150\text{MW} \leq P_2 \leq 350\text{MW};$$

$$100\text{MW} \leq P_3 \leq 225\text{MW}.$$

A su vez, se asumen para el mismo las siguientes funciones para describir su costo de operación:

$$C_1 = 500 + 5.3P_1 + 0.004P_1^2;$$

$$C_2 = 400 + 5.5P_2 + 0.006P_2^2;$$

$$C_3 = 200 + 5.8P_3 + 0.009P_3^2. \quad (1)$$

El objetivo de un *despacho económico* para este caso será determinar la potencia que cada generador del sistema debería aportar de tal manera que no afecte el adecuado funcionamiento de la red y a su vez reduzca los costos que esta provoca Hadi (1999). Para ello, se debe tener en cuenta que la operación de los sistemas eléctricos de potencia es un proceso que consiste en mantener el balance entre la energía que inyectan las centrales generadoras, la energía consumida por las cargas y las pérdidas que se generan en el sistema de transmisión Garrido Fuhrop (2016).

Por tanto, empleando el *método de Lagrange*, es posible mostrar que el punto óptimo de operación para el sistema es:

$$P_1 = 450MW; P_2 = 325MW; P_3 = 200MW,$$

representando un costo mínimo de operación de 8236.25 \$/hora.

En general, la gestión económica de un sistema eléctrico de potencia es muy compleja, ya que no sólo intervienen aspectos financieros sino también tarifarios, sociales, empresariales, medioambientales y operacionales, influenciados a su vez por un marco legal regulatorio Díaz González (2017).

En la Universidad Industrial de Santander, se han desarrollado trabajos relacionados con el despacho económico, dentro de los cuales pueden citarse: Castilla Amell and Gambin Blanco (1988) en análisis comparativo de los modelos matemáticos para despacho económico de sistemas de potencia; Arguello S and Contreras B. (1982) abordando la implementación de técnicas del gradiente reducido y la matriz Hessiana y Gómez (1987) analizando el costo incremental de cada barra del sistema de potencia. A su vez, en Torres Manrique and May Dulcey (1979) se desarrolló la optimización de un modelo para despacho económico en sistemas de potencia.

A nivel de estrategias de despacho económico aplicado a microrredes, una revisión de la literatura permite destacar Lanás Montecinos (2011) donde se valida un modelo de optimización

energética para una microrred; Arango et al. (2017) que aplica despacho económico con penetración de energía renovable usando algoritmos de punto interior y restricciones lineales y Pinto et al. (2015), Surender et al. (2015) que exploran algoritmos de cálculo rápido para resolver problemas de optimización energética en este tipo de sistemas de microgeneración.

Sin embargo, no se documentan trabajos recientes a nivel UIS que ataquen el problema de mitigar las falencias de generación en *microrredes*, por cuenta de una cantidad limitada de recursos energéticos (además de naturaleza variable), la falta de control en las fuentes y los efectos que provocan los cambios en la demanda sobre la operación del sistema.

A partir de la ejecución del presente trabajo de grado, se buscan respuestas ante interrogantes como los siguientes: ¿Cómo asignar de manera óptima los recursos energéticos en una *microrred* para garantizar un flujo de potencia constante hacia las cargas? ¿Cómo adecuar las formulaciones del despacho económico tradicional para el caso de *microrredes*? ¿Cómo interpretar el concepto de costo en la operación de una *microrred* aislada? ¿Cómo formular estrategias para mitigar las variaciones de disponibilidad en fuentes de energía alternativa mediante una gestión apropiada de recursos en una *microrred*?

1. Objetivos

Objetivo general

Diseñar y simular la gestión optimizada de recursos energéticos en una microrred empleando despacho económico.

Objetivos específicos

Establecer la topología para una microrred aislada con al menos dos tipos de fuente, como caso de estudio para el problema de gestión óptima de recursos energéticos;

Aplicar una técnica de despacho económico sobre la microrred, que permita optimizar una variable relevante en la operación del sistema;

Analizar mediante comparación por simulación, la operación del sistema optimizado con respecto al mismo sistema ante condiciones no óptimas, como estrategia de validación para el método propuesto.

2. Optimización energética

El *costo* de la energía es indudablemente un parámetro de importancia para asegurar la operación de sistemas en la industria. Así, realizar el mismo trabajo a un menor costo es el objetivo a perseguir por parte de sistemas de ingeniería eficientes y adecuados a las necesidades de un contexto limitado de recursos, alta demanda y volatilidad económica debida a impactos ambientales. El presente *Capítulo* introduce el concepto de *despacho económico* para ilustrar métodos que propenden por realizar una distribución equitativa de recursos en las cargas, a partir de restricciones de costo consideradas en los puntos de generación.

2.1. Despacho económico

En *sistemas de potencia*, el despacho económico hace referencia a un arreglo de generación de potencia que busca satisfacer una demanda dada al menor costo de operación posible Garrido Fuhrop (2016). Para ello se define una función de costos:

$$C(P_G) = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}), \quad (2)$$

donde: n es el número de generadores, C_i el costo de generación individual y P_{Gi} la potencia generada individual.

A su vez, la potencia total generada P_G puede expresarse en términos de la potencia total de demanda P_D y las pérdidas de potencia P_P , mediante:

$$\begin{aligned} P_G &= \sum_{i=1}^n P_{Gi} \\ &= P_D + P_P, \end{aligned} \tag{3}$$

constituyendo una *restricción* práctica para el sistema.

El objetivo de un despacho económico será entonces *optimizar* (2) aplicando métodos analíticos o computacionales para determinar los valores máximos o mínimos de la función. De esta manera, es posible formular el problema de optimización general en el modo siguiente: definiendo a su vez el siguiente polinomio característico:

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & C(P_G) \equiv \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) \\ \text{sometido a la restricción} \quad & (3), \end{aligned} \tag{4}$$

correspondiendo con un problema de *optimización con restricciones* de igualdad Inc. (2003)

2.1.1. Multiplicadores de Lagrange. De todos los métodos posibles que ofrece la literatura para optimizar la expresión (2), se asume para ilustración en este texto introductorio el denominado *método de los multiplicadores de Lagrange* Hadi (1999) dada su popularidad de uso

en problemas de despacho económico tradicional. Dicho método modifica la función a minimizar a partir de la introducción del *lagrangiano*, definido para el caso analizado en los términos siguientes:

$$\mathcal{L}(P_{Gi}, \lambda) = C(P_G) + \lambda (P_D + P_P - P_G), \quad (5)$$

siendo λ un escalar denominado *multiplicador de Lagrange*.

De este modo, tras considerar que no existen pérdidas (i.e. asumiendo $P_P = 0$) minimizar (5) implica satisfacer:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_{Gi}} = \frac{d}{dP_{Gi}} C_i(P_{Gi}) - \lambda = 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} = P_D - P_G = P_D - \sum_{i=1}^n P_{Gi} = 0. \quad (7)$$

Nótese cómo en (5) el coeficiente de λ corresponde con una reorganización de (3) igualada a cero, lo cual se interpreta como la transformación del problema original de *optimización con restricciones* a uno de *optimización sin restricciones*, a partir de la formulación de una función de costo que las contiene.

Para comprender mejor el *método de los multiplicadores de Lagrange*, se resolverá analíticamente el ejemplo sugerido en el *Capítulo 1*, modificado para el caso en que no existen límites de genera-

ción y siendo la demanda 800 MW .

Inicialmente se determinan las derivadas de las funciones de costo (1) en el modo siguiente:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dP_1}C_1 &= 5.3 + (2 \times 0.004) P_1; \\ \frac{d}{dP_2}C_2 &= 5.5 + (2 \times 0.006) P_2; \\ \frac{d}{dP_3}C_3 &= 5.8 + (2 \times 0.009) P_3.\end{aligned}$$

Reemplazando el resultado anterior en (6) se tiene:

$$\begin{aligned}5.3 + (2 \times 0.004) P_1 - \lambda &= 0; \\ 5.5 + (2 \times 0.006) P_2 - \lambda &= 0; \\ 5.8 + (2 \times 0.009) P_3 - \lambda &= 0.\end{aligned}\tag{8}$$

Asimismo, (7) corresponde en este caso con:

$$800 - (P_1 + P_2 + P_3) = 0.\tag{9}$$

De esta manera, organizando (8) y (9) en forma matricial se constituye el siguiente sistema lineal:

$$\begin{bmatrix} -2 \times 0.004 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2 \times 0.006 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -2 \times 0.009 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.3 \\ 5.5 \\ 5.8 \\ 800 \end{bmatrix} \quad (10)$$

con solución (óptima) dada por:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 400 \\ 250 \\ 150 \\ 8.5 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

2.1.2. Solución numérica. *Soluciones analíticas* para problemas de optimización son, en general, difíciles de calcular y en muchos casos no puede garantizarse su existencia. Como alternativa se proponen *métodos computacionales de solución* a partir de cálculo numérico. *MATLAB* posee en el paquete de herramientas de optimización (*Optimization toolbox* Inc. (2003)), funciones que aproximan con exactitud soluciones para diferentes tipos de problemas de localización de mínimos o máximos de funciones objetivo.

En particular, los resultados numéricos de optimización desarrollados en el presente trabajo

de grado fueron obtenidos utilizando la función $fmincon(\cdot)$, misma que aborda *problemas de optimización con restricciones*.

La sintaxis general para llamado de la función en *MATLAB*, resolviendo el problema de optimización formulado en (4), es la siguiente:

$$P_{G_i} = fmincon(C(P_G), P_{G_i}(0), [], [], [1 \ 1 \ 1], P_D),$$

siendo $P_{G_i}(0)$ la condición inicial para el vector de potencias de los generadores individuales P_{G_i} , $C(P_G)$ la función objetivo (2), P_D la potencia total de demanda y el vector $[1 \ 1 \ 1]$ seleccionado de manera tal que se satisfaga la restricción de igualdad:

$$[1 \ 1 \ 1] \times P_{G_i} = P_D.$$

De esta manera, fue posible ejecutar y resolver el problema de optimización abordado analíticamente en la Subsección 2.1.1, desde una perspectiva numérica en *MATLAB*, presentando la evolución para la función objetivo que se muestra en la Fig. 1 ante $P_D = 800 \text{ MW}$ y $P_{G_i}(0) = [0 \ 0 \ 0]^T \text{ MW}$.

Como se observa, el problema de optimización numérico se resuelve en 9 iteraciones, a lo largo de las cuales la función objetivo $C(P_G)$ asume una serie de valores hasta estabilizarse en

6685.5 \$/h cuando P_{G_i} coincide con la solución óptima (11).

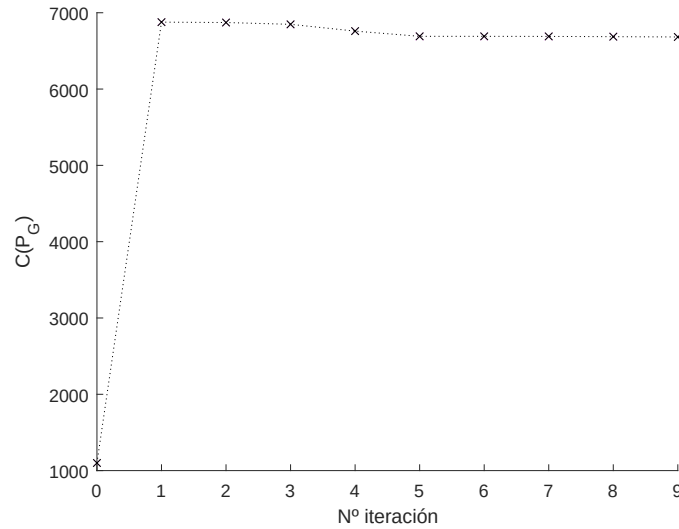


Figura 1. Evolución para C_{P_G} en $fmincon(.)$ sin restricciones sobre P_{G_i}

Es importante mencionar que además de minimizar el valor de $C(P_G)$, el algoritmo de optimización impone condiciones adicionales para asumir cómo válida una solución óptima del problema. Por ello en la Fig. 1 se acepta que el valor óptimo no necesariamente corresponde con el menor valor de la función objetivo.

La ventaja del cálculo numérico es su flexibilidad para adaptarse a diferentes tipos de problema. Es así como mediante la siguiente sintaxis:

$$P_{G_i} = \text{fmincon}(C(P_G), P_{G_i}(0), [\quad], [\quad], [1 \ 1 \ 1], P_D, L_B, U_B),$$

siendo:

$$L_B = \begin{bmatrix} 200 \\ 150 \\ 100 \end{bmatrix}; \quad U_B = \begin{bmatrix} 450 \\ 350 \\ 225 \end{bmatrix},$$

se logra resolver un problema de optimización con restricciones sobre los generadores individuales, dadas por $LB \leq P_{G_i} \leq UB$.

La Fig. 2 presenta la evolución de la función objetivo ante esta situación, presentando ante $P_D = 975 MW$ y $P_{G_i}(0) = [0 \ 0 \ 0]^T MW$ un valor óptimo de 8236.25 \$/h cuando P_{G_i} corresponde con:

$$P_1 = 450MW; P_2 = 325MW; P_3 = 200MW,$$

es decir, resolviendo numéricamente el problema de optimización con restricciones presentado a manera de ejemplo introductorio en el *Capítulo 1*.

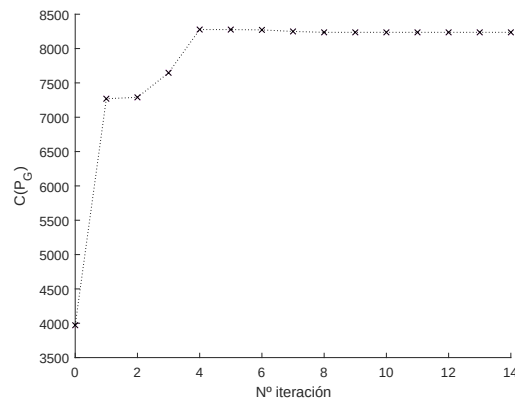


Figura 2. Evolución para C_{P_G} en *fmincon(.)* con restricciones sobre P_{G_i}

3. Microrredes aisladas

Una microrred eléctrica es un sistema de generación distribuida empleado para abastecer consumos a niveles de potencia bajos en comparación con la carga de sistemas de distribución tradicional. Por tanto, pueden contener generadores con fuentes alternativas de energía e incluso operar sin conexión a la red central de distribución. El presente *Capítulo* presenta la descripción, el dimensionamiento y la simulación para una microrred eléctrica aislada empleada como caso de estudio para abordar, posteriormente, el problema de su despacho económico de recursos.

3.1. Sistemas de generación distribuida

La mayor parte de la potencia eléctrica consumida en el mundo es producida en grandes instalaciones *centralizadas*. Por ello, en estos sistemas de generación tradicional proveer de energía a los usuarios implica complejas tareas de transporte con correspondientes pérdidas y altos costos de operación y mantenimiento. Como alternativa, surge un nuevo paradigma denominado *generación distribuida* Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2007) en el cual las fuentes de energía se encuentran localizadas cerca al consumidor, eliminando los problemas técnicos y económicos asociados al transporte y la distribución de recursos.

Los sistemas de generación distribuida pueden ser *conectados a la red*, de manera tal que en periodos donde el consumo es bajo el excedente de potencia sea inyectado a la red eléctrica. También pueden ser de tipo *aislado* (o en isla) para zonas remotas o de interconexión económicamente

inviabile, empleando fuentes de energía renovable y sistemas de almacenamiento como respaldo.

En particular, se pueden definir *fuentes de energía no renovable* como motores alternativos, turbinas de gas, pilas de combustible y microturbinas, que utilizan combustibles fósiles como energía primaria, y *fuentes de energía renovable* como la generación minihidráulica, eólica, solar térmica, fotovoltaica y la obtenida a través de biomasa. Asimismo, existen *tecnologías emergentes* como las fuentes de energía mareomotriz (ascenso-descenso del nivel del mar), undimotriz (movimiento de agua en forma de olas) y geotérmica.

3.1.1. Microrred eléctrica. Corresponde con un sistema eléctrico conformado por cargas controlables, fuentes de energía distribuida y dispositivos de almacenamiento. Tienen la capacidad de importar y exportar de forma flexible energía mediante el control de flujos de potencia activa y reactiva. En relación con la tipología existen *microrredes* de corriente continua, alterna y de alta frecuencia, a su vez de tipo monofásico o trifásico para conectarse a la red de distribución en nivel de baja o media tensión Trujillo Rodríguez et al (2015); Pérez Fernández (2017).

Como *ventajas* de una *microrred* pueden citarse: mayor calidad del suministro; mayor eficiencia energética; menor dependencia de la red de distribución; cercanía a fuentes de generación; mejoramiento en estabilidad de operación al constituir un sistema de respaldo; reducción de emisiones de gases de efecto invernadero tras el uso de fuentes de energía renovable y reducción de costos por una menor demanda en la red de distribución. Del mismo modo, como *desventajas* de

una *microrred* pueden citarse: la incipiente normatividad que obstaculiza su difusión; el alto costo de adquisición e implementación de las tecnologías y la volatilidad del recurso renovable.

3.1.2. Normatividad. En Colombia, existen un conjunto de normas que establecen condiciones y parámetros a tener en cuenta al momento de implementar sistemas de autogeneración a pequeña y gran escala. En particular, la Resolución *CREG* (Comisión de Regulación de Energía y Gas: www.creg.gov.co) *024 de 2015*, regula los sistemas a gran escala conectados al Sistema Interconectado Nacional (*SIN*). Asimismo, para el caso de sistemas a pequeña escala (i.e. aquellos con capacidad instalada menor a 1 *MW* según la Unidad de Planeación Minero Energética (*UPME*) en su Resolución *281 de 2015*), aspectos operativos y comerciales respecto a condiciones de conexión, medición y comercialización de energía en sistemas de autogeneración, se encuentran definidos y controlados por las Resoluciones *CREG 121 de 2017* y *030 de 2018*.

Por su parte, el Decreto *1243 de 2015* del Ministerio de Minas y Energía promueve las fuentes no convencionales de energía otorgando incentivos tributarios, complementado por la Resolución *CREG 045 de 2016* que establece requisitos para avalar proyectos de fuentes no convencionales. La *NTC 2050 de 1998* en su sección 690, establece las pautas para una instalación apropiada de sistemas fotovoltaicos. La Resolución *CREG 127 de 2018* define mecanismos para incorporar sistemas de almacenamiento en el *SIN*. A nivel internacional se destaca el Estándar *IEEE 1547* que proporciona criterios y requerimientos de operación y mantenimiento de recursos distribuidos conectados a la red eléctrica.

3.1.3. Dimensionamiento para microrred aislada. El potencial solar de Colombia, particularmente en la zona nororiental, sugiere analizar el aprovechamiento para este tipo de recurso energético como solución para suplir el consumo de familias en zonas rurales no interconectadas Unidad de Planeación Minero Energética (2015). Asimismo, puede combinarse el recurso solar con unidades de microgeneración eólica o hidráulica y por tanto, se realizará el estudio para una microrred aislada conformada por generadores eólicos, fotovoltaicos y plantas Diesel como sistema de respaldo.

Ahora bien, se estima que una persona consume en promedio 38 *kWh* de energía al mes (www.epm.com.co). Lo anterior corresponde con un promedio aproximado de consumo diario de 1.26 *kWh*, mismo que puede redondearse a 1 *kWh*. De esta manera, para una familia de 4 personas el consumo diario de electricidad será de aproximadamente 4 *kWh* por familia y así 6 familias representarán una carga de 24 *kWh* al día o equivalentemente de 1 *kW* cada hora. Por tanto, el dimensionamiento de cada generador renovable se realizó por la mitad de dicho valor nominal y adicionalmente se consideraron dos generadores Diesel aportando cada uno la mitad de la potencia requerida (ver Fig 3).

Visto de otra forma, en ausencia de las fuentes renovables, los generadores Diesel suplirán la carga total. Sin embargo, la inyección controlada del recurso renovable reducirá en modo apropiado y consistente el uso del sistema de respaldo, hasta el punto de estar en capacidad de suplir

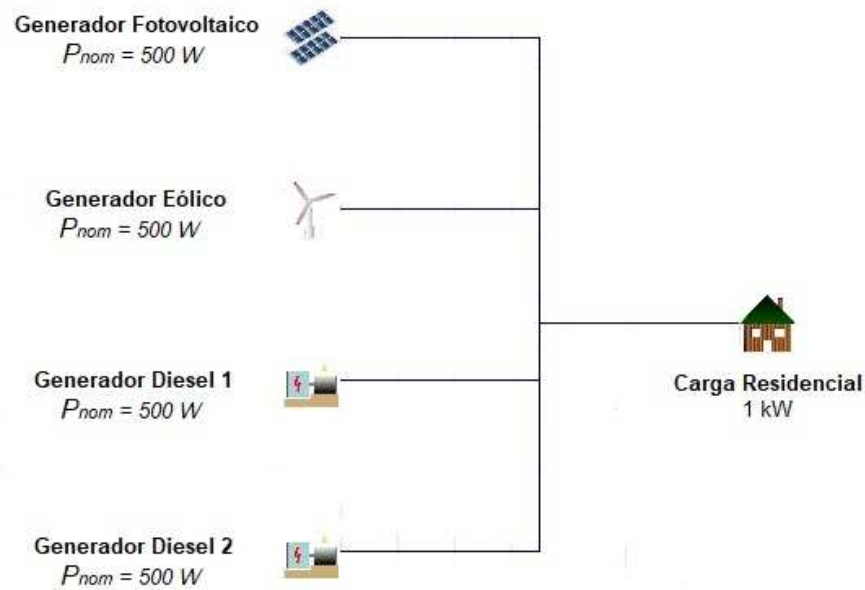


Figura 3. Microrred empleada como caso estudio

temporalmente la demanda a través de recursos renovables, cuando las condiciones ambientales permitan operar en las condiciones nominales del recurso.

3.2. Análisis numérico de la microrred

De entre todas las herramientas de simulación disponibles para efectuar el análisis numérico de microrredes, se seleccionó el RAPSim (*Renewable Alternative Powersystems Simulation*) Pochacker et al. (2014) debido a su acceso gratuito, facilidad de instalación, configuración y manejo. Una descripción general para dicha herramienta se incluye en el Anexo 1.

Para configurar el experimento de simulación se consideró una observación de 24 horas ante condiciones de demanda (o carga) constante.

La gestión de los recursos renovables (fotovoltaico y eólico), se realiza con base en una distribución aleatoria de condiciones ambientales que el simulador asigna de manera predeterminada, permitiendo configurar parámetros específicos para cada tipo de generador. De esta manera, considerando al departamento colombiano de *La Guajira* como el lugar de instalación para la microrred, se realizaron las siguientes selecciones (adicional a las potencias nominales indicadas previamente en la Fig. 3):

- *Generador fotovoltaico*: Altitud = 0.05 km, Latitud = 11.55° y Longitud = 72.9° . Además de una eficiencia del 15 %, como dato promedio actual para tecnologías comerciales de paneles fotovoltaicos (www.yinglisolar.com);
- *Generador eólico*: Velocidad de arranque = 3 m/s (V_{cut-in}), velocidad de parada o desconexión = 25 m/s ($V_{cut-out}$) y velocidad nominal 9 m/s . Esta velocidad nominal fue tomada a partir del promedio reportado en el atlas de viento del IDEAM UPME-IDEAM (2006).

Como resultado se observa en la Fig. 4 la distribución en el tiempo para la energía del sistema. En particular, la Fig. 4(a) presenta el perfil de potencia generado por el arreglo de *paneles fotovoltaicos*, en el cual se observa un periodo de generación comprendido entre las 7 a.m. y las 7 p.m., con valor pico superior al 50 % de su capacidad nominal en horas del mediodía. De manera similar, la Fig. 4(b) muestra el perfil de *generación eólica* el cual aporta picos significativos de potencia distribuidos a lo largo del día. Las Figs. 4(c) y 4(d) muestran la potencia generada por cada generador Diesel, siendo constante el aporte del *generador Diesel 1* mientras el *generador Diesel 2*

acondiciona la potencia generada a partir de una estrategia de gestión de recursos programada por defecto en RAPSIm. Dicha estrategia de gestión será tomada en adelante como punto de partida para plantear un problema de optimización de recursos y por tanto, a partir de ella se intentará realizar una ponderación mejorada que reduzca los costos operativos del sistema. Finalmente, se muestra en la 4(e) la potencia suministrada a la carga, siendo constante y de valor correspondiente a la condición nominal deseada.

4. Optimalidad en generación distribuida

Como complemento al desarrollo presentado en el *Capítulo* anterior, se propone a continuación una gestión apropiada de recursos para la microrred aislada diseñada a partir de una estrategia de *despacho económico* adaptada a un sistema de generación distribuida, mediante definición para los costos asociados a cada tipo de fuente.

4.1. Formulación del problema de optimización

Para formular y resolver el problema de optimización de recursos de la microrred, es necesario definir una *función objetivo*. En el caso particular analizado se buscará reducir los costos asociados a satisfacer la demanda P_L de la carga; es decir, adaptando la expresión (2) se tiene:

$$C_T(P_L) = C_f(P_f) + C_e(P_e) + C_{d1}(P_{d1}) + C_{d2}(P_{d2}), \quad (12)$$

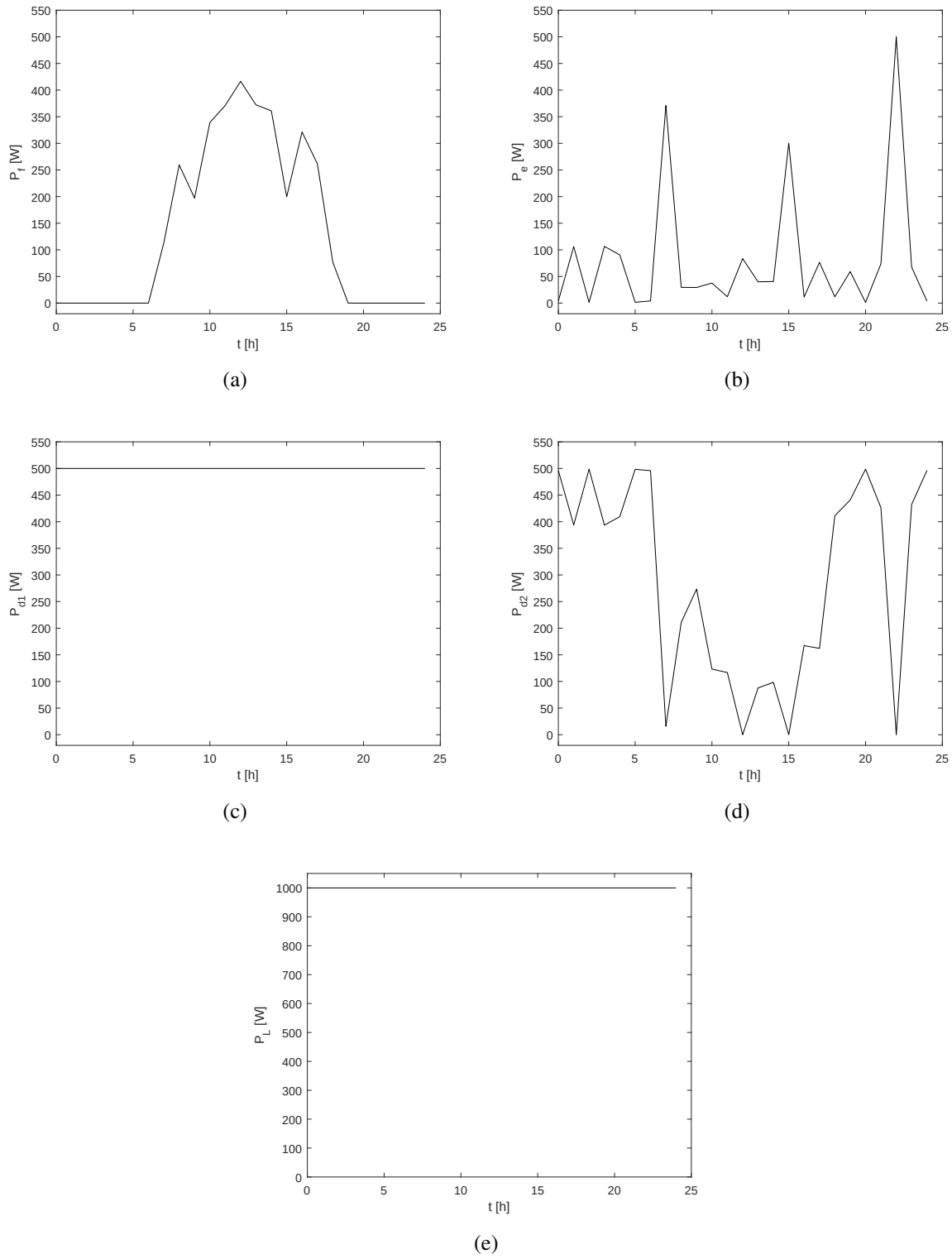


Figura 4. Simulación en *RAPSim* para microrred aislada, ilustrando potencias en el tiempo: (a) fotovoltaica P_f , (b) eólica P_e , (c) Diesel 1 P_{d1} , (d) Diesel 2 P_{d2} y (e) potencia en la carga P_L

siendo C_T el costo total de generación, C_f el costo asociado a la potencia de generación fotovoltaica P_f , C_e el costo asociado a la potencia de generación eólica P_e y C_{di} el costo asociado a la potencia del i -ésimo generador Diesel P_{di} .

Así entonces a partir de (4) el *problema de optimización* corresponde con:

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && (12) \\ &\text{sometido a la restricción} && P_L = P_f + P_e + P_{d1} + P_{d2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Para proceder con la solución numérica del mismo, se realizará una descripción de la elección de las *funciones de costo* para cada tipo de generador.

4.1.1. Costo de generación del recurso renovable. Para definir los modelos de costo del *recurso renovable* se empleará como referencia la tesis doctoral realizada por Hoogwijk en Hoogwijk (2004). Inicialmente, se analiza la desvalorización de los equipos empleados en la producción energética en términos de su *depreciación*. En *matemáticas financieras* la depreciación de un activo es la pérdida de su valor conforme este es utilizado para producir ingresos Morales C (2014). Una manera simple de modelar esta depreciación es a través de *anualidades*, cuando se asume una distribución de cuotas fijas a lo largo de un periodo de tiempo determinado.

4.1.1.1. Anualidad en términos del valor presente. Una inversión sobre un monto inicial v_p con interés I , produce un capital final v_f :

$$v_f = v_p + I. \quad (14)$$

Considerando un interés compuesto (es decir, aquel que se agrega al capital Morales C (2014)) para n periodos de tiempo y ante una tasa efectiva de interés i :

$$I = v_p [(1 + i)^n - 1], \quad (15)$$

la expresión (14) puede reescribirse como:

$$\begin{aligned} v_f &= v_p + v_p [(1 + i)^n - 1] \\ &= v_p + v_p (1 + i)^n - v_p \\ &= v_p (1 + i)^n, \end{aligned}$$

o equivalentemente

$$v_p = v_f (1 + i)^{-n}. \quad (16)$$

De esta manera, un padre de familia que desee pagar $v_f = \$4'000.000$ de matrícula universitaria a su hijo el 31 de enero de 2020, deberá consignar en su cuenta de ahorros el día 1 de septiembre de

2019, un valor de:

$$\begin{aligned} v_p &= 4'000.000 (1 + 0.02)^{-5} \\ &= \$3'622.923,24 \end{aligned} \quad (17)$$

ante una tasa de interés mensual del 2% ofrecida por su entidad financiera. A v_p también se le denomina *valor presente*.

Considere ahora el caso en el cual el valor futuro o capital final v_f , se descompone en cantidades iguales o cuotas R afectadas por el factor de interés compuesto definido en (15). A partir de ello (16) toma la forma:

$$v_p = \frac{R}{(1+i)^1} + \frac{R}{(1+i)^2} + \cdots + \frac{R}{(1+i)^n}. \quad (18)$$

Recordando la serie de potencias:

$$s = 1 + x + x^2 + \cdots + x^{n-1} \implies xs = x + x^2 + x^3 + \cdots + x^n$$

$$\implies s - sx = s(1 - x) = 1 - x^n \implies s = \frac{1 - x^n}{1 - x},$$

la expresión (18) puede escribirse alternativamente como:

$$\begin{aligned} v_p &= R \left(\frac{1}{(1+i)^1} + \frac{1}{(1+i)^2} + \cdots + \frac{1}{(1+i)^n} \right) \\ &= R \left(\frac{1 - (1+i)^{-n}}{1 - (1+i)} \right) \\ &= R \left(\frac{1 - (1+i)^{-n}}{i} \right), \end{aligned}$$

ante lo cual el valor de renta o *anualidad* R puede ser expresado en función de la tasa de interés i , la periodicidad n y el valor presente v_p en los términos siguientes:

$$R = v_p \left(\frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} \right). \quad (19)$$

Ahora bien, en el contexto del costo de un sistema de generación con fuentes alternativas, R puede interpretarse como la *cuota energética* que el sistema entrega en términos de una inversión v_p en equipamiento con vida útil de n periodos de tiempo.

4.1.1.2. Costo para generación fotovoltaica. A partir de (19) se asume para el caso fotovoltaico un costo por kW generado dado por:

$$C_{f1}(P_f) = -R_f P_f,$$

lo cual sugiere una relación lineal entre costo y potencia a partir del valor nominal; esto es, si inversión v_{pf} se realiza para construir un módulo fotovoltaico de 1 [kW], el costo C_{f1} por cada kW vendrá dado por $-R_f$, representando un abono o reducción sobre el costo de inversión inicial (recuperación de la inversión). Así entonces valores $P_f > 1$ [kW] representarán una recuperación más rápida de la inversión realizada.

Adicionalmente, se asumen gastos derivados de la operación y el mantenimiento del sistema correspondientes con la mano de obra del personal técnico requerido:

$$C_{f2}(P_f) = \Gamma_f P_f,$$

siendo Γ_f un coeficiente constante que representa el estimado de costo por periodo de análisis. A partir de ello, el modelo completo de costo de generación fotovoltaica viene definido como:

$$\begin{aligned} C_f(P_f) &= C_{f1}(P_f) + C_{f2}(P_f) \\ &= -R_f P_f + \Gamma_f P_f. \end{aligned} \tag{20}$$

La agencia internacional de energía renovable IRENA reporta anualmente datos correspondientes a estadísticas relacionadas con la utilización de recursos energéticos renovables alrededor del mundo (<https://www.irena.org/>). En el año 2017 este reporte sugiere los valores listados en la Tabla 1 para el caso de generadores fotovoltaicos en los Estados Unidos (pág 65 y 69 de

Tabla 1

Costos de inversión, operación y mantenimiento del recurso renovable Amin (2017)

Parámetro	USD kW/año	USD kW/día	USD kW/hora	COP kW/hora
v_{pf}	2000	5.48	0.2283	709.86
Γ_f	18	0.049	0.0020	6.2186
v_{pe}	1477	4.05	0.1688	524.85
Γ_e	27	0.074	0.0030	9.3280

Amin (2017)), los cuales serán utilizados como base para los cálculos de optimización desarrollados en el presente *Capítulo*. Para realizar la conversión a pesos colombianos (COP) se empleó la tasa representativa del mercado del banco de la república al día 15 de abril de 2019 (por valor de \$3109.32). De esta manera, asumiendo $n = 24$ horas; $i = 4.25\%$ anual (vigente en Colombia hasta abril de 2019), equivalente a $i = 4.85 \times 10^{-4}\%$ hora, el valor de R_f se calcula como 29.58 y por tanto (20) a partir de la Tabla 1 corresponde con:

$$\begin{aligned}
 C_f(P_f) &= -29.58P_f + 6.2186P_f \\
 &= -23.36P_f.
 \end{aligned} \tag{21}$$

4.1.1.3. Costo para generación eólica. El modelo de costos asumido para el caso de generación eólica es idéntico al considerado para el caso de generación fotovoltaica, empleando los coeficientes incluidos para dicha situación en la Tabla 1, para valores tomados de las páginas 94 y 105 del reporte IRENA 2017 Amin (2017). Así entonces, el costo por generación, operación y

mantenimiento del recurso eólico puede ser calculado como:

$$\begin{aligned}
 C_e(P_e) &= C_{f_1}(P_e) + C_{f_2}(P_e) \\
 &= -R_e P_e + \Gamma_e P_e \\
 &= \left[- \left(524.85 \times \left(\frac{4.85 \times 10^{-4}}{1 - (1 + 4.85 \times 10^{-4})^{-24}} \right) \right) + 9.3280 \right] P_e \\
 &= [-21.87 + 9.3280] P_e \\
 &= -12.54 P_e.
 \end{aligned} \tag{22}$$

4.1.2. Costo de generación del recurso no renovable. En el caso de los generadores *Diesel* se emplea un modelo de costo cuadrático, debido a que es la relación más típicamente empleada entre la potencia generada por una máquina térmica y el combustible utilizado. Así entonces, tomando como base el modelo propuesto por *Sadaat* (Ecuación 7.21 de la página 267 de Hadi (1999)) se tiene:

$$C_{di}(P_{di}) = \alpha_i + \beta_i P_{di} + \gamma_i P_{di}^2, \tag{23}$$

siendo i el generador *Diesel* bajo estudio y $\{\alpha_i, \beta_i, \gamma_i\}$ constantes que definen la relación polinomial del consumo de combustible (y por ende de su costo) respecto a la potencia de la máquina.

Para determinar dichos parámetros se utilizó información comercial disponible en el sitio web de la empresa *Diesel Service & Supply* respecto a valores aproximados de consumo en generadores Diesel, a la capacidad del generador y a las condiciones de carga al momento de su operación

Tabla 2

Valores de consumo promedio de combustible para generador Diesel, tomado de <https://www.dieselserviceandsupply.com/>

Capacidad	Consumo 25 %	Consumo 50 %	Consumo 75 %	Consumo 100 %
20 kW	0.6 gal/h	0.9 gal/h	1.3 gal/h	1.6 gal/h

(*approximate diesel consumption chart* disponible en

<https://www.dieselserviceandsupply.com/>).

De esta manera, se presentan en la Tabla 2 los valores correspondientes al consumo de un generador de 20 kW (el más pequeño proporcionado por la fuente en mención). A partir de ello, es posible construir el siguiente sistema de ecuaciones tomando \$8.550 como base de costo por galón Diesel en Colombia (precios válidos para abril de 2019):

$$1.6(\$8.550) = \alpha_i + \beta_i(20) + \gamma_i(20)^2;$$

$$1.3(\$8.550) = \alpha_i + \beta_i(0.75 \times 20) + \gamma_i(0.75 \times 20)^2;$$

$$0.9(\$8.550) = \alpha_i + \beta_i(0.5 \times 20) + \gamma_i(0.5 \times 20)^2;$$

$$0.6(\$8.550) = \alpha_i + \beta_i(0.25 \times 20) + \gamma_i(0.25 \times 20)^2.$$

Empleando el comando *polyfit(.)* de MATLAB se calcula la siguiente solución para el sistema de ecuaciones:

$$\alpha_i = 2137.5; \beta_i = 581.4; \gamma_i \approx 0.$$

Sin embargo, como se observa el coeficiente del término de segundo orden del polinomio se anula,

sugiriendo que la aproximación más válida para los cuatro puntos es una línea recta (ver Fig. 5). Evidentemente este caso no satisface las premisas a través de las cuales se plantea el problema y por ende se realiza un nuevo cálculo, esta vez considerando los tres puntos de consumo más bajo (teniendo en cuenta que el generador simulado estará operando a un máximo de 0.5 kW). Con ello se obtienen los siguientes valores:

$$\alpha_i = 3420; \beta_i = 256.5; \gamma_i = 17.1,$$

que reemplazados en la expresión (23) permiten constituir el modelo definitivo de costos de operación para el generador *Diesel* dado por:

$$C_{di}(P_{di}) = 3420 + 256.5P_{di} + 17.1P_{di}^2. \quad (24)$$

4.2. Verificación del despacho óptimo de recursos de la microrred

Una vez definida la función de costo total y los costos individuales para cada generador, es posible ambientar un escenario de simulación que permita verificar el despacho adecuado de recursos para la microrred aislada.

Por tanto, empleando las ecuaciones (12), (13), (21), (22) y (24), se replicaron los resultados de simulación propuestos en la *Sección 3.2* permitiendo generar los perfiles de potencia presenta-

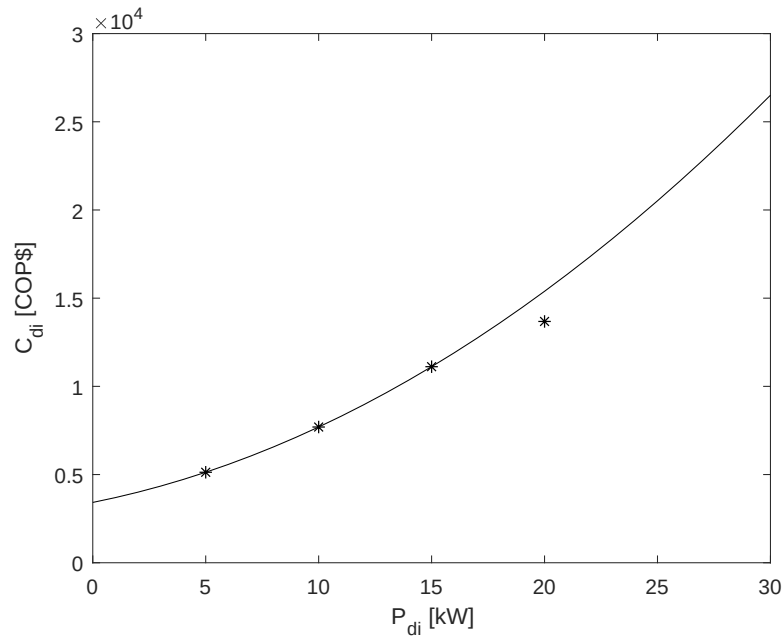


Figura 5. Aproximación para coeficientes de función de costo en generador *Diesel*

dos en la Fig. 6 ante condiciones de carga constante.

Como se observa, las características de generación de los sistemas fotovoltaico y eólico dados por las Figs. 6(a)-(b) replican el escenario mostrado previamente en las Figs. 4(a)-(b).

Por su parte, las Figs. 6(c)-(d) muestran respectivamente la repartición de potencias programada a través del algoritmo de optimización en MATLAB (en trazo continuo) comparada con la programación realizada en el programa RAPSim (en trazo discontinuo) presentada previamente en las Figs. 4(c)-(d). A partir de ello, es claro como el generador Diesel 1 deja de conservar un valor fijo durante todo el intervalo para realizar ajustes de potencia, en modo similar al comportamiento manifestado por el generador Diesel 2. Dicho resultado es consistente con el hecho que ambos

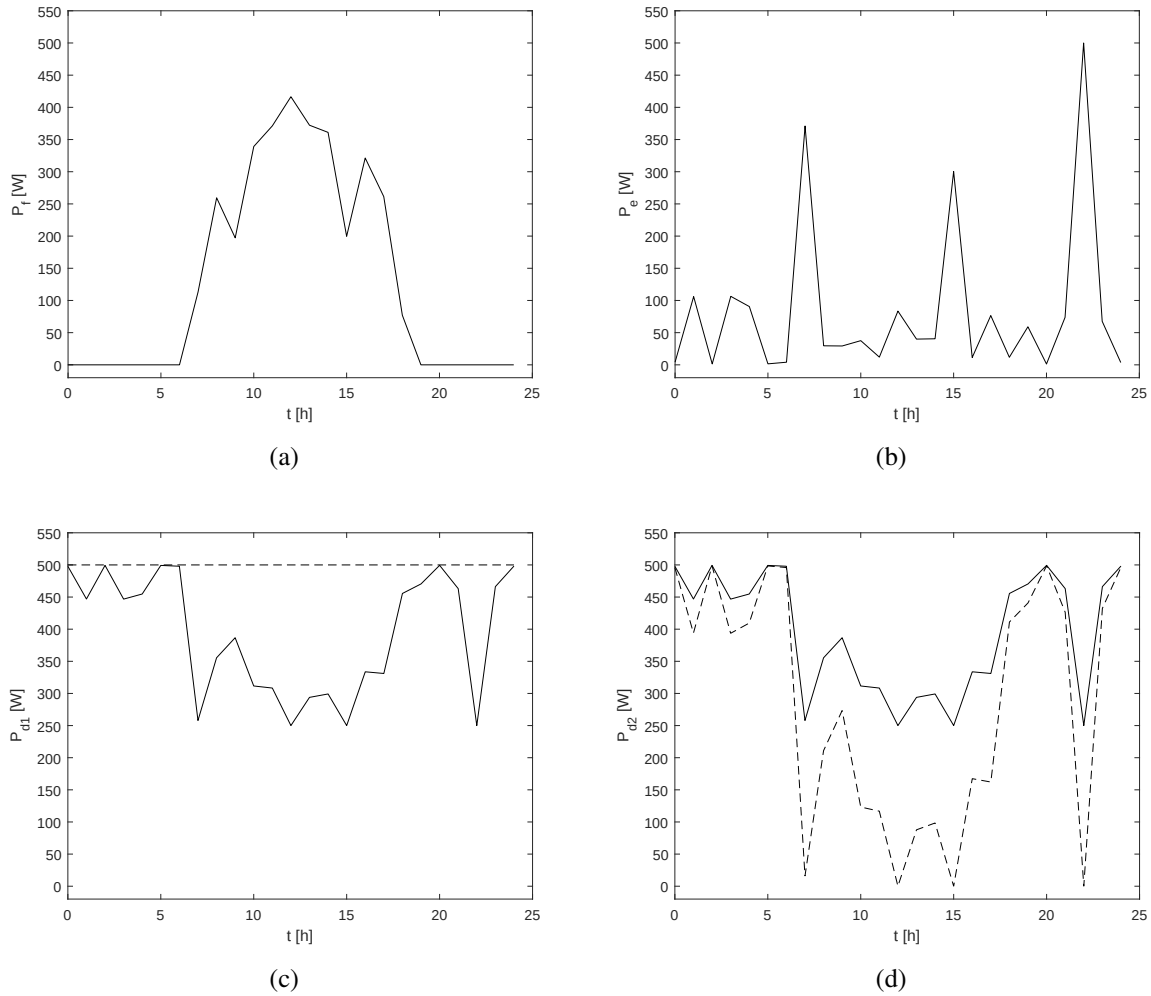
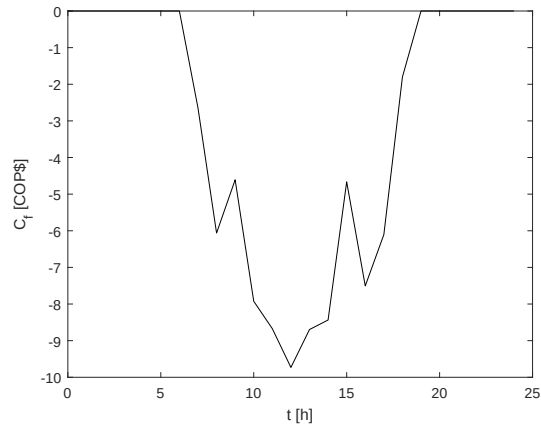


Figura 6. Simulación para despacho económico de potencias en microrred aislada ante condiciones de carga constante: (a) fotovoltaica P_f , (b) eólica P_e , (c) Diesel 1 P_{d1} , (d) Diesel 2 P_{d2}

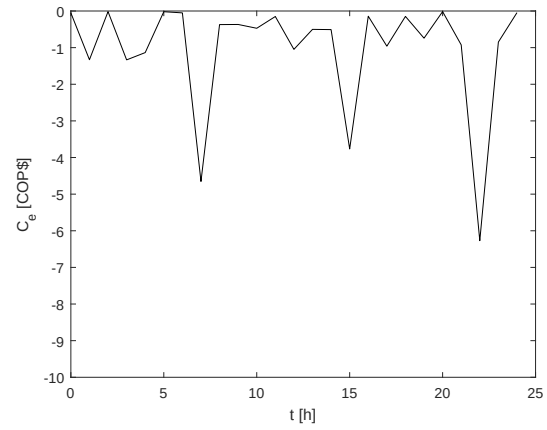
generadores se encuentran penalizados en el algoritmo de optimización por la misma función de costo. Adicionalmente, es evidente la manera cómo el generador Diesel 2 produce un mayor aporte de potencia bajo el algoritmo de optimización, que compensa la reducción de potencia que presenta para este mismo caso el generador Diesel 1.

De otro lado, la Fig. 7 ilustra el cálculo de costos en COP para los diferentes generadores, a partir de lo cual se aprecian las contribuciones negativas del recurso renovable y unas proporciones mucho mayores de costo para el recurso no renovable. A pesar de lo anterior, dichos resultados no permiten realizar conclusiones acertadas respecto al costo de producción energética del sistema en cuanto constituyen simples valores instantáneos. Por tanto, se presentan en la Fig. 8 los valores de costo acumulados para cada tipo de generador durante todo el intervalo de simulación. Aquí nuevamente es evidente el escaso aporte en magnitud que realiza el recurso renovable sobre el costo del sistema. Sin embargo, también es perceptible la reducción de costo acumulado por el generador Diesel 1 (ver Figs. 8(c)-(d)), mismo que sin embargo es incrementado en el generador Diesel 2.

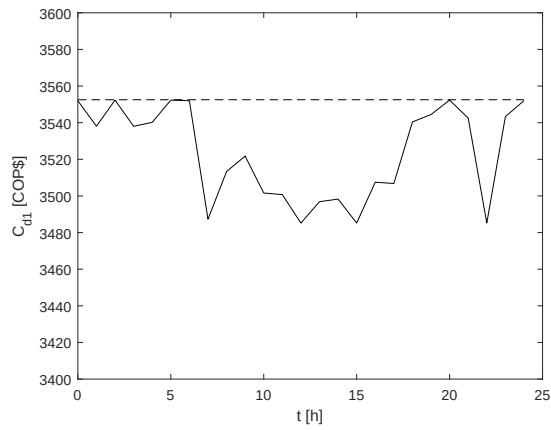
El resultado quizás más importante de todo el presente proyecto, es aquel presentado en la Fig. 9. En particular, analizando el resultado sugerido en las Figs. 9(a)-(b), la contribución del recurso renovable reduce de manera evidente el costo de generación aportado por los generadores Diesel (simulado mediante una línea punteada). Más interesante aún, se observa como el costo total acumulado obtenido a través de algoritmo de optimización en MATLAB (mostrado por el



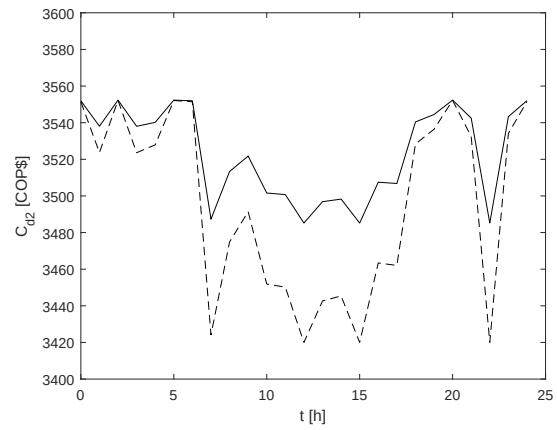
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7. Costos instantáneos de generación para microrred aislada ante condiciones de carga constante: (a) fotovoltaico C_f , (b) eólico C_e , (c) Diesel 1 C_{d1} , (d) Diesel 2 C_{d2}

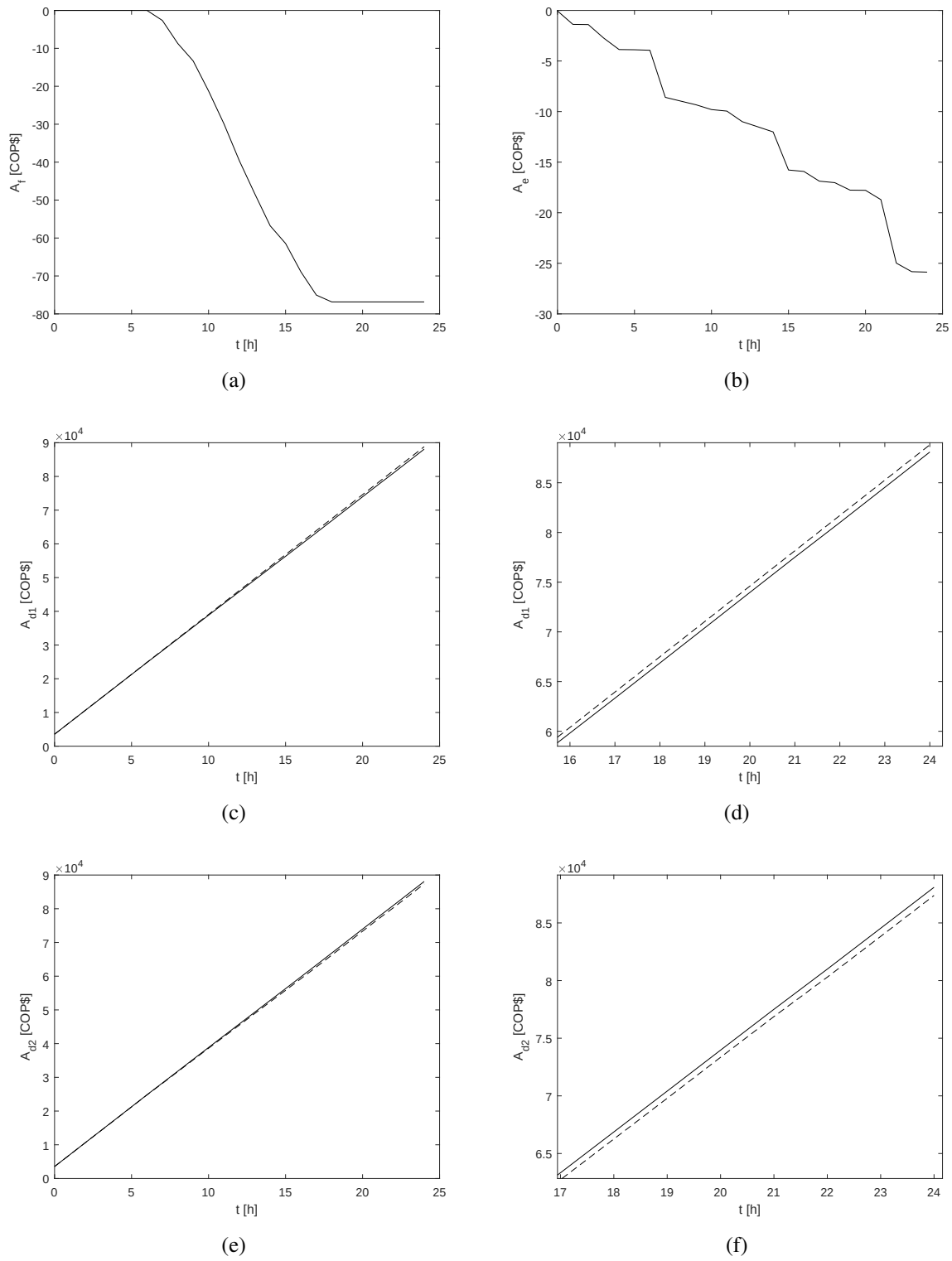


Figura 8. Costos acumulados de generación para microrred aislada ante condiciones de carga constante: (a) fotovoltaico A_f , (b) eólico A_e , (c) Diesel 1 A_{d1} , (d) detalle en Diesel 1 A_{d1} , (e) Diesel 2 A_{d2} , (f) detalle en Diesel 2 A_{d2}

Tabla 3

Comparativo valores de costo acumulado para diferentes escenarios de operación del sistema

Caso	Costo acumulado final	Ahorro
Sólo Diesel	COP \$177626.25	COP \$0
RAPSim	COP \$176093.59	COP \$1532.66
Óptimo MATLAB	COP \$176076.35	COP \$1549.90

trazo continuo) logra reducir levemente el costo obtenido mediante programación en la herramienta

RAPSim, permitiendo confirmar el carácter óptimo del algoritmo implementado.

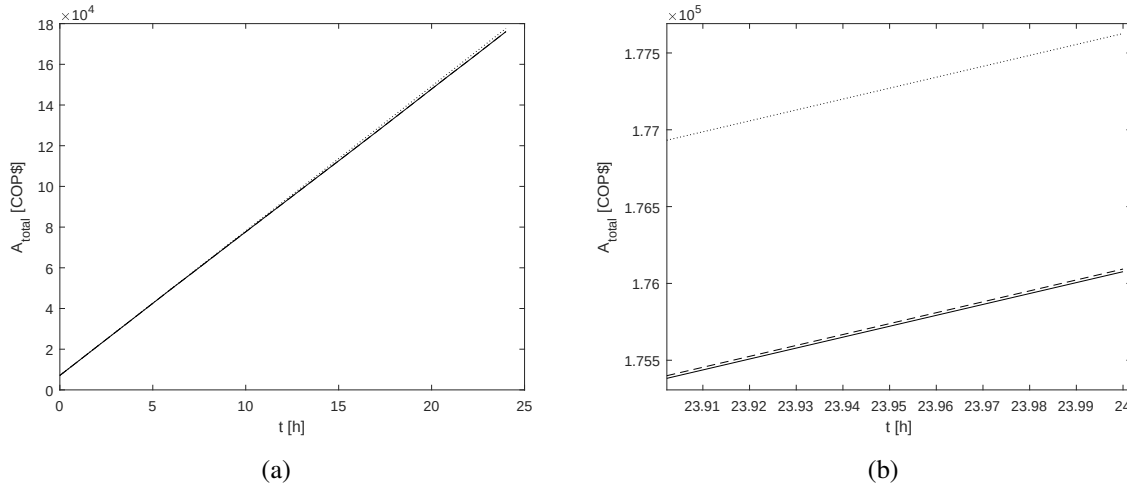


Figura 9. Costo acumulado total de generación para microrred aislada ante condiciones de carga constante: (a) costo total A_{total} , (b) detalle en costo total A_{total}

La Tabla 3 enfatiza este detalle al verificar un ahorro de COP \$1549.90 en el consumo diario.

A partir de dicho resultado es posible proponer una prueba final, correspondiente con la programación óptima de potencias de generación para el caso en el cual la carga varía aleatoriamente entre 0 y 1 kW. Los resultados de simulación para este caso se presentan en la Fig. 10 de

la cual es posible observar la manera en la cual los generadores Diesel manifiestan nuevamente un comportamiento duplicado, con variaciones consistentes a los cambios presentados en los valores de carga (ver Fig. 11(a)). El costo final acumulado para este caso, de operación del sistema durante 24 horas continuas, es de COP \$173027.04, según se ilustra en la Fig. 11(b).

5. Recomendaciones

En favor de maximizar el efecto de reducción de costos entre la simulación de *RAPSim* y el algoritmo de despacho económico implementado en MATLAB, es necesario que la función de costo del generador *Diesel* sea cuadrática. De esta manera, es posible asegurar que la asignación de potencias dada por el algoritmo de optimización evidencie una penalización de costo y no se base en una simple distribución de potencias.

Dicho de otro modo, si la función de costo del generador *Diesel* es lineal (i.e. $\gamma_i = 0$), sin importar la manera en que se distribuya la potencia entre los generadores *Diesel* 1 y *Diesel* 2, el costo total será igual tomando en cuenta que para cada instante del tiempo la potencia entregada por los generadores *Diesel* es simplemente la diferencia entre la demanda y el recurso renovable disponible. Contrario a esto, si el costo es no lineal, será relevante el valor que tome cada generador *Diesel*, puesto que ante esta situación no podrá aplicarse la superposición de costos; es decir:

$$C_{d1} + C_{d2} \neq K(P_{d1} + P_{d2}).$$

Por tanto, en la medida que la forma cuadrática para la función de costo se acentúe de forma más pronunciada en el intervalo de potencia para el cual se realice el análisis, más evidente será la

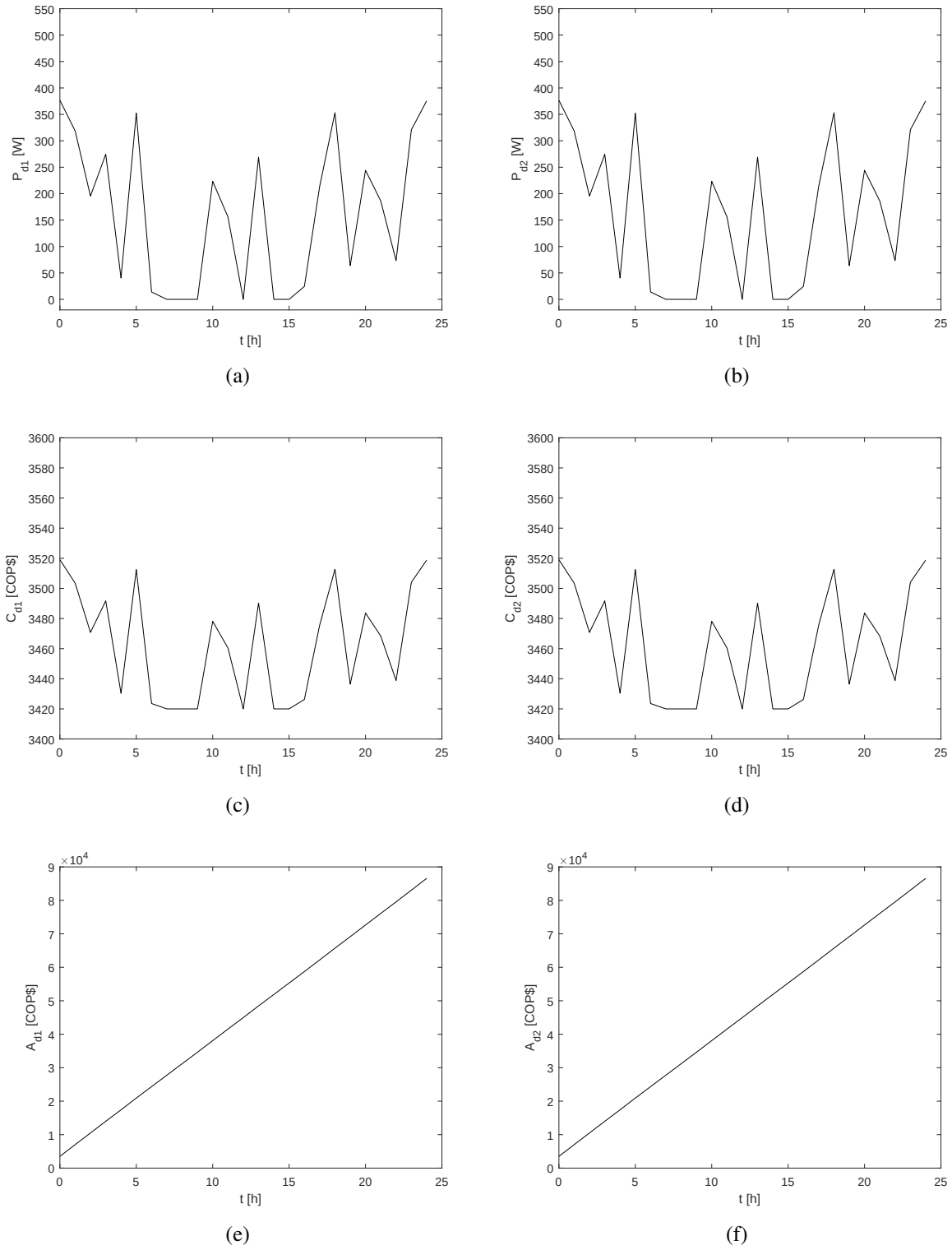


Figura 10. Simulación para despacho económico en microrred aislada ante condiciones de carga variable: (a) potencia Diesel 1 P_{d1} , (b) potencia Diesel 2 P_{d2} , (c) costo Diesel 1 C_{d1} , (d) costo Diesel 2 C_{d2} , (e) acumulado Diesel 1 A_{d1} , (f) acumulado Diesel 2 A_{d2}

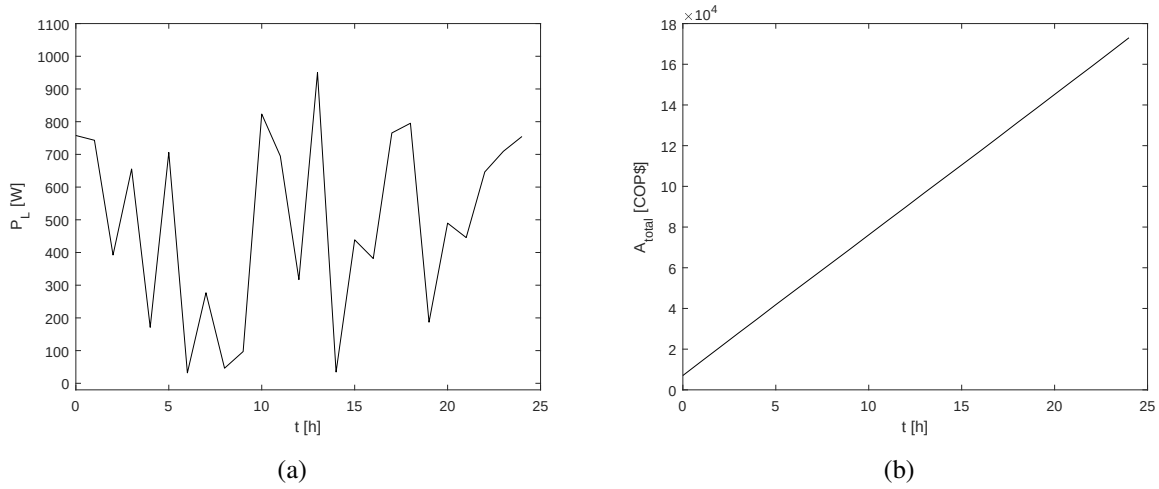


Figura 11. Costo acumulado total de generación para microrred aislada ante condiciones de carga variable: (a) variaciones de potencia en carga P_L , (b) costo total A_{total}

reducción de costo a través del algoritmo de optimización.

Tomando como base lo anterior, se recomienda una revisión de los coeficientes presentados en la Ec. (24), para ser adecuados a una forma cuadrática más acentuada en el rango de potencias cercanas a 0.5 W.

6. Trabajo futuro

Actividades complementarias a los desarrollos presentados, incluyen la incidencia en el comportamiento óptimo del despacho de dinámicas de los lazos de control que garantizan las condiciones nominales de operación en las fuentes.

Adicionalmente, será interesante el análisis de una estrategia de despacho económico sobre una microrred aislada real, para verificar las predicciones de simulación propuestas en el presente

trabajo de grado.

7. Conclusiones

El presente trabajo de grado, fue desarrollado en el marco del proyecto de investigación denominado: “*Control centralizado para un sistema de generación de energía con potencial aplicación en zonas rurales del departamento de Santander*”, financiado por la Universidad Industrial de Santander a través del código VIE-UIS 2479.

A partir de los desarrollos presentados y los resultados obtenidos, es posible enunciar la siguiente conclusión general:

Se diseñó y simuló la gestión optimizada de recursos energéticos en una microrred empleando despacho económico. En particular, empleando la función *fmincon(.)* de MATLAB se programó una estrategia óptima para seleccionar los valores de potencia nominal de dos generadores *Diesel*, en función de la disponibilidad de recursos energéticos renovables de tipo eólico y fotovoltaico, a partir de estimación de los costos asociados a cada tipo de fuente. Tomando como referencia una herramienta disponible para simulación de microrredes (*RAMSim*), fue posible obtener a partir del método implementado una reducción de costo para satisfacer la demanda energética en una carga constante.

De manera más puntual:

Se estableció la topología para una microrred aislada con al menos dos tipos de fuente, como caso de estudio para el problema de gestión óptima de recursos energéticos. Tal y como fue abordado en el *Capítulo 3*, se realizó la definición conceptual de una microrred aislada y a partir de ello se justificaron valores para una configuración específica en la Sección 3.1.3, permitiendo obtener como caso de estudio la configuración ilustrada en la Fig. 3.

Se aplicó una técnica de despacho económico sobre la microrred, que permitió optimizar una variable relevante en la operación del sistema. Para ello, inicialmente, se introdujo formalmente el concepto de despacho económico en el *Capítulo 2*, ilustrando las definiciones mediante un ejemplo. Asimismo, se definieron y analizaron a lo largo del *Capítulo 4* las premisas correspondientes a la formulación de funciones de costo para el caso específico de recursos de tipo renovable y no renovable, presentando los resultados visualizados a partir de las Figs. 6, 7, 8 y 9, además de la Tabla 3, para el caso de una carga fija. Resultados adicionales se presentaron para el caso de una carga variable.

Se analizó mediante comparación por simulación, la operación del sistema optimizado con respecto al mismo sistema ante condiciones no óptimas, como estrategia de validación para el método propuesto. Más precisamente, tal y como se muestra en la Fig. 9(b) y en la Tabla 3, fue posible evidenciar una reducción de costo acumulado total para satisfacer la demanda de la carga, en comparación con el peor caso (correspondiente con el sólo recurso no renovable) y la simulación dada por un algoritmo de referencia (*RAPSim*).

Referencias Bibliográficas

- Amin, A. Z. (2017). *Renewable Power Generation Costs*. International Renewable Energy Agency.
- Arango, D., Urrego, R., and Rivera, S. (2017). Despacho económico en microredes con penetración de energía renovable usando algoritmo de punto interior y restricciones lineales. *Universidad EAFIT, Facultad de Ingenierías*, 13(25):123–152.
- Arguello S, J. V. and Contreras B., C. J. (1982). Implementación y estudio comparativo de los modelos para despacho económico utilizando las técnicas del gradiente reducido y la matriz hessiana. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista), Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Castilla Amell, V. and Gambin Blanco, J. C. (1988). Despacho económico de sistemas de potencia - análisis comparativo de los modelos matemáticos. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista), Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Cortes Fuertes, L. A. (2016). Operación eficiente de almacenadores de energía en micro-redes. Trabajo de grado (Ingeniera Electricista), Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- Díaz González, C. (2017). Despacho económico de cargas en sistemas eléctricos de potencia: modelado, simulación y análisis. Tesis de maestría (Magister en Ingeniería de Minas), Universidad de Oviedo. Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo.

Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2007). Guía Básica de la Generación Distribuida. Technical report.

Garrido Fuhrop, Y. N. (2016). Modelo de despacho económico para sistemas medianos. Trabajo de grado (Ingeniero Civil Eléctrico), Universidad de Chile, Chile.

Giraldo Gómez, W. D. (2016). Metodología para la gestión óptima de energía en una micro red eléctrica interconectada. Tesis de maestría (Magister en Ingeniería Eléctrica), Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Energía Eléctrica y Automática.

Gómez, R. (1987). Despacho de sistemas de potencia utilizando el costo incremental de cada barra. Trabajo de grado (Ingeniero Eletricista), Universidad Industrial de Santander, Colombia.

González, N., Cusguen, C., Mojica Nava, E., and Pavas, A. (2017). Estrategias de control de calidad de energía en microrredes rurales. *UIS Ingenierías*, 16(2):93–104.

Hadi, S. (1999). *Power System Analysis*. McGraw-Hill.

Hoogwijk, M. M. (2004). *On the global and regional potential of renewable energy sources*. Ph.D. Thesis at Faculteit Scheikunde, Universiteit Utrecht.

Inc., T. M. (2003). Optimization toolbox for use with Matlab: User's Guide. Technical report.

Lanas Montecinos, F. J. (2011). Desarrollo y validación de un modelo de optimización energética para una microrred. Trabajo de grado (Ingeniero Eletricista), Universidad de Chile, Chile.

- Morales C, C. M. (2014). *Finanzas del proyecto: introducción a las matemáticas financieras*. Centro Editorial Esumer. Medellín - Colombia.
- Pablo, F. J. (2011). Revisión bibliográfica sobre microrredes inteligentes. Memoria de trabajos de difusión científica y técnica 9, Universidad de Montevideo, Uruguay.
- Pinto, R., Carvalho, L. M., Sumaili, J., Pinto, M. S. S., and Miranda, V. (2015). Coping with wind power uncertainty in unit commitment: A robust approach using the new hybrid metaheuristic deepso. In *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, pages 1–6.
- Pochacker, M., Tamer, K., and Wilfried, E. (2014). The Microgrid Simulation Tool RAPSIm: Description and Case Study. In *2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*, pages 278–283.
- Pérez Fernández, P. (2017). Descripción e infraestructura de una microrred para un entorno residencial. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista), Universidad de Valladolid, Valladolid, España.
- Romero Hernández, S., Romero Hernández, O., and Wood, D. (2011). *Energías Renovables: Impulso político y tecnológico para un México sustentable*. Abt Associates, Inc.
- Serrano Reyes, A. F. and Zarate Torres, E. N. (2014). Estudio de la prospectiva y viabilidad de las energías renovables eólica y solar en Colombia a 2050 por medio del software leap. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista), Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Surender, S., Bijwe, P., and Abhyankar, A. (2015). Real-time economic dispatch considering rene-

wable power generation variability and uncertainty over scheduling period. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(4):124–140.

Torres Manrique, J. E. and May Dulcey, A. (1979). Optimización del modelo para despacho económico en sistemas de potencia. Trabajo de grado (Ingeniero de Sistemas), Universidad Industrial de Santander, Colombia.

Trujillo Rodríguez et al, C. L. (2015). *Microrredes Eléctricas*. Editorial Universidad Distrital Bogotá.

Unidad de Planeación Minero Energética (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. CONVENIO ATN/FM-12825-CO.

UPME-IDEAM (2006). Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia. Technical report, Colombia.

Apéndices

Apéndice A. Simulador RAPSim

RAPSim es un software libre de código abierto que permite simular flujos de potencia de microrredes eléctricas, al tiempo que determina una disposición óptima de las unidades de generación distribuida.

Proporciona una interfaz gráfica para crear los escenarios previstos y controlar las funciones del simulador, tal como se observa en la Fig. 12 de la cual se resaltan los siguientes elementos:

- *Campo de simulación:* espacio donde se ubican y conectan los objetos o elementos de la microrred para la posterior visualización de su operación.
- *Barra de propiedades:* proporciona una serie de funciones y comandos que facilitan la manipulación de la información que se encuentra en el sistema construido.
- *Barra control de simulación:* permite dar inicio, pausar, detener, refrescar los parámetros o simplemente deshacer una acción de la simulación. También muestra el tiempo de simulación y los factores climáticos, como el factor de nubosidad y la velocidad del viento, que se van tomando en el transcurso de la simulación.
- *Barra de colores:* proporciona información directa sobre el estado actual de los objetos mediante el uso de mapas de calor. El color verde representa la entrega o consumo significativo

de potencia por parte del generador y la carga, respectivamente, caso contrario a lo que indica el color rojo.

- *Barra de herramientas*: permite seleccionar elementos para construir una microrred eléctrica, ya sea de forma aislada o conectada a la red.

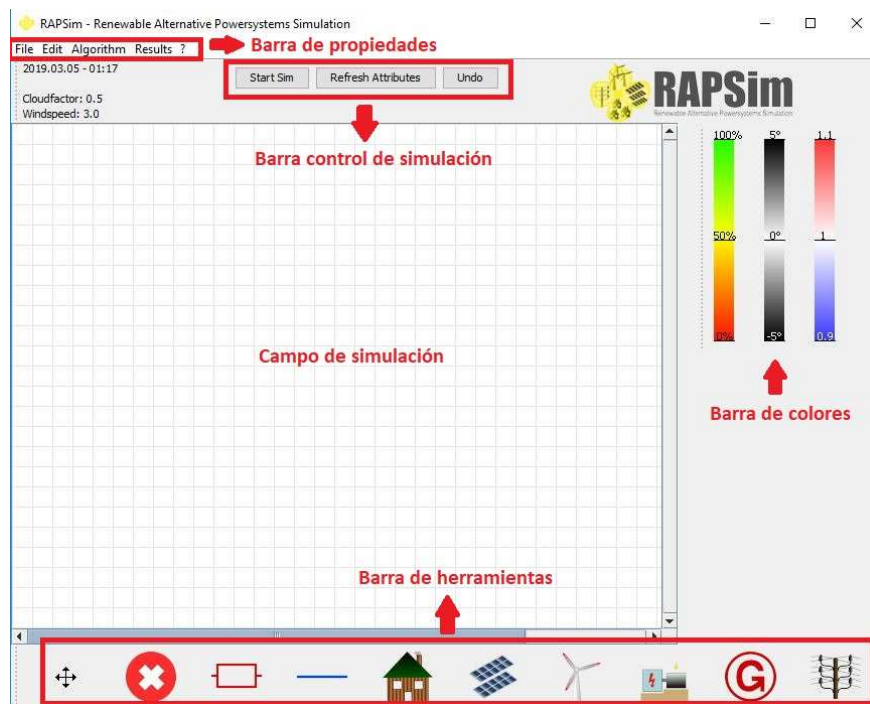


Figura 12. Ventana principal de RAPSIm

Desarrollo de rutinas en RAPSIm

Para presentar otros elementos importantes del simulador, se introducirá a continuación la descripción del procedimiento llevado a cabo para la configuración de una microrred en *RAPSIm*, correspondiente con la alimentación de dos cargas residenciales a partir de un panel fotovoltaico que cuenta con el respaldo de la red eléctrica.

Creación de programa. Inicialmente, en la ventana principal se selecciona la opción “File” llevando a cabo los siguientes pasos, ilustrados en la Fig. 13: 1)File -> 2)New -> 3)Clear grid -> 4)Nombre de archivo -> 5)Abrir.

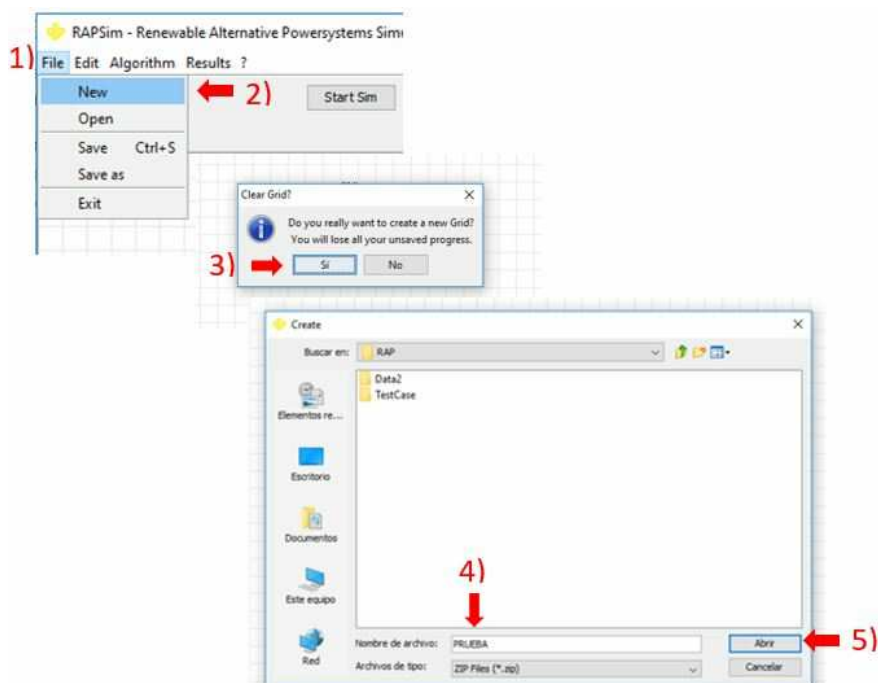


Figura 13. Secuencia de pasos para crear un campo de operación para una microrred

Una vez creado y guardado el campo de operación de la microrred, se deben seleccionar el algoritmo de simulación (que se encuentra en la barra de propiedades) y los elementos u objetos que conformarán el sistema mediante una barra de herramientas que cuenta con dos generadores renovables, dos convencionales, la red eléctrica, cargas, cable e impedancias para las conexiones y opciones de mover o borrar objetos.

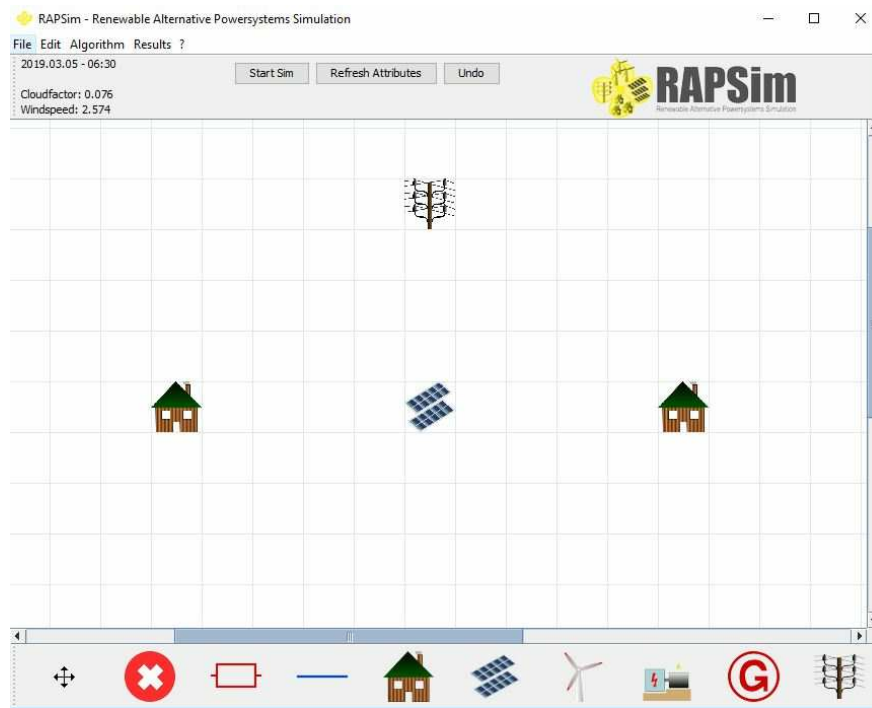


Figura 14. Microrred de prueba

Posteriormente, cada objeto seleccionado, sea fuente o carga, debe configurarse haciendo click derecho sobre cada elemento ubicado en el campo. En la ventana emergente se selecciona el modelo de operación del objeto y se definen ciertos parámetros. En el caso del panel fotovoltaico se define su eficiencia, junto con la altitud, latitud y longitud del sitio. Para la carga sólo se define la potencia nominal.

Para el ejemplo en cuestión, se consideró el *Solar Peak Power Model*, que permite establecer características geográficas del lugar de instalación, haciendo más real el sistema fotovoltaico. La carga se tomó constante. La red eléctrica no cuenta con un modelo de operación especificado, simplemente suministra de manera continua la potencia necesaria para satisfacer la demanda. La

Fig. 15 muestra el sistema empleado como ejemplo y la ventana de propiedades de cada generador y carga junto con los parámetros definidos.

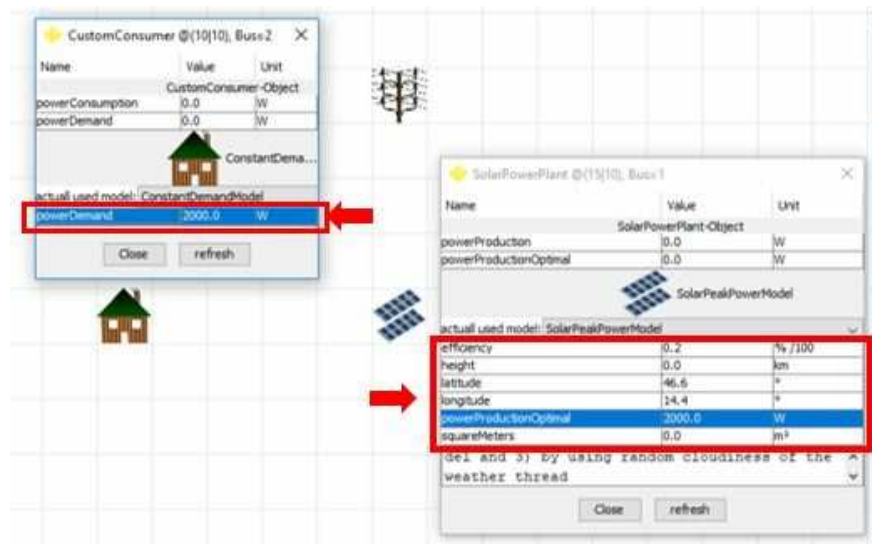


Figura 15. Microrred de prueba

Conexión y ejecución del programa. Para la conexión de los elementos se selecciona el cable de la barra de herramientas y se marca el camino haciendo click sobre la cuadrícula. La impedancia de la línea se asume despreciable, por ende no se incluye su respectivo objeto. Dando por terminado el cableado, se procede a dar inicio a la simulación, aprovechando que se cuenta con un hilo de tiempo que modela la fecha de inicio y fin de la compilación, junto con el intervalo de tiempo en que se desea realizar (cada hora, minuto). Ya definido lo anterior se establece la dirección de la carpeta donde se desea guardar el archivo *EXCEL* que contiene los datos generados (potencias generadas, óptimas y consumidas). Por último, se pulsa *Start Simulation* tal y como lo sugiere la Fig. 16.

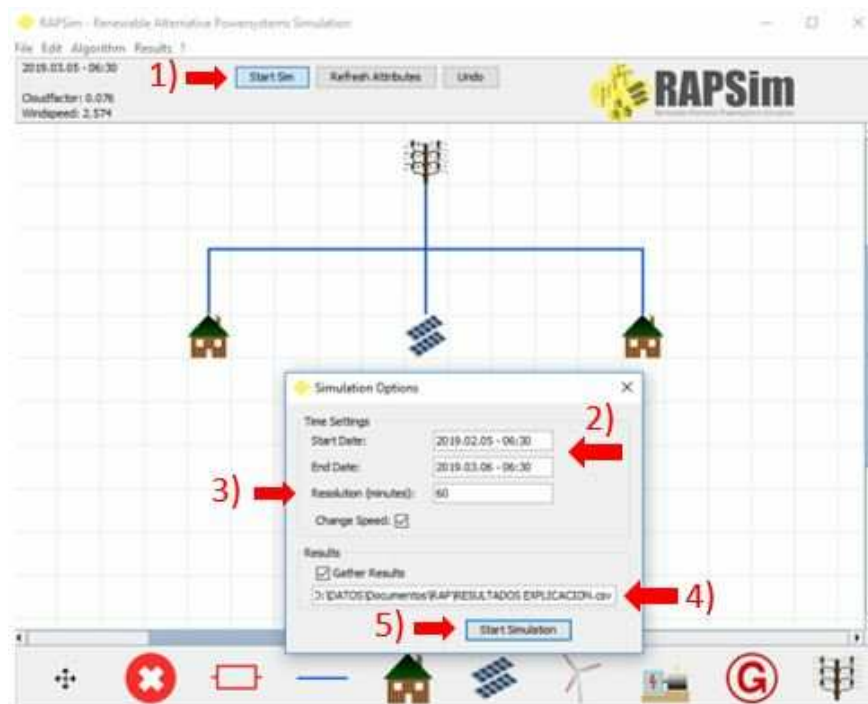


Figura 16. Ejecución de simulación

Si se desea visualizar el estado de generación de las fuentes y el consumo de la carga, se activa la superposición de color antes de iniciar la simulación, con la siguiente secuencia: 1) *Edit* -> 2) *Color Overlays* -> 3) *Show all* según ilustrado en la Fig. 17.

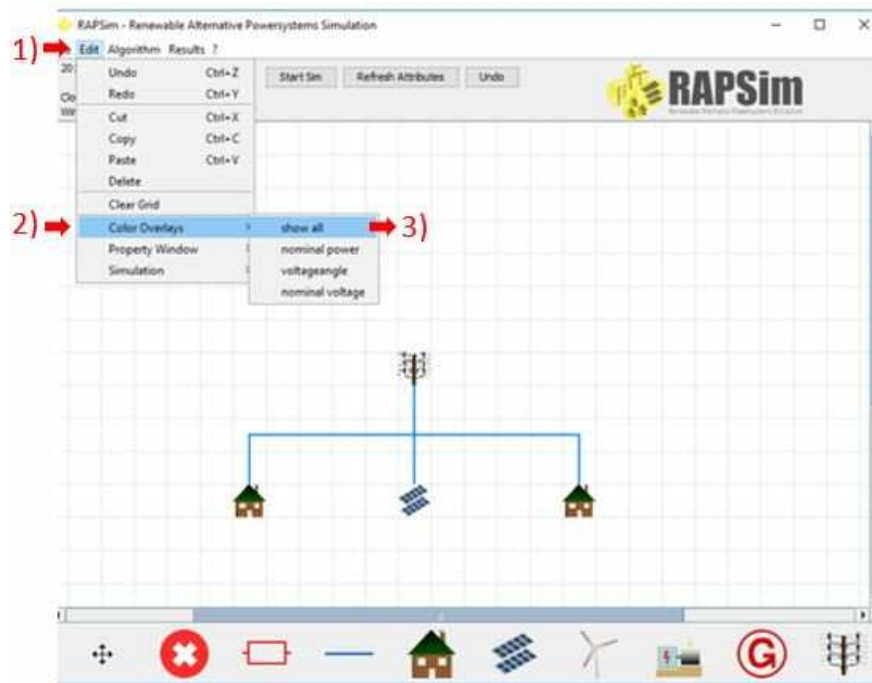


Figura 17. Activación superposición de colores