



INAOE

**Algoritmo Metaheurístico Basado En Sistemas De
Hormigas Para La Administración De Energía En
Microredes Industriales**

Por:

Daniel Ferney Hernández Joya

Tesis sometida como requisito parcial
para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN LA ESPECIALIDAD DE
ELECTRÓNICA**

en el

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica
Tonantzintla, Puebla
Julio del 2013

Supervisado por:

Dr. Jorge Martínez Carballido

©INAOE 2013

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir
copias de esta tesis en su totalidad o en partes.



Resumen

A la fecha de la escritura de este trabajo existen dos problemas principales que recaen sobre el sistema eléctrico de cualquier país. Por un lado se encuentra la creciente preocupación hacia temas como el cambio climático y el calentamiento global. El actual sistema eléctrico basa su generación principalmente en la quema de combustibles fósiles, haciendo de este sistema uno de los más contaminantes en el mundo en cuanto a gases de efecto invernadero se refiere. Por otro lado, la creciente demanda de electricidad está alcanzando límites inesperados y si este crecimiento sigue los ritmos que lleva, el sistema eléctrico eventualmente fallará por una falta de infraestructura. Estos dos problemas pueden ser resueltos de dos maneras distintas: la integración de fuentes renovables de energía y el uso de energía de una mejor manera. Trabajar con energías alternativas requiere tener en consideración un régimen fluctuante, pero una combinación híbrida de fuentes de energía alternativa puede mejorar la estabilidad y confiabilidad del suministro eléctrico.

La interconexión de pequeños generadores, sistemas de almacenamiento de energía y cargas se conoce como microred. Pequeñas y medianas empresas empiezan a tener interés en implantar microredes en su empresa. La correcta administración e implementación de una microred provee una plataforma adecuada para una integración masiva de energías alternativas, pero este marco de trabajo encara cierto tipo de retos. Este trabajo presenta la problemática que rodea la administración de energía en microredes y propone un algoritmo metaheurístico basado en colonias de hormigas enfocado a microredes industriales. Este algoritmo toma en cuenta el mercado eléctrico y un enfoque de generación local con el propósito de beneficiar a usuarios, empresas del servicio eléctrico y el medioambiente.

Abstract

At the time of this writing there are two main problems for the electric power system at any country. On the one hand the concern about the climate change and global warming. The current utility power system is mainly based on fossil fuels making this system one of the main pollutants around the globe. On the other hand, the growing demand for electricity has reached unexpected limits and if this demand continues to grow, the electrical power system will eventually go down because of a lack of infrastructure. These problems can be solved in two different ways: the integration of renewable sources of energy and by a wiser usage of electricity. Working with alternative energy requires considering a fluctuating regime, but a hybrid combination of alternative energy sources can improve the stability and reliability of supply.

The interconnection of small generators, energy storage systems and loads is known as a microgrid. Small and medium sized companies are having ever more interest to implement microgrids at their sites. Correct management and implementation of the microgrids provides an adequate platform for massive integration of alternative energy, but this framework faces certain types of challenges. This thesis work presents key problems surrounding the microgrids energy management and proposes a meta-heuristic algorithm based on ant systems focused on industrial microgrids. This algorithm takes into account the electricity market framework and a local generation approach aims to benefit users, the utilities and the environment.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado a través de la beca para estudios de maestría.

Al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y a la Coordinación de electrónica por abrirme las puertas para realizar los estudios de posgrado y todas las facilidades que me otorgaron durante mis estudios de maestría.

A mi asesor, Dr. Jorge Martínez Carballido por el conocimiento y formación académica que he recibido de su parte además de su apoyo en la realización de esta tesis.

A mis sinodales, Dr. Juan Manuel Ramírez Cortés, Dr. José de Jesús Rangel Magdaleno, M.C. Jorge Miguel Pedraza Chávez, por sus observaciones y comentarios en la revisión de esta tesis.

Al personal del INAOE por el soporte y ayuda que prestan a los estudiantes.

Índice

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Energías Renovables/Alternativas	4
1.3. Microredes y Redes Inteligentes (<i>Smart Grids</i>)	6
1.4. Sistemas Híbridos de Energía	10
1.5. Estructura de la tesis	14
1.6. Resumen	15
Capítulo 2. Descripción Del Problema	17
2.1. Problemas Involucrados	17
2.2. Trabajos Relacionados	23
2.3. Marco De Trabajo	24
2.4. Problema a Resolver	26
2.5. Generalidades de la solución	29
2.6. Resumen	30
Capítulo 3. Diseño de la Solución	33
3.1. Conceptos Básicos De Los Algoritmos ACO	34
3.2. Representación del problema	35
3.3. Estructura del Algoritmo	44
3.4. Resumen	48
Capítulo 4. Experimentación y Análisis de Resultados	51
4.1. Parámetros del problema	51
4.2. Análisis de resultados	54
Capítulo 5. Conclusiones y Trabajo Futuro	69
5.1. Conclusiones	69
5.2. Trabajo Futuro	72
Referencias	75
Apéndice A : Herramienta de pruebas	81

Parámetros del algoritmo _____	81
Gráficas _____	82
Apéndice B: Publicaciones derivadas del trabajo _____	87
Lista de Figuras _____	89
Lista de tablas _____	91

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

Dado el ritmo acelerado del crecimiento poblacional y el desarrollo tecnológico, la humanidad se encuentra atravesando condiciones que ponen en riesgo el bienestar, la salud e inclusive la existencia de seres vivos; por lo que se deben tomar medidas apropiadas para mitigar estos riesgos. Según el Informe Brundtland de 1987 [1], la sostenibilidad se define como: *“satisfacer las necesidades de la actual generación sin sacrificar la capacidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades”*. Problemas de sostenibilidad tales como el manejo de basuras, uso racional del agua y el cambio climático son algunos de los retos que se deben afrontar en el siglo XXI para poder asegurar nuestra supervivencia [2].

El problema de sostenibilidad energética es uno de los más reconocidos a nivel mundial dada su relación directa con los gases de efecto invernadero y por consiguiente el calentamiento global. Este último de los factores que más estragos ocasiona a lo largo del planeta debido al calor extremo, olas de calor y precipitaciones cada vez más fuertes [3]. Numerosos acuerdos se han realizado con el fin de frenar el calentamiento global, entre ellos el más representativo es el protocolo de Kioto que promueve una reducción de gases de efecto invernadero en países seleccionados de acuerdo a su nivel de desarrollo. La Tabla 1.1 muestra una lista de los compromisos adquiridos por algunos países en cuanto a porcentaje en reducciones de gases de efecto invernadero [4], los porcentajes para algunos países pueden llegar a ser negativos, es decir, que pueden incrementar sus emisiones en consecuencia a su alto nivel de desarrollo y pocas emisiones de gases contaminantes. La idea de sustentabilidad energética al día de hoy envuelve

únicamente compromisos, no obstante se espera esta situación se torne de carácter obligatorio en un futuro próximo.

La mayoría de los sistemas energéticos a nivel global se basan en la obtención de energía a través de la quema de combustibles fósiles, cerca del 81% del suministro total de energía primaria a nivel mundial en el 2010 fue en base a este tipo de combustibles, además, 30326 Mt (Millones de toneladas) de CO₂ se liberaron a la atmosfera en el 2010 y tan sólo el 0.4% de este valor no corresponde a la quema de combustibles fósiles [5]. La explotación extensiva de estos recursos energéticos ha llevado a pensar que su disponibilidad se agote antes de lo esperado, obligando la búsqueda de otro tipo de fuentes de energía.

La generación de electricidad es uno de los sistemas que más hace uso de la quema de combustibles fósiles para su operación. Más del 67% de la electricidad generada en el 2010 a nivel mundial fue en base a combustibles fósiles [6]. La Figura 1.1 muestra los porcentajes de combustibles usados en la generación de electricidad a nivel mundial para el 2010 donde “Otros” hace referencia a fuentes eólicas, solares, geotérmicas, biocombustibles y desperdicios. Por otra parte, el 41% de las emisiones de CO₂ en el 2010 se debe a la producción de electricidad y calor [5], esto hace del sistema eléctrico uno de los principales contaminantes por emisión de gases de efecto invernadero. Por otra parte, los combustibles fósiles se consideran no renovables y su explotación es limitada. En menos de tres siglos desde la revolución industrial, los seres humanos han quemado aproximadamente la mitad de los combustibles fósiles acumulados durante cientos de millones de años [4], hecho que podría llevar a una crisis energética de no tomar acciones correctivas.

PAÍS	REDUCCIÓN DE EMISIONES(%)
Australia	-8
Canadá	+6
Croacia	+5
Unión Europea	+8
Hungría	+6
Islandia	-10
Japón	+6
Nueva Zelanda	0
Noruega	-1
Polonia	+6
Rusia	0
Suiza	+8
Ucrania	0
Estados Unidos	+7

Tabla 1.1. Compromisos en reducción de emisiones en países seleccionados.

El actual sistema eléctrico lleva en funcionamiento ya varias décadas en muchos países, sin conseguir un avance tecnológico acorde a los varios desafíos que enfrenta hoy día [7]. La demanda de electricidad ha crecido y seguirá haciéndolo a ritmos acelerados, la población mundial se proyecta sobrepase los 9000 millones de habitantes para el 2050 [8], y para cubrir esta demanda no se ha hallado hasta el momento otra salida sino remplazar la infraestructura ya existente por una de mayor capacidad. Por otra parte, dada la naturaleza de generación centralizada de la red eléctrica, las empresas de servicios públicos han tenido que invertir en líneas de transmisión para largas distancias y poder llegar a la mayoría de los usuarios [9]. Por estos y otros problemas, sin olvidarse de la dependencia a los combustibles fósiles y los grandes problemas ambientales que vienen generando, es que grandes esfuerzos se han puesto en cambiar los sistemas

eléctricos como se conocen actualmente. Para la solución de dichos problemas existen dos enfoques de solución que operando de forma complementaria pueden cubrir excelentes resultados. El primero de ellos es la integración de energías renovables como principales fuentes de energía, y por otro lado un uso racional y más eficiente de la energía. Estos dos enfoques son incluidos en una de las soluciones propuestas en esta tesis y se verá con más detalle en el Capítulo 4.

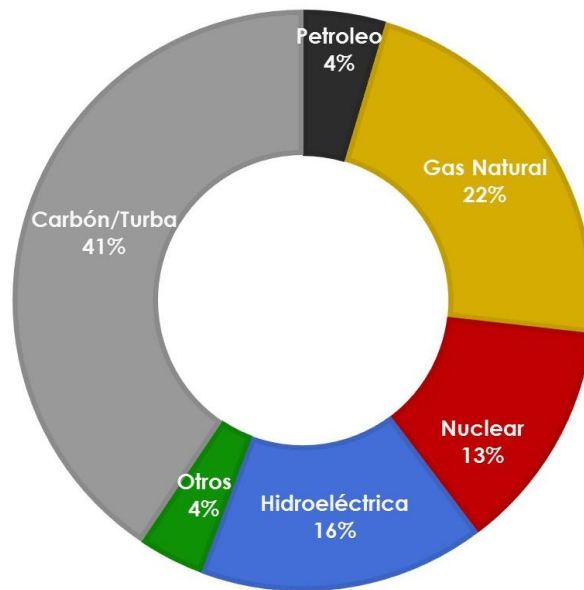


Figura 1.1. Porcentajes de combustibles usados en la generación de electricidad a nivel mundial.

1.2. Energías Renovables/Alternativas

Una pieza fundamental en la revolución tecnológica que exigen las redes eléctricas actuales y el concepto de sostenibilidad energética se encuentra en el uso de energías renovables y/o alternativas que de aquí en adelante se llamarán “energías alternativas”. Las energías alternativas se caracterizan por tener bajas emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con la quema de combustibles fósiles, por otro lado, la vastedad de algunas

de sus fuentes las hacen considerar “inagotables” y por último, los avances tecnológicos han hecho posible el desarrollo de un amplio conjunto de este tipo de energías [4].

El uso a gran escala de las energías alternativas reducirá en gran proporción la emisión de gases de efecto invernadero logrando estabilizar el cambio climático y por otro lado, podrá eliminar la dependencia hacia los combustibles fósiles y suplir los desafíos en cuanto demanda eléctrica se refiere. Varios estudios muestran que la fuente eólica utilizable para generación de electricidad supera el doble de la demanda eléctrica proyectada para el 2020, de manera equivalente, el potencial de energía solar corresponde a casi 10,000 veces el suministro total de energía primaria en la tierra [4]. Entre otros beneficios del uso de energías alternativas, por concepto de ser generadores distribuidos, se encuentran: reducción de pérdidas por transmisión, regulación de voltaje, control del factor de potencia, y balance de fase. Por último el uso de energías alternativas permite la electrificación de zonas rurales sin costosas y complicadas infraestructuras en las redes de transmisión, este beneficio podrá llevar desarrollo tecnológico a las áreas más alejadas de las zonas urbanas [10].

Existe un factor importante que ha impedido la implementación y el uso de algunas de las energías alternativas y es el régimen fluctuante bajo el que trabajan algunas fuentes como las eólicas y solares. Una alternativa para suavizar este comportamiento es la implementación de sistemas de almacenamiento de energía, que ha tenido un significativo desarrollo durante los últimos años a la par con las energías alternativas [11]. A pesar de esto, su implementación genera un impacto económico negativo debido a que incrementa los costos de inversión en la comercialización de las energías alternativas.

1.3. Microredes y Redes Inteligentes (*Smart Grids*)

El sistema eléctrico actual fue diseñado para operar en una misma dirección, donde el flujo de energía comienza en la generación, pasa por las redes transmisión y posteriormente a las de distribución para llegar finalmente a los usuarios. Dados los nuevos desafíos que enfrentan los sistemas eléctricos actuales, estos sistemas tendrán que convertirse en lo que los expertos denominan “redes inteligentes” que involucra un rápido cambio tecnológico, que entre otras cosas encierra la integración de energías alternativas. Dentro de las características que deberá tener esta nueva y mejorada red eléctrica se encuentran [12]:

- Participación activa de los usuarios mediante programas de respuesta a la demanda y la inserción de fuentes de energía distribuidas. Esta implementación en masa de recursos de energía distribuidos obliga a una red con características modulares donde los recursos energéticos y de almacenamiento de energía puedan conectarse y desconectarse de la red sin inconvenientes.
- Mejora de la calidad de la energía mediante sistemas de control y dispositivos electrónicos de potencia.
- Respuestas anticipadas ante perturbaciones (auto-reparación) donde la red automáticamente detecta y responde a problemas minimizando el impacto a los consumidores.
- Seguridad ante posibles ataques y desastres naturales donde el sistema debe responder con capacidades rápidas de restauración del servicio eléctrico.

Para contar con estas características, las redes inteligentes deben contar, entre otras tecnologías, con: comunicaciones digitales de doble sentido, capacidades modulares, infraestructuras de medición avanzadas (sensores inteligentes), interoperabilidad basada en estándares, y comunicaciones y electrónica de bajo coste. Por otra parte, existen desafíos que se deberán afrontar tales como: realizar monitoreo en tiempo real, poder operar de manera predictiva-anticipada, adaptarse al régimen de generación distribuida, tratar con una demanda de régimen estocástico entre otros [12].

En la integración de energías alternativas en las redes inteligentes, el concepto de microred provee una plataforma adecuada para su implementación en forma masiva [13]. Las microredes corresponden a redes de suministro diseñadas para alimentar cargas eléctricas y térmicas en una pequeña comunidad. Una microred es en esencia un conglomerado de generadores distribuidos (DG), sistemas de almacenamiento de energía (DS) y diferentes cargas a un nivel de voltaje de distribución (Figura 1.2) que puede operar tanto conectado a la macrored o de manera aislada e independiente. Una microred se adhiere a la red tradicional en un punto conocido con el punto de acoplamiento común (PCC) ubicado en el lado de bajo voltaje de un transformador de subestación. A diferencia de la red convencional, una microred posee micro-fuentes de capacidad mucho menor a los grandes generadores convencionales, por otro lado, la potencia generada a voltaje de distribución alimenta las cargas cercanas sin necesidad de atravesar grandes líneas de transmisión, por último, la potencia generada cerca a los usuarios puede ser entregada eficientemente con perfiles de voltaje y frecuencia satisfactorios [10].

Desde el punto de vista de la red tradicional, las microredes pueden ser tratadas como una entidad controlada y puede operarse como una simple carga agregada. En una microred el suministro ha de ser ininterrumpido y confiable. Por último, desde el punto de vista ambiental la reducción de

pérdidas por transmisión y el uso de fuentes energéticas de bajas emisiones apuntan a una contribución en la reducción del calentamiento global [10].

Debido a que las microredes están diseñadas para operar en redes de distribución se debe tener en cuenta una restricción de potencia, regularmente la capacidad máxima está limitada a 10MVA por recomendaciones del IEEE. Sin embargo es posible suministrar energía a grandes cantidades de cargas a través de varias microredes en una misma red de distribución; separando la carga total en varias unidades de carga controlables. La implementación de microredes trae consigo distintas ventajas técnicas, económicas y medioambientales, dentro de las principales se encuentran [10]:

1. Beneficios medioambientales: por dos principales razones; el uso de fuentes de energía de bajas emisiones y partículas contaminantes y por otro lado el hecho de que la energía se genere cerca a las cargas disminuye las pérdidas totales por transmisión permitiendo generar menos energía para satisfacer la misma demanda.
2. Reducción en costos de inversión y operación: de igual manera, generar la energía cerca de las cargas que la consumen reduce los costos de inversión en nuevas y más grandes líneas de transmisión y su respectivo mantenimiento, y por otro lado, las líneas de transmisión y distribución no serán saturadas, eliminando operaciones de mantenimiento.
3. Mejora en la calidad de la energía: la descentralización de la generación consigue; mejores perfiles de voltaje, mejor emparejamiento generación-demanda y una reducción en los impactos producidos por los cortes de energía a niveles de las redes de transmisión.

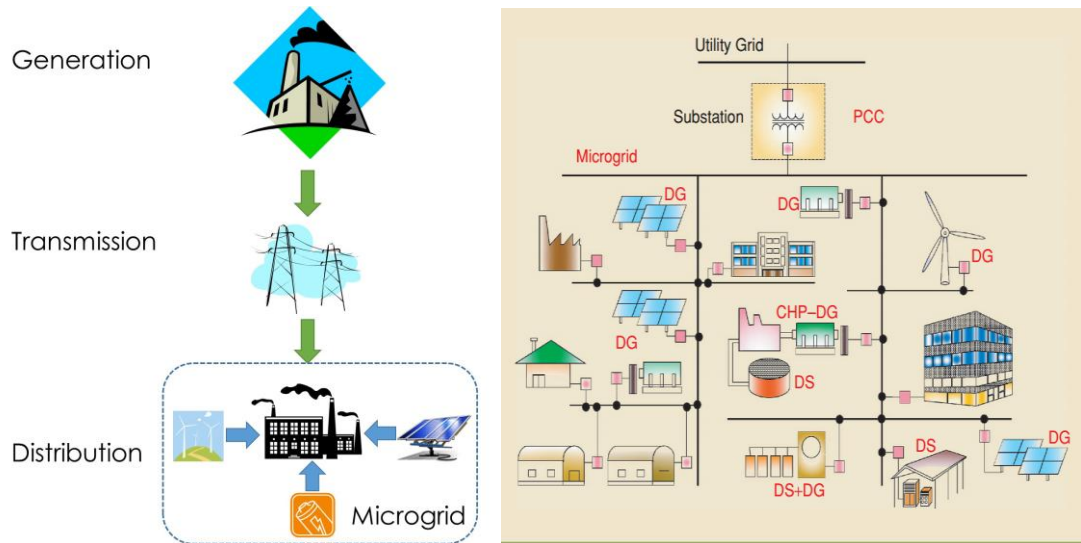


Figura 1.2. Jerarquía de una microred en un sistema eléctrico tradicional (izquierda). Estructura típica de microred en una red de distribución (derecha). Tomada de [14].

4. Ahorro en costos de energía: Cuando se trabaja con fuentes combinadas de calor y potencia (CHP por sus siglas en inglés), y los residuos de calor son utilizados en cargas térmicas, los costos de generación se reducen en gran proporción debido a que la eficiencia de los generadores pasan de un 40 hasta un 80% aproximadamente [10]. Por otro lado, los gastos por generación en grandes unidades se reducen, de nuevo, por la disminución de pérdidas en líneas de transmisión.
5. Beneficios en el mercado: La generación local permite reducir los costos producidos por la compra de energía a grandes empresas generadoras. Por otro lado, el uso cada vez más extenso de fuentes de generación local logrará eventualmente una reducción en el precio de la energía generada en el mercado de los microgeneradores.

Así mismo, existen varios impedimentos y desventajas que han frenado el desarrollo de las microrredes, dentro de las cuales se encuentran [10]:

1. Alto costo de las fuentes de generación distribuida.
2. Dificultades técnicas como el manejo de varios microgeneradores operando en la misma red así como el dimensionamiento y localización de los microgeneradores. Por otro lado, la falta de infraestructuras y protocolos de comunicación.
3. Falta de reglamentación y desarrollo de estándares.
4. Regulación de los precios de la energía generada de manera local.

1.4. Sistemas Híbridos de Energía

Trabajar con energías fluctuantes siempre ha sido un problema y ha frenado de forma determinante el uso de energías renovables, por otro lado es bien sabido que una combinación híbrida de fuentes de energía puede mejorar considerablemente la estabilidad y la confiabilidad en el suministro eléctrico [15] [16] [17]. Un sistema de energía híbrido puede describirse como un sistema cuyo suministro energético proviene de dos o más fuentes de energía hacia una aplicación de salida. La topología general para un sistema híbrido de energía [18] se presenta en la Figura 1.3. Esta arquitectura consta de tres tipos de fuentes, los medios de conexión entre fuentes y cargas y los medios de control que permiten administrar el flujo de energía en el sistema. Cada uno de ellos se explicará de manera general a continuación [18]:

- Fuente primaria: Es una fuente que provee de energía al sistema en base a algún tipo de combustible, esta fuente es utilizada únicamente para generar energía y por lo contrario no puede absorberla desde su

salida. Ejemplos de este tipo de fuente son las celdas de combustible, microturbinas, aerogeneradores entre otros.

- Fuente secundaria: esta fuente tiene la capacidad de doble sentido en su flujo de energía, en ocasiones esta fuente proveerá de energía al sistema y en otras consumirá el exceso de energía del sistema. Es el caso de los almacenadores de energía como las baterías o los ultra capacitores, empleados para mejorar el desempeño de las fuentes primarias al almacenar energía para ser utilizada en otro momento.
- Fuente terciaria: Generalmente son dispositivos para disipación de energía resistivos los cuales convierten en calor los excesos de energía que no pueden ser almacenados.

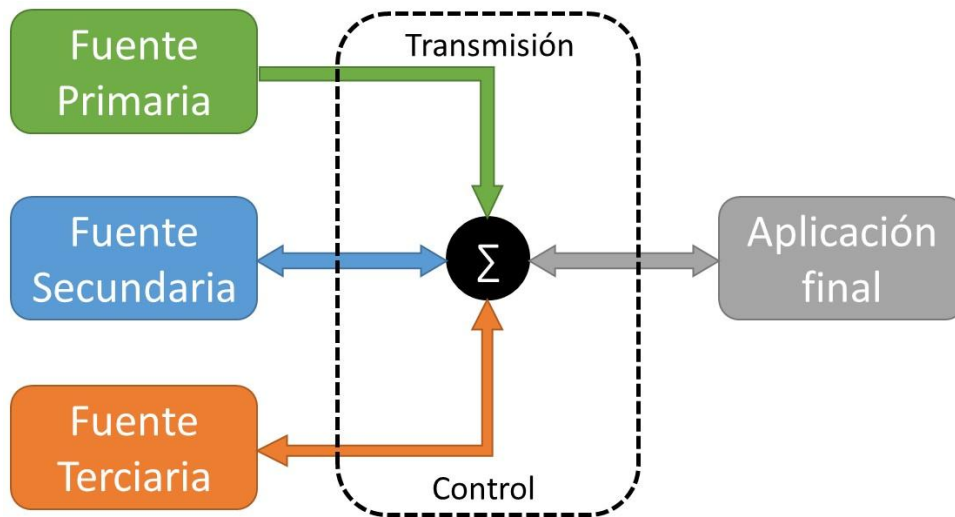


Figura 1.3. Arquitectura general para un sistema híbrido de energía.

- Transmisión: Los sistemas de transmisión se relacionan en cómo las fuentes de energía individuales son conectadas en conjunto para

entregar una energía total a la aplicación final, estos tipos de arquitectura pueden ser clasificados en:

- Híbrido serie
 - Híbrido paralelo
 - Híbrido serie-paralelo
-
- Control: Todo sistema híbrido de potencia debe tener algún sistema de control que garantice el operar de manera adecuada, existen muchos tipos de control tanto obligatorios para la correcta operación de la microred como prescindibles que de alguna manera mejoran la eficiencia y permiten mejores resultados. Una clasificación sencilla de los tipos de control se puede realizar dependiendo de si son controles de tipo físico o controles de toma de decisiones. Sobre la primera clase recaen: control de exportación de energía, potencia de despacho, soporte de potencia activa y reactiva, control de voltaje y frecuencia, y cargas compartidas. Por otro lado en la segunda clase se encuentran la administración de potencia y energía y el control de supervisión [14]. Esta última clase depende directamente de los controles de la primera clase para poder intervenir en el comportamiento del sistema y se verán con más detalle en el capítulo 4 ya que hacen parte de la solución propuesta.

De acuerdo al tipo de control empleado, las fuentes de energía pueden clasificarse en fuentes despachables o fuentes no despachables: las fuentes despachables son aquellas fuentes que tienen la disponibilidad de entregar una potencia de salida especificada por un punto de operación. Las fuentes no despachables operan con control de rastreo de punto máximo de potencia (MPPT) y lo recomendable será operarlas para entregar la máxima potencia posible debido a que su fuente de energía depende de las condiciones ambientales actuales [19].

Dentro de los sistemas de transmisión también se incluyen los sistemas de conversión de energía eléctrica, estos sistemas permiten acoplar todos los elementos de una microred a fin de operar correctamente a nivel eléctrico. La Tabla 1.2 muestra una lista de algunos de los dispositivos utilizados como fuentes de energía en una microred resaltando su acoplamiento eléctrico a la microred y el tipo de control utilizado para su correcto funcionamiento.

	FUENTE DE ENERGÍA PRIMARIA	INTERFAZ/INVERSIÓN	CONTROL DE FLUJO DE POTENCIA
DG convencional	Motores de combustión interna	Generador síncrono	Control del regulador.
	Pequeñas hidroeléctricas		
	Turbinas eólicas de velocidad fija	Generador de inducción	Control de inclinación.
DG no convencional	Turbinas eólicas de velocidad variable	Conversión ac-dc-ac	Controles de velocidad de turbina y voltaje DC de bus.
	Microturbinas		
	Celdas fotovoltaicas	Conversión dc-dc-ac	Controles MPPT y voltaje DC de bus
Celdas de combustible			
Almacenamiento de largo plazo (DS)	Almacenamiento en baterías	Conversión dc-dc-ac	Estado de carga (SOC) y/o controles de frecuencia/voltaje
Almacenamiento de corto plazo	Supercapacitores	Conversión dc-dc-ac	SOC
	Almacenador de volante	Conversión ac-dc-ac	Control de velocidad

Tabla 1.2. Acoplamiento eléctrico y control utilizado para la incorporación de dispositivos en una microred.

El desempeño en sistemas híbridos de energía se complica debido a que existen diferentes indicadores que varían de aplicación en aplicación, sin embargo, existen algunos que aunque no permitan evaluar de manera completa el desempeño del sistema, son comunes en todos los sistemas híbridos de energía y dan una primera evaluación de desempeño. El indicador que prevalece sobre todos viene dado por la habilidad de un suministro ininterrumpido, después de este, existen otros que permiten evaluar el desempeño de partes o dispositivos en el sistema como es el estado de carga (SOC), el estado de salud (SOH) de los dispositivos, y eficiencias de operación en sub-sistemas o en toda la aplicación [14].

1.5. Estructura de la tesis

El siguiente manuscrito tiene la documentación pertinente del trabajo de tesis realizado y se divide de la siguiente manera:

Capítulo 1: Expone los antecedentes y la motivación que condujeron al desarrollo de la tesis. Por otro lado exhibe un breve marco teórico y pone en perspectiva al trabajo realizado en un marco de desarrollo tecnológico. Por último se describe de manera general lo desarrollado en la tesis.

Capítulo 2: Presenta la problemática a afrontar y el marco de trabajo sobre el que se desarrolló la tesis, estableciendo los límites y las consideraciones que se tuvieron en cuenta al diseñar la solución. Por último ofrece una breve descripción de la solución desarrollada para poner al lector en perspectiva del trabajo realizado.

Capítulo 3: Describe la problemática y el diseño de la solución para la administración inteligente de energía dados unos dispositivos y un ambiente industrial determinado. Incluye los conceptos básicos de la herramienta computacional utilizada y el mapeo respectivo de ésta hacia el problema en cuestión.

Capítulo 4: Expone los experimentos realizados con el fin de evaluar la solución diseñada y se analizan los resultados de dichos experimentos. Se describen algunos de los problemas que se tuvieron y se analizan casos de estudio para validar el desempeño de la herramienta. Por último, un pequeño análisis de los tiempos de ejecución es realizado para destacarlos como una de las principales cualidades de la solución.

Capítulo 5: Presenta las conclusiones y los resultados destacados que se obtuvieron del trabajo. Por otro lado se propone el trabajo y la dirección a seguir después de esta investigación.

1.6. Resumen

En este capítulo se resaltaron los factores que anteceden al desarrollo de esta tesis. Se estableció el marco y la problemática medioambiental que atraviesa el planeta en la actualidad resaltando al sector eléctrico como uno de los principales contaminantes y causantes de dicha problemática. Por otro lado se destacó a la integración de energías alternativas como una de las principales herramientas para frenar el cambio climático.

Una vez establecida la motivación de esta tesis se realizó un marco teórico como base de desarrollo de la misma, poniendo al trabajo realizado dentro de un marco de avance tecnológico y así resaltar la importancia del desarrollo de este tipo de herramientas. Dentro de este marco teórico se resaltan algunas de las características básicas de las energías alternativas y su importancia en el sector eléctrico. Por otro lado se estableció el concepto de *Microredes* ubicándolo dentro de un área de desarrollo conocida como *Smart Grids* que pretende cambiar el paradigma de los sistemas eléctricos como se conocen actualmente. A continuación fueron descritos los sistemas híbridos de energía (componentes y arquitectura) finalizando con una descripción de la organización del documento de tesis.

Capítulo 2. Descripción Del Problema

El desarrollo de esta tesis encierra de manera global la siguiente temática: el correcto uso de los activos de generación eléctrica (o fuentes de energía en general) pertenecientes a una microred industrial. En esta sección se describirán los aspectos que giran en torno a la solución planteada. Con esto se busca profundizar en la relevancia del desarrollo de herramientas de este tipo y el bagaje de escenarios que trae consigo. Al final del capítulo se describe al marco de trabajo que se tuvo en cuenta con el fin de delimitar el problema, para finalmente describir las generalidades de la solución desarrollada en esta tesis.

2.1. Problemas Involucrados

2.1.1. Problemática Medioambiental

Como ya se destacó en la sección 1.1, existe un gran problema y una gran preocupación en cuanto al cambio climático, debido a esto, y al inminente hecho de que una reducción de emisiones se vuelva obligatoria, es necesario idear herramientas que, independiente de los fabricantes, favorezcan un desarrollo e implementación más rápido y eficiente de nuevas políticas energéticas dentro de las cuales se encuentran el uso de fuentes de energía menos contaminantes a nivel de usuarios industriales.

2.1.2. Alta Demanda Eléctrica Del Sector Industrial

Parte de la importancia de esta investigación recae sobre el hecho de que el área industrial utiliza cerca del 41% del consumo eléctrico total a nivel mundial [6]. La Figura 2.1 representa la demanda eléctrica por algunos sectores de consumo, en este caso, “Otros” representa sectores de agricultura, sitios comerciales, servicios públicos y sectores residenciales.

Esta dependencia del sector industrial hacia la energía eléctrica provoca que grandes cantidades de dinero sean invertidos en gastos por el consumo de este servicio. Dado esto, se infiere que leves mejoras en la eficiencia energética en entornos industriales reflejarán grandes reducciones tanto en las emisiones totales de gases de efecto invernadero como en los costos generados por consumo eléctrico.

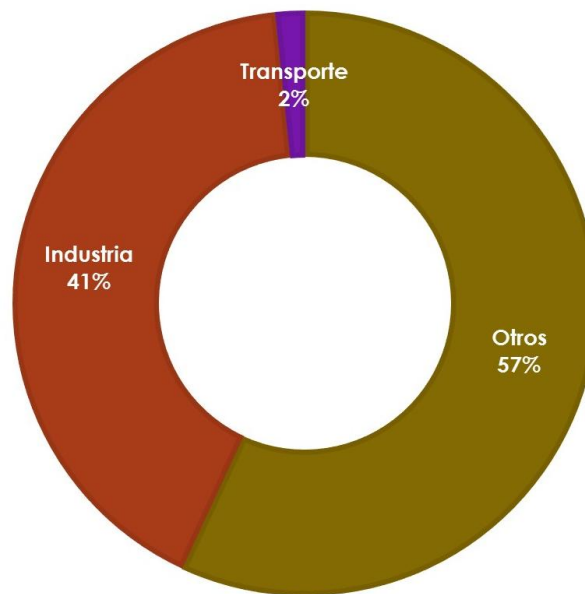


Figura 2.1. Consumo de energía eléctrica por sector a nivel mundial.

2.1.3. Mercado No Estacionario De Energía Eléctrica

Hoy en día muchas industrias tienen que pagar cuantiosas sumas de dinero en sus facturas eléctricas principalmente por desconocimiento del mercado eléctrico al que pertenecen y de sus procesos que hacen uso de energía eléctrica. Generalmente las compañías del servicio eléctrico tienen que lidiar con picos de consumo, estos picos son incrementos considerables de demanda eléctrica ya sea a ciertos momentos del día, en días, meses o temporadas (Figura 2.2). Existen varios tipos de generación utilizados por las compañías del servicio eléctrico que pueden clasificarse como [4]:

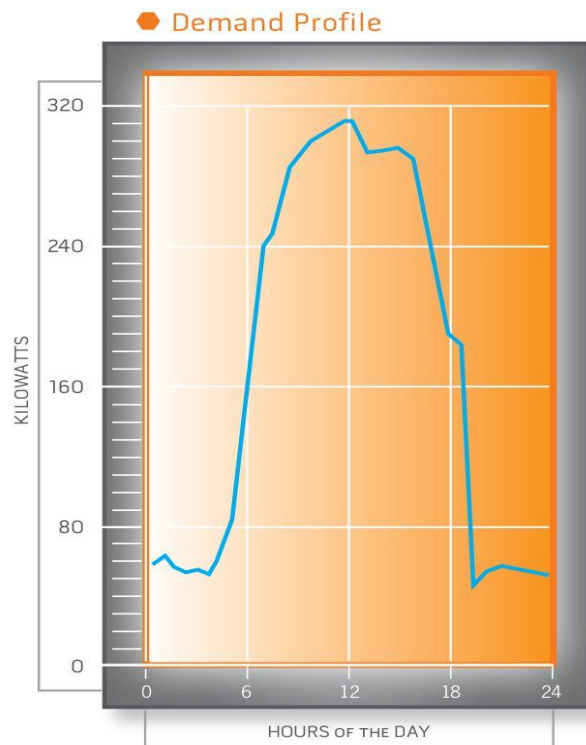


Figura 2.2. Perfil de demanda típico en una comunidad

- Generación de carga base: presentan dificultades o es costoso un cambio de su capacidad de generación (plantas nucleares, grandes termoeléctricas de carbón, grandes plantas de biomasa)
- Generación para picos de demanda: es fácil variar rápidamente su generación pero puede ser costoso (turbinas de gas y celdas de combustible)
- Generación de reserva: fácil de incrementar su generación rápidamente desde un estado apagado o de inactividad (generadores diésel, celdas de combustible y turbinas de gas)

- Generación intermitente (hidroeléctricas sin embalse, turbinas eólicas, y la mayoría de las energías renovables excepto las de biomasa y geotérmicas)

Debido a que en los grandes generadores la energía debe ser consumida a medida que se genera, con el fin de emparejar lo mejor posible la generación con la demanda y cubrir estos picos de consumo, las empresas del servicio eléctrico deben usar plantas alternas de uso no continuo (generación para picos de demanda). Estas plantas generan costos extras de generación que son pasados a los usuarios que demandan esta generación (picos de demanda) [4]. Para mitigar estos costos extra las compañías generadoras establecen diferentes clases de tarifas dependiendo de factores como la carga eléctrica y el consumo de energía en un periodo de tiempo, en un horario y día de la semana. La Comisión Federal De Electricidad (CFE) es el organismo en México que establece las diferentes clases de tarifas dependiendo del tipo de usuario [20].

2.1.4. Naturaleza Multi-Objetiva En La Administración De Energía

La administración de la energía en microrredes es un problema complejo, existen múltiples objetivos que se deben llevar a cabo y algunos de estos objetivos en ocasiones pueden llegar a entrar en conflicto. Mantener el mejor balance entre la energía demandada y la generación, el mejor uso de las fuentes de almacenamiento de energía, una correcta administración de las cargas y el apropiado control de compra y venta de energía a la red externa son algunos de los tópicos que encierran una administración eficiente de la energía [21]. Los objetivos en esta administración recaen sobre tres principales áreas: desempeño, costos e impacto medioambiental, y son detallados a continuación:

1. Suministro ininterrumpido: Es el principal objetivo en la administración de energía, sobre todo debido a que la mayoría de las cargas en ambientes industriales suelen ser críticas. En una microred, sin importar cuál sea la fuente de energía, las cargas críticas deben ser alimentadas continuamente, de lo contrario estos cortes de energía pueden repercutir en cortes de producción o fallas en equipos [21]. Esto deberá cumplirse haciendo el mejor emparejamiento entre generación y demanda eléctrica con el fin de no desperdiciar energía generada e incrementar la eficiencia energética del sistema.
2. Sistema flexible y modular: A medida que las industrias crecen, sus necesidades de energía crecen de igual forma, esto exigirá un incremento en la energía generada de manera local. El sistema de administración de energía deberá permitir la conexión de más generadores y almacenadores de energía a la red sin comprometer el desempeño de la industria [22].
3. Uso de combustibles: Generadores como las turbinas eólicas o los paneles fotovoltaicos trabajan con fuentes de energía naturales que no representan costo alguno, no así el caso de las celdas de combustible o microturbinas los cuales trabajan en base a combustibles como hidrógeno o gas natural, que tienen un precio en el mercado. Del correcto uso de los generadores utilizados se derivan ahorros significativos por compra de combustibles [23].
4. Costos de encendido-apagado: Algunos generadores y cargas eléctricas requieren una cantidad de energía mayor al entrar en operación con un arranque en frío que aquella usada en un estado de operación nominal. En algunas ocasiones es de mayor

conveniencia operar estas máquinas de modo continuo en vez de realizar un ciclo completo de apagado-encendido, cosa que puede llegar a repercutir en una reducción de la vida útil de las máquinas y un incremento en costos por mantenimiento [23].

5. Costos por ciclos de carga-descarga: De manera similar a las máquinas eléctricas, en los sistemas de almacenamiento de energía utilizados en las microredes se presenta un fenómeno similar. Cada ciclo de carga-descarga representa un acortamiento del ciclo de vida de estos dispositivos y un incremento en costos de mantenimiento dados por ejemplo, en el remplazo del ácido en baterías de plomo. En el peor de los casos requerirá un remplazo de toda la unidad almacenadora de energía [19].

6. Uso de energías limpias: La mayoría de las industrias operan en base a la energía que provee los sistemas eléctricos tradicionales, representando altos costos por el consumo de este servicio. Sacar el mejor provecho de la energía generada localmente refleja en menores costos por consumo de energía de la red externa. Este objetivo debe contrastar con la correcta compra y venta de energía. Si bien en ocasiones la energía generada en las grandes centrales son muy contaminantes existen momentos en los cuales hacer uso de ésta es más económico para el usuario que emplear la energía generada localmente, en otras ocasiones ocurrirá lo contrario.

El uso de la energía generada localmente de forma limpia representa dos principales beneficios medioambientales. Por un lado la generación local reduce las pérdidas de energía en líneas de transmisión y distribución de la red externa. Por otro lado, si la energía proveniente de las grandes generadoras se genera en base

a la quema de combustibles fósiles, una reducción en la quema de dichos combustibles representa una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero.

2.2. Trabajos Relacionados

Aunque el concepto de microredes es un tema relativamente nuevo, el sector académico ha validado a través de numerosos reportes la importancia que tiene para el futuro del sistema eléctrico. Diferentes áreas, conceptos, herramientas se han planteado con el ánimo de llevar las microredes al siguiente nivel: su implementación de manera global y extendida.

No cabe duda que la principal diferencia entre el concepto de un sistema eléctrico tradicional y uno en base a microredes abarca el cambio de un sistema de generación centralizado a uno distribuido. Dado este nuevo régimen, un sistema de control distribuido o descentralizado es de los primeros conceptos que entran en juego en el control de microredes. Uno de los conceptos más reportados en la literatura para atacar el problema de control distribuido viene dado por los sistemas multi-agente [24], [23], [15]. Estos sistemas han demostrado tener resultados favorables en temas como la transición segura de estados conectados a la red a estados aislados y viceversa [24], este tipo de transiciones se presenta cuando existen cortes de suministro eléctrico por problemas externos a la red de distribución.

El uso de técnicas de inteligencia computacional (ej. sistemas inmunes, inteligencia de enjambre, sistemas difusos, computación evolutiva, redes neuronales) ha sido investigado ampliamente en diferentes áreas del sistema eléctrico teniendo en cuenta la integración de energías alternativas. El uso de este tipo de herramientas se justifica al identificar al sistema eléctrico como un sistema espacial y temporalmente complejo, no lineal, no estacionario y con gran cantidad de incertidumbres [25]. Más concretamente, en el área de las microredes la administración de energía ha sido trabajada a través de

redes neuronales para predecir generación fotovoltaica y eólica, y demanda de carga [19], [26]. Así mismo, se han empleado sistemas difusos para la planificación en la operación de las baterías y la administración la potencia de suministro, mostrando mejoras considerables en los costos de operación y los niveles en emisión de gases [19], [27].

Los sistemas por inteligencia de enjambre han sido utilizados para encontrar soluciones para la administración de energía en microredes aisladas de la red pública. En [17] se diseña un sistema de administración de energía para una generación híbrida eólica-microturbina dando resultados favorables en objetivos como costos de operación, eficiencia en la microturbina y emisiones al medioambiente. Por otro lado, es común encontrar varias herramientas computacionales combinadas para aprovechar ventajas de herramientas distintas, es el caso del diseño planteado en [23] donde se diseña un sistema de administración de energía multi-agente-difuso.

Los sistemas basados en colonias de hormigas (herramienta usada en este trabajo) han demostrado ser valiosas en el dimensionamiento y ubicación de generadores en redes de distribución [28], [29]. Para resolver este mismo problema a nivel de microred, un algoritmo de templado (“annealing”) es propuesto en [30]

La administración de energía en ambientes que incorporan el mercado eléctrico también ha sido reportada. Un algoritmo para tomas de decisiones basadas en restricciones y reglas regulatorias se trabajó en [31] teniendo como objetivo el costo de operación. Este diseño incluyó la posibilidad de comprar o vender energía de la red externa.

2.3. Marco De Trabajo

Áreas como las energías alternativas, microredes y la administración de energía son muy extensas de trabajar; por lo tanto, esta sección tiene como

finalidad establecer el marco de trabajo sobre el cual se desarrolló la tesis y fijar los límites y consideraciones que se tuvieron en cuenta para el diseño y simulación de la solución.

Existen numerosas fuentes de energía cuya transformación a energía no genera un impacto ambiental significativo, dentro de las tecnologías alternativas más desarrolladas se encuentran la energía de biomasa, eólica, solar (térmica y fotovoltaica), hidráulica, de marea y geotérmica entre otras. Energías como la hidráulica, de marea y geotérmica dependen de la orografía y condiciones ambientales por lo que están disponibles únicamente en ciertos lugares [4]. Regularmente las industrias se localizan en zonas urbanas, lejos de estas fuentes de energía, haciendo de los costos por transmisión un obstáculo para tomar en cuenta estos tipos de energía, y por otro lado, la opción de transmitir por sistema de interconexión eléctrica nacional no permite la administración de la energía generada. Debido a esto, para efectos de esta investigación sólo se tomaron en cuenta las siguientes tecnologías: Celdas de combustible, microturbinas, aerogeneradores y paneles fotovoltaicos.

El trabajo desarrollado en esta tesis ofrece una solución entendiendo la necesidad de contar con herramientas que faciliten la integración de energías alternativas trabajando a modo de autogeneración del lado de los usuarios, específicamente en entornos industriales. Este trabajo, aunque puede extenderse para otros tipos de ambientes, está pensado para trabajar bajo un entorno bien definido de autogeneración parcial. Las soluciones planteadas están diseñadas bajo las premisas de trabajar en microredes industriales situadas en redes de distribución cuya generación haga parte de la industria en cuestión (autogeneración local) y no rebase los límites establecidos. Por otra parte, se estipula que la capacidad de autogeneración siempre será una porción de la carga eléctrica total de la microred, esto

debido a que generalmente las redes industriales cuentan con altas cargas eléctricas y tienden a ser en su mayoría críticas.

Trabajar en entornos industriales puede representar ciertas ventajas y desventajas. Las microrredes industriales comúnmente tienen altas cargas eléctricas, hecho que repercute en una fuerte dependencia de la red externa o una alta capacidad de autogeneración estable. Por otro lado las cargas son en su mayoría críticas y deben ser alimentadas continuamente. Por último, las cargas industriales tienden a tener ciclos de trabajo bien definidos permitiendo una mejor administración de la energía.

Cabe resaltar que este trabajo de investigación fue impulsado por la **Cámara de la Industria Textil de Puebla y Tlaxcala** quienes de un principio mostraron gran interés en este trabajo dadas sus altas inversiones en el servicio eléctrico y su deseo de involucrarse con el tema de las energías alternativas. Algunos de los datos utilizados en este trabajo pertenecen a esta industria y fueron facilitados por el ingeniero Juan Quintana Moreno presidente de la cámara en el tiempo que esta investigación dio inicio.

2.4. Problema a Resolver

2.4.1. Introducción

La administración de la energía en una microrred es de por si un problema complejo debido a su naturaleza multi-objetiva. Debido a esto, fue necesario evaluar cuáles de estos objetivos son de mayor importancia y cuáles de ellos son de interés común para poder escoger y centrar la atención en uno de ellos. Después de un análisis se concluyó que el objetivo económico es uno de los de mayor interés, en primera medida debido a que los posibles usuarios de la herramienta tienden a establecer el factor económico como prioridad y por otro lado, este objetivo va de la mano con un mayor

aprovechamiento de la generación alternativa dando lugar a beneficios medioambientales de una manera indirecta.

Los gastos por energía eléctrica en una microred vienen dados por los gastos de autogeneración (operación y mantenimiento) y los gastos por el servicio eléctrico externo (tarifa eléctrica). Los gastos por el servicio eléctrico pueden variar de acuerdo a diferentes factores dónde los comunes son: el tipo de tarifa, una demanda máxima de potencia y el consumo de energía acumulado durante el intervalo de facturación [20]. Debido a esto, para compañías medianas conectadas a la red de distribución el mayor beneficio viene dado por el control de su demanda máxima, que al ser suplida en un cierto porcentaje por generación local reflejará también beneficios por consumo de energía acumulada en el costo por facturación. Por otro lado, los costos de autogeneración son función del punto de operación en el que se encuentren los generadores, dando lugar a diferentes valores dependiendo de la potencia entregada por estos.

2.4.2. Planteamiento del problema

De acuerdo a lo anterior, el problema de la administración de la energía se limitará al control de la potencia entregada por los generadores locales de tal manera que operen al mínimo costo posible teniendo en cuenta que la potencia de generación debe ser suficiente para que la consumida de la red externa no exceda un límite establecido por el usuario, derivado de su contrato de consumo de energía externa.

De lo anterior y lo revisado en los trabajos relacionados (sección 2.2), una comparación directa con alguna otra solución propuesta dado el contexto y el contexto del problema seleccionado no permite comparación en circunstancias y propósitos similares. En la revisión de la literatura no se encontró un planteamiento donde se presente como objetivo principal la generación dado un límite establecido puesto que las propuestas o no

consideraban una conexión a la red externa, o no consideraban un régimen tarifario con límite de demanda contratado. De este hecho se deduce que el objetivo principal de este trabajo será comprobar la validez mas no el desempeño de la herramienta.

2.4.3. Modelo de Solución del Problema

Existen varias herramientas algorítmicas dedicadas a la solución de problemas de optimización; por ende, existen varias metodologías válidas para resolver el problema planteado. Algoritmos como los métodos de Newton y sus modificaciones, de gradiente conjugado, basados en derivadas, de proyección, etc, son herramientas iterativas clásicas en la resolución de problemas de optimización [32]. Estas herramientas, aunque presentan buenos resultados en sus aplicaciones, son de alto costo computacional debido a la precisión de sus resultados y algunas de ellas no permiten incluir restricciones en su modelado. Este costo computacional suele traducirse en altos tiempos de ejecución convirtiendo a estas herramientas no adecuadas para resolver el problema en cuestión.

Si bien el sistema bajo el cual se trabaja es de naturaleza continua, una alternativa para reducir costos computacionales viene dada por el mapeo del problema a uno discreto. De esta manera, es posible transformar el modelo del sistema a un conjunto finito de soluciones del cual se deriva un subconjunto determinado por las restricciones propias del problema (soluciones factibles) de las cuales se escogerá la opción más adecuada. Un enfoque que utiliza este tipo de solución es el dado por la programación entera [33].

Debido a que realizar la discretización del problema tiene el carácter de explosión combinatorial. El universo de soluciones incrementa de manera exponencial con relación al incremento de las instancias del problema, por el cambio del número de generadores y su puntos de operación. Evaluar todas

las posibles soluciones resulta impráctico debido, de nuevo, a los altos costos computacionales. De esta manera es que los métodos heurísticos (algoritmos genéticos, optimización por enjambre de partículas, algoritmos evolutivos, etc) entran a ser herramientas poderosas en los problemas de optimización dando soluciones sin garantía de ser óptimas; pero de buen rendimiento con menor esfuerzo [34]. Estos algoritmos generan soluciones cuasi-óptimas en base a información recolectada en el transcurso del algoritmo sin la necesidad de evaluar todo el universo de soluciones. En este trabajo se usó como herramienta algorítmica los sistemas basados en hormigas, un método metaheurístico cuyas ventajas se destacan en el Capítulo 3.

2.5. Generalidades de la solución

Dado el impacto medioambiental y el eminente agotamiento de los recursos energéticos que hoy en día se utilizan, las políticas energéticas a nivel mundial tienden a cambiar de algún modo. Hoy en día el desarrollo de las fuentes alternativas de energía apunta hacia un futuro energético sustentable, haciendo de ellas una parte fundamental del sistema energético posterior. Hasta el momento el uso de este tipo de energías a nivel de consumidores se ha promovido únicamente con beneficios fiscales por parte de los gobiernos, pero la degradación del medio ambiente hará que su uso sea de tipo obligatorio en un futuro no muy lejano. Debido a esto, este trabajo comprende el desarrollo de una herramienta encaminada a contribuir en la transición hacia un inminente cambio en las políticas energéticas actuales, dentro de las cuales se encuentra la integración de energías alternativas (generación local) en ambientes industriales.

Cuando en un entorno industrial se quiera implementar cualquier tipo de energía alternativa o almacenador de energía, una microrred entrará en operación y nace la necesidad de una gestión inteligente de las fuentes de

energía. Teniendo en cuenta los dispositivos a instalar, su comportamiento y operación puede ser evaluado mediante la solución diseñada. Esta solución aparte de estimar cual podría ser el desempeño de la solución una vez implementado los dispositivos, tiene como finalidad mejorar el uso de éstos mediante la administración inteligente de la energía, esta administración se encarga de controlar el flujo de energía a través de la microred generada al implementar las fuentes de energía alternativa y los almacenadores de energía. Esta solución estará pensada también para operar en tiempo real, es decir, es una solución que de ser implementada junto con los dispositivos podrá tomar decisiones para administrar la energía en la microred sin comprometer el desempeño del sistema, esta característica se profundizará en el capítulo 4. La administración de la energía tiene como objetivo principal mejorar la eficiencia energética a través de diferentes objetivos que recaen sobre tres áreas principales: desempeño, costos e impacto medioambiental. Por otro lado el diseño de esta solución está pensado para trabajar bajo un régimen de mercado de energía específico, de esta forma se establecen ciertas estrategias económicas de manera que sea una solución rentable y atractiva para el usuario que quiera implementarla. La solución tiene como principal mecanismo la manipulación de los activos de generación y almacenamiento de energía. Esta manipulación se realizará mediante la fijación de los puntos de operación de los dispositivos, es decir, una potencia de generación específica para cada fuente

2.6. Resumen

Dentro de esta sección se presentó un compendio de los factores que intervinieron en el desarrollo de la tesis. Por un lado se describen aquellos problemas a los que la herramienta planteada en este trabajo puede contribuir a solucionar y los impactos que se lograrían en el sector industrial. Por otro lado se encuentran las dificultades a las que se enfrentaría la

herramienta en ambientes reales y se constituyen como elemento fundamental en el diseño de la solución.

En las últimas secciones se describió lo concerniente al marco de trabajo y las generalidades de la solución propuesta. La descripción del marco de trabajo envuelve los límites y las consideraciones que se tuvieron en cuenta al diseñar la solución. Por último una breve descripción de la herramienta diseñada se realizó con el fin de poner en perspectiva al lector sobre lo realizado a lo largo de la tesis.

Capítulo 3. Diseño de la Solución

Las microredes basan su abastecimiento eléctrico en un suministro híbrido, esta característica provoca en estos sistemas una mejora en la confiabilidad y en la entrega de energía a cargas eléctricas eliminando así una dependencia total de una única fuente propia de un régimen de generación centralizado. De este hecho nace un problema crítico que se desprende de cómo gestionar este conjunto de generadores, cargas y almacenadores de energía de una forma segura y eficiente. Dado el régimen no regulado de la generación distribuida, las microredes ofrecen un esquema de control descentralizado para este tipo de generadores aliviando de este trabajo a las empresas del servicio eléctrico. De acuerdo con esto, nace la importancia del desarrollo de esta herramienta que ofrece el control del flujo de energía en microredes industriales de una manera local, teniendo en cuenta la mayor penetración de las microredes en la infraestructura de los sistemas eléctricos en un futuro próximo.

La funcionalidad de esta herramienta está basada en la utilización de un método meta-heurístico bio-inspirado en las colonias de hormigas (ACO). Dada la complejidad del problema ocasionada por sus múltiples objetivos y restricciones, y la necesidad de lograr respuestas rápidas donde no es necesario obtener el resultado óptimo, el uso del ACO se hizo apropiado para afrontar este problema. Por otro lado, varios de los objetivos planteados para las microredes pueden traducirse a problemas combinatorios y así poder ser atacados con esta técnica [34].

3.1. Conceptos Básicos De Los Algoritmos

ACO

Los algoritmos ACO son en esencia heurísticos debido a su característica para resolver problemas con grandes instancias de manera aproximada entregando resultados cuasi-óptimos en un tiempo relativamente corto. Por otro lado, adquieren la calidad de metaheurísticos ya que establecen un marco algorítmico general en el cual mediante modificaciones relativamente pequeñas puede ser aplicado a diferentes problemas de optimización. Métodos como estos son usados principalmente en problemas de optimización combinatorios [34]. Estos problemas envuelven la búsqueda de valores para variables discretas pertenecientes a una función objetivo dada, haciendo que la búsqueda de la solución se dirija hacia regiones del espacio que contienen soluciones de alta calidad. Los problemas combinatorios pueden ser de maximización o minimización y tienen asociados un conjunto de instancias que son particularidades del problema. Algunos tipos de problemas combinatorios que pueden hacer uso de los algoritmos ACO para ser resueltos son: enrutamiento, asignación, calendarización y arreglo de subconjuntos [35].

Los algoritmos heurísticos bio-inspirados en el comportamiento de las hormigas basan su funcionamiento imitando la manera en que las hormigas recolectoras de comida pueden encontrar el camino más corto entre su nido y la fuente de alimentos marcando el camino que siguieron con una sustancia química llamada feromona. La forma de comunicación indirecta mediante modificaciones del ambiente gracias al depósito de feromona se conoce como *estigmergia* [34]. Este comportamiento se puede replicar computacionalmente dando lugar a los algoritmos conocidos en la literatura como “*Optimización por colonias de Hormigas (ACO por sus siglas en inglés)*”. Los algoritmos ACO pueden ser usados para resolver tanto

problemas estáticos como dinámicos. En el primer caso las características del problema son dadas una primera vez cuando el problema es descrito y no cambian a través del tiempo. Por el contrario, los problemas dinámicos son definidos como función de algunas variables que cambian con el tiempo en donde el algoritmo debe ser capaz de adaptarse a los cambios de las instancias del problema [35].

3.2. Representación del problema

De una manera formal los problemas de optimización (minimización o maximización) se representan por el conjunto (S, f, Ω) , donde S es el conjunto de *soluciones candidatas*, f es la *función objetivo* (la cual asigna un valor (costo) $f(s, t)$ a cada solución candidata $s \in S$), y $\Omega(t)$ es un *conjunto de restricciones*. De acuerdo al problema en cuestión, una solución candidata estará dada por el conjunto de generadores conectados a la microred y sus respectivos puntos de operación. La función objetivo (ecuación 1), se establecerá como un costo de operación normalizado, es este caso, el costo de generar un (1) KW de potencia durante un intervalo de tiempo de una hora. Por último, las ecuaciones de restricción estarán dadas por las ecuaciones 2 y 3, las cuales se detallarán más adelante.

El objetivo de todo problema de optimización es encontrar la solución óptima de manera global s^* que resulte en el mínimo o máximo costo del problema. De esta manera, el algoritmo entregará un conjunto de puntos de operación para cada generador (s^*) para los cuales el método considerado se generaba el mínimo costo de operación cumpliendo las restricciones propias del problema (Ω).

$$f = \frac{\sum_{i=1}^m C_i}{\sum_{i=1}^m P_i} \quad 1$$

$$\sum_{j=1}^n y_{ij} = 1, \text{ para } i = 1, 2, \dots, m \quad 2$$

$$\sum_{i=1}^m P_i > D - L_c \quad 3$$

En las ecuaciones anteriores P es la potencia entregada por la fuente i , C es el costo de operar la fuente i a la potencia P , m es el número de fuentes conectadas a la microrred, n es el número de puntos de operación para cada fuente P , D es la demanda de potencia actual y L_c es el límite de demanda contratado.

Para representar el problema se definirán a continuación las características necesarias en el algoritmo ACO [34]:

3.2.1. Gráfica de construcción

Es una manera de representar problemas combinatorios, para el caso de los algoritmos ACO las hormigas artificiales construyen soluciones realizando caminatas aleatorias sobre un gráfico conectado $G_c = (C, L)$ donde los nodos son los componentes de C y el conjunto L conecta los componentes de C . La gráfica G_c es llamada *gráfica de construcción* y los elementos de L *conexiones* o *arcos*. De esta manera cada nodo será la representación de un determinado punto de operación para determinado generador y los arcos conectan algunos de los nodos de acuerdo a la descripción de las restricciones para crear soluciones factibles.

La Figura 3.1 muestra la gráfica de construcción para el control de generadores. En esta gráfica, cada columna de nodos representa los n puntos de operación para los m generadores conectados a la microrred. Cabe resaltar que aunque se hable de generadores algunas de las fuentes de energía pueden ser almacenadores de energía en estado de descarga. Así

pues cada hormiga abordará su construcción de la solución empezando desde el nodo de inicio, para luego ir agregando nodos a la solución al caminar por las conexiones, hasta llegar al nodo final donde la solución estará completa.

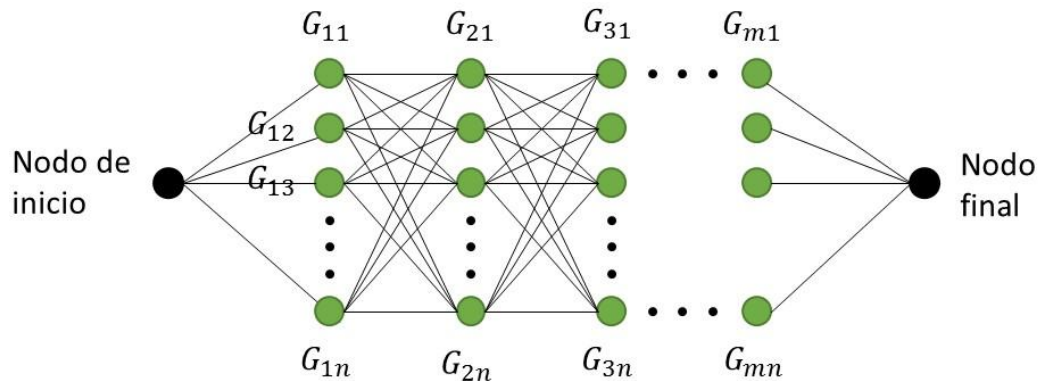


Figura 3.1. Gráfica de construcción para administración de fuentes.

3.2.2. Restricciones

Para crear una solución factible, la construcción de la solución deberá tener en cuenta restricciones propias del problema a solucionar. En el caso del problema planteado se tienen dos restricciones:

1. Por razones físicas cada generador puede operar en un único punto de operación, en un intervalo de tiempo dado, es por ello que en la Figura 3.1 los arcos que conectan nodos del mismo generador no aparecen, y por otro lado, las hormigas solo pueden avanzar hacia nodos relativos a generadores no incluidos en la solución parcial. De esta manera, para cada solución se asignará a la variable y_{ij} un valor de 1 si la fuente i se encuentra en el punto de operación j y 0 para los puntos de operación restantes. Así pues, según esta restricción se debe cumplir lo señalado por la ecuación 2. Esta limitante se manejó con la representación de los

datos que se explicará más adelante cuando se hable de la estructura del algoritmo.

2. Debido a que uno de los objetivos de la solución será proporcionar soluciones en donde la potencia externa no rebase cierto límite, una solución será factible únicamente cuando la potencia generada pueda suplir los excesos de demanda para este límite. Esta restricción se manejó con el depósito de feromona que se explicará más adelante cuando se hable de la estructura del algoritmo. Así pues, según esta restricción en cada solución factible se debe cumplir lo señalado en la ecuación 3.

3.2.3. Feromona

Los componentes $c_i \in C$ y las conexiones $l_{ij} \in L$ pueden tener asociado una cantidad de feromona (τ_i si está asociada al componente o τ_{ij} si está asociado a la conexión) que codifica una memoria de largo término acerca del proceso de búsqueda completo y es actualizado por las hormigas. La feromona entonces estará asociada a la deseabilidad de escoger un punto de operación particular del generador i después de haber escogido un punto de operación particular del generador $i - 1$, luego ésta depende de la conexión más no del nodo. Particularmente, en el algoritmo “*Ant System (AS)*” (algoritmo utilizado) una buena heurística para inicializar los valores de feromona está dado por un valor ligeramente superior a la cantidad esperada de feromona depositada por las hormigas en una iteración. Una buena aproximación de este valor viene dada por la ecuación 4, donde m es el número de hormigas y C^{mn} es el costo del recorrido generado por la heurística del vecino más cercano, sin embargo, el costo de cualquier recorrido servirá [34]. Esta elección es hecha debido a que el valor inicial de feromona es lo suficientemente bajo para explotar la cualidad de exploración de las hormigas y hacer converger el algoritmo con mayor rapidez. Por otro lado,

establecer valores altos de feromona desembocará en ciclos de iteración perdidos mientras la evaporación de la feromona reduce los valores lo suficiente para que la feromona que se añada tras cada iteración empiece su efecto de desviación hacia el espacio de búsqueda deseado.

$$\tau_{ij} = \tau_0 = m/C^{mn} \quad 4$$

Una vez que todas las hormigas han construido su solución los valores de feromona son actualizados. Esto es hecho en primera medida decreciendo los valores de todos los arcos por un factor constante $0 < \rho \leq 1$ llamado *tasa de evaporación de feromona* (Ecuación 5) para luego depositar la feromona sobre las conexiones que las hormigas utilizaron para construir su recorrido. De esta manera el crecimiento de feromona incrementa la probabilidad de aquellas conexiones que bien fueron usadas por varias hormigas o bien obtuvieron un buen desempeño de solución para ser usadas por futuras colonias. La implementación del efecto de evaporación evita la convergencia del algoritmo hacia regiones sub-óptimas.

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij} \quad \forall (i, j) \in L \quad 5$$

La manera en que las hormigas depositan la feromona sobre los arcos utilizados viene dado por la ecuación 6:

$$\tau_{ij} \leftarrow \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad 6$$

Donde el valor a depositar sobre los arcos usados por la hormiga k es el inverso de la función de costo evaluada en la solución construida y 0 en el resto de los arcos:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} 1/c^k \\ 0 \end{cases} \quad 7$$

Así pues, entre mejor sea el tour construido por la hormiga, más feromona se depositará sobre los arcos utilizados incrementando las probabilidades de ser usados por futuras hormigas.

3.2.4. Información Heurística

Al igual que la feromona también se ha de tomar en cuenta la *información heurística*, que representa información a priori acerca de las instancias del problema. Típicamente esta información es el costo o un estimado del costo de agregar un componente o una conexión a la solución en construcción. Junto con la feromona constituyen los dos elementos necesarios para realizar decisiones probabilísticas sobre cómo moverse sobre el gráfico. A diferencia de la feromona, la información heurística dependerá ahora del nodo, mas no de la conexión, debido a que esta información estará representada por un valor inversamente proporcional al costo de operación normalizado de cada nodo:

$$\eta_{ij} = 1/c_{ij} \quad 8$$

La información heurística indicará al algoritmo la deseabilidad de agregar el nodo ij a la solución. De acuerdo a esto, aquellos nodos con costos de operación normalizados más elevados, serán menos deseados para la solución y viceversa.

3.2.5. Construcción de la solución

Este es el procedimiento mediante el cual el algoritmo dirige a una colonia de hormigas para que concurrente y asincrónicamente visiten estados adyacentes del problema moviéndolas hacia los nodos vecinos en la gráfica de

construcción. Es particularidad del problema (también por conveniencia algorítmica) que todas las hormigas empiecen en un nodo inicial al igual que todas deben terminar en un nodo final. De esta manera cada hormiga empezando del nodo inicial recorre la gráfica de construcción de izquierda a derecha (Figura 3.1) por diferentes rutas mediante decisiones locales aleatorias haciendo uso de la información de la feromona y la información heurística, para terminar en un nodo final indicando que la solución está ahora completa. En este sentido, las hormigas incrementalmente construyen soluciones al problema de optimización. Una vez la construcción de la solución es completada la hormiga evalúa el rendimiento de la solución para utilizarlo posteriormente en la actualización de feromonas.

La manera en que cada hormiga decide cual es el siguiente nodo a visitar está dada por una regla probabilística de decisión, que en el caso del AS es llamada regla *aleatoria proporcional*, cuyo funcionamiento se explicará a detalle en la sección de estructura del algoritmo. La probabilidad con la cual la hormiga k ubicada en el nodo i escoge ir a la ciudad j es:

$$p_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}]^\alpha [\eta_{il}]^\beta}, \quad \text{si } j \in N_i^k \quad 9$$

Donde α y β son los parámetros que determinan la influencia relativa de la feromona o la información heurística, y N_i^k son los nodos factibles a visitar por la hormiga k que se ubica en el nodo i establecidos por las restricciones del problema. De esta manera la probabilidad de escoger el arco ij incrementa si los valores de la feromona y la información heurística son altos.

Es importante notar que una hormiga independiente es capaz de encontrar una solución al problema bajo consideración, pero encontrar una solución de buena calidad sólo se desprende de la interacción colectiva entre hormigas mediante la información que leen y escriben en las variables almacenadas en

la feromona. Por otro lado se destacan 5 características importantes acerca de los algoritmos ACO:

1. El efecto del desempeño del recorrido, aunque importante, no es suficiente para permitir una solución efectiva a grandes problemas de optimización.
2. La actualización de la feromona basada en la calidad de la solución es importante para una rápida convergencia.
3. Grandes valores para el parámetro α conduce a un fuerte énfasis en las fluctuaciones aleatorias iniciales y a un comportamiento del algoritmo equívoco.
4. Entre mayor sea el número de hormigas empleado mejor será la convergencia del algoritmo, aunque esto conduce a mayores tiempos de ejecución.
5. La evaporación de la feromona es importante cuando se trata de resolver problemas complejos.

La Tabla 3.1 presenta un resumen de la representación del problema en términos del algoritmo, de esta manera se mapeó el problema hacia la herramienta para poder ser resuelto.

CARACTERÍSTICA	REPRESENTACIÓN
Función de costo	Costo de operación normalizado (\$/KWh)
Nodos	Estados de generación (para cada generador)
Heurística	Costo de operación normalizado para cada nodo
Feromona	Deseabilidad de agregar el estado de generación j después de haber incluido el estado de generación i a la solución
Restricciones	<ul style="list-style-type: none"> - Un solo estado de generación por generador en la solución - Una solución factible debe generar al menos la potencia requerida por el sistema.

Tabla 3.1. Mapeo del problema hacia el algoritmo AS

Es común encontrar funciones de costo de generadores con características crecientes en todo o en la mayoría de su rango [21], si como función objetivo se escogiera el costo total de operación las soluciones generadas operarían en la mayoría de los casos cerca al límite de generación dando lugar al riesgo de sobrepasar el límite de demanda contratado dado algún tipo de eventualidad. El hecho de escoger al costo de operación normalizado como función objetivo da lugar a dos ventajas principales. Por un lado, algunas de las soluciones generadas por la solución, aunque con costo de operación mayor del necesario, generará una potencia que incrementa el margen de seguridad entre la potencia autogenerada y el límite de demanda contratado. Como beneficio adicional, una potencia local mayor se traduce en un consumo de energía externa menor, lo que conlleva a una reducción de tarifa por consumo eléctrico.

3.3. Estructura del Algoritmo

3.3.1. Representación de los datos

- a. Instancias del problema: Estos son los datos representativos y particulares del problema. Estarán representados por una matriz, que albergará los costos de operación normalizados para cada nodo, generada por el cociente de las dos siguientes; una matriz para los costos netos de operación en cada punto de operación y una matriz para las posibles potencias de operación de los generadores. Las dimensiones de estas matrices será de m filas correspondientes a los generadores y n columnas correspondientes a los estados posibles de operación.
- b. Valores de feromona: Debido a que la feromona representa información correspondiente a los arcos, arreglos de dos dimensiones suelen usarse en gráficas de construcción cuyos nodos se encuentran totalmente conectados para poder representar todas las posibles conexiones. Estos arreglos dan lugar a matrices de grandes dimensiones ya que los arcos incrementan exponencialmente respecto al número de nodos. Dada la particularidad de la gráfica de construcción de nuestro problema donde los nodos no están totalmente conectados debido a las restricciones, se implementó una matriz de tres dimensiones (i, j, l) para reducir el número de datos almacenados. En esta matriz, la coordenada i, j representa el arco que conecta el punto de operación i del generador $l - 1$ con el punto de operación j del generador l . Este arreglo de tres dimensiones será de longitud $(n) \times (n) \times (m)$.
- c. Información heurística: Aunque la información heurística depende de los nodos mas no de los arcos y pueda representarse en un arreglo de

menores dimensiones, estos datos deben ser del mismo tipo de la feromona para poder ser operados en la ecuación de probabilidad (ecuación 6) luego también deben ser de tres dimensiones, de longitud $(n) \times (n) \times (m)$ presentando redundancias de información. En este orden, para poder calcular la matriz heurística (Ecuación 8) se debe transformar la matriz de costos normalizados a una de tres dimensiones. Para evitar divisiones por cero (en el caso de tener un generador en reposo total) y permitir una mayor exploración en las primeras iteraciones, la heurística de estos nodos se establecerá en el mayor valor de las heurísticas correspondientes a los otros estados de operación del generador.

- d. Construcción de la solución: Para este procedimiento es necesario contar con un arreglo que almacene de manera secuencial los recorridos construidos por cada hormiga. De esta manera esta matriz tendrá k filas correspondientes al número de hormigas y m columnas correspondientes al número de generadores. Por otro lado, se debe contar con un arreglo de k componentes para almacenar los valores de la función objetivo para cada hormiga.

3.3.2. Componentes del algoritmo

Hay ciertos procedimientos dentro del algoritmo que de alguna forma u otra deberán implementarse de manera secuencial [34]. Tal como se plantea en la Figura 3.2, para construir una solución final, el algoritmo en primera medida deberá inicializar los datos necesarios. En segunda instancia, ejecutará iteraciones correspondientes al trabajo de una colonia de hormigas de manera consecutiva hasta un determinado criterio de paro, indicando que se encontró una buena solución dentro de los parámetros descritos. Dentro de cada una de estas iteraciones, habrá tres componentes principales; el primero de ellos encargado de construir las soluciones para cada hormiga, el

segundo se encargará de calcular los datos necesarios para entregar la solución o calcular datos necesarios para el siguiente proceso: la actualización de feromona, la cual se utilizará en la siguiente iteración.

1. Inicialización de datos: En esta parte del proceso el algoritmo se encargará, por un lado, de leer los parámetros y las instancias del problema, y por el otro, calcular la información heurística y establecer el valor inicial de la feromona (ecuaciones 8 y 4). Dentro de los parámetros del algoritmo se incluyen el número de colonias a implementar como principal criterio de paro.
2. Construcción de la solución: Dentro de la construcción de la solución el algoritmo tiene 4 procedimientos principales:

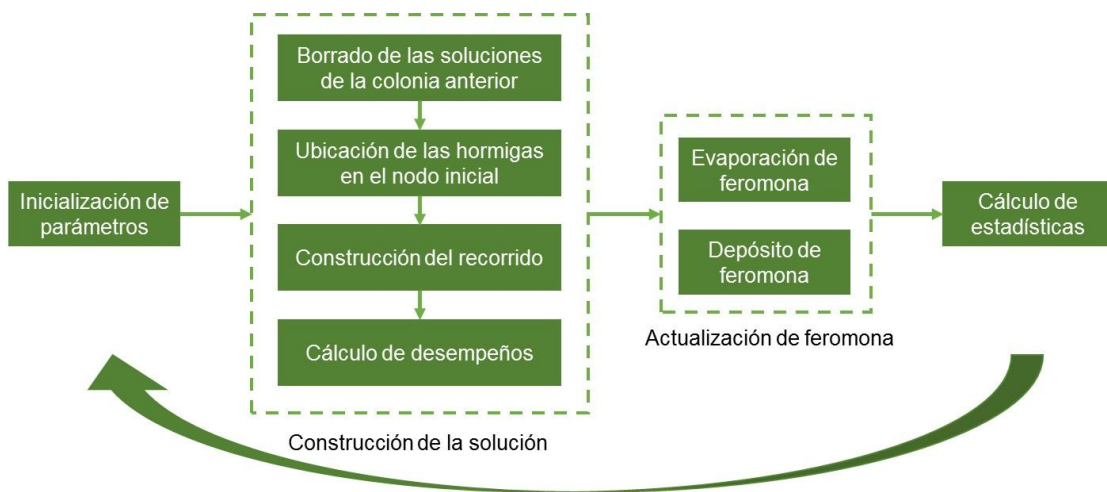


Figura 3.2. Componentes del algoritmo.

- a. El arreglo que almacena los recorridos de las hormigas debe borrarse en cada iteración, para esto, todos los elementos son llenados con un valor no factible (cero (0) para este caso debido a que los estados de los generadores son estados enteros del conjunto $[1, n]$).

- b. Todas las hormigas son puestas en el nodo inicial, para esto a la matriz que almacena los recorridos se adiciona una columna inicial auxiliar con el valor de 1 como estado ficticio de generación.

- c. Las hormigas generan su propio recorrido mediante la regla aleatoria proporcional [34] de calidad pseudo-aleatoria. En este procedimiento, es necesario calcular el numerador de la ecuación de probabilidad (ecuación 2) obteniendo un arreglo tridimensional del cual se extraerán para cada hormiga únicamente los valores asociados a los arcos que conectan al nodo sobre el cuál se encuentra la hormiga y los nodos del siguiente generador (n arcos). De esta manera se restringe a las hormigas a escoger un estado por generador. Estos valores son sumados para luego generar un número aleatorio entre cero (0) y el valor de la suma. Dentro de un proceso cíclico, los valores extraídos de la matriz tridimensional son sumados uno a uno en cada ciclo y en orden de ubicación, cuando el valor de esta suma sea igual o mayor al número aleatorio generado, el índice correspondiente al número del ciclo actual se atribuye el arco seleccionado. Este mecanismo se repite hasta que se complete el recorrido de cada hormiga, es decir, hasta que las hormigas generen una solución que contenga un punto de operación para cada generador conectado.

- d. Como último paso se calcula el desempeño de cada recorrido mediante la función de costo (ecuación 1).

3. Actualización de feromona: Este componente consta de dos procesos:

- a. Evaporación de feromona: En este proceso, todos los valores de la matriz de feromona decrecen en un factor constante ρ (ecuación 5).
 - b. Depósito de feromona: Para cada recorrido generado por las hormigas se busca los arcos utilizados y al valor actual se adiciona la feromona a depositar dada por la ecuación 7. Para poder crear soluciones factibles de acuerdo a la segunda restricción nombrada anteriormente, el depósito de feromona sólo se realiza si la potencia generada por el recorrido de la hormiga es suficiente para no exceder el límite de demanda de la red externa.
4. Cálculo de estadísticas: Para finalmente obtener un resultado es necesario guardar para cada colonia el mínimo costo de operación y el mejor recorrido logrado y luego compararlos con los actuales mejores y así al final del proceso entregar los mejores globales. Con estos valores el algoritmo entregará los puntos de operación de los generadores a utilizar. A manera de estadística también se decidió guardar los costos netos de operación de los generadores y la potencia de generación total.

3.4. Resumen

En este capítulo se presentó el diseño de la solución propuesta. Como parte de este diseño se mostraron algunos conceptos básicos de los algoritmos ACO para poder comprender un poco la herramienta computacional usada en la solución. Se describió de manera más formal y concisa el problema a solucionar para luego exponer de manera detallada el mapeo del problema hacia los términos del algoritmo (feromona, heurística, etc.). Por último, se

expuso la estructura del algoritmo, es decir, la manera en que se construyó la solución computacionalmente empezando por una explicación de cómo fueron representados los datos usados por el algoritmo (estructura y dimensiones) y así poder exponer los componentes implementados en la solución tales como: construcción de soluciones, actualización de feromona entre otros.

Capítulo 4. Experimentación y Análisis de Resultados

En esta sección se presentará la experimentación y el análisis de resultados correspondientes a la evaluación y el desempeño de la herramienta diseñada. Para ello, se elaboró una herramienta de pruebas con el fin de poder cambiar los parámetros de ésta y así observar cómo se comporta el algoritmo de una manera más cómoda y rápida. En esta herramienta, un valor de demanda es generado cada intervalo de tiempo de manera aleatoria facilitando de esta manera el proceso de experimentación. La herramienta es explicada en el apéndice A con mayor detenimiento. A lo largo de este capítulo se describen los parámetros del problema usados para luego realizar el respectivo análisis de resultados. Estos análisis se presentan dentro de algunos casos de estudio para poder validar el desempeño de la herramienta. Finalmente se realizó un breve análisis de los tiempos de ejecución del algoritmo para validar su potencial de trabajar en entornos reales en cuanto rapidez de respuesta se refiere.

4.1. Parámetros del problema

4.1.1. Instancias del problema

Como se vio anteriormente, las instancias del problema consisten de tres matrices: la *matriz de estados de potencia* de cada generador conectado, la *matriz de costos* correspondiente para operar en los estados de generación respectivos y la *matriz de costos de operación normalizados*. Para disponer de estos valores y para futuros análisis, se construyó un procedimiento en el cual se arman estas matrices a partir de las potencias máximas de generación de los dispositivos conectados, un incremento de potencia uniforme para cada estado de generación en términos de su potencia

máxima y un arreglo de valores que indicará a qué tipo de generador corresponde cada potencia máxima (Figura 4.1).

The image shows a software window titled "Parámetros de los generadores". It is divided into two main sections. The first section, "Potencias (KW)", contains three input boxes with the values 100, 80, and 30. The second section, "Incrementos (%)", contains a spinner control with the value 20. Below these, the "Tipo de generador" section contains three input boxes with the values 1, 3, and 4.

Figura 4.1. Parámetros requeridos para la construcción de las instancias del problema.

Para el caso de las fuentes despachables el valor de su potencia máxima permanecerá constante, no es el caso de las fuentes no-despachables cuyo máximo valor de potencia depende de las condiciones del clima y varía con el tiempo. Considerando un buen diseño del sistema, se asumirá que las fuentes despachables serán capaces de suplir por sí mismas la demanda requerida en situaciones extremas para no sobrepasar el límite de demanda máximo de la red externa, considerando el peor de los casos en el cual las fuentes no-despachables se encuentren generando una potencia nula.

Para efectos de simulación y pruebas de desempeño se implementaron cuatro diferentes funciones de costo indicadas con un número entero (Figura 4.1): 4 para una función constante, 3 para una función lineal creciente, 2 para una función exponencial con índice 0.5 y 1 para una función exponencial con índice 2. Esto permitirá evaluar cómo responde el algoritmo ante diferentes tipos de funciones que se puedan encontrar en los diferentes tipos de generadores. Las funciones constante y lineal con pendiente pequeña en relación a las otras funciones podrían representar fuentes no-despachables, mientras que las dos funciones restantes con altos valores de costo podrían

representar a las fuentes despachables. De acuerdo con esto, el procedimiento calculará los respectivos estados de generación para cada fuente (de acuerdo a las potencias máximas y los incrementos deseados), en seguida calculará los costos para estos estados de acuerdo a las funciones escogidas para posteriormente calcular la matriz de costos normalizados y darle forma tridimensional.

4.1.2. Parámetros del algoritmo

Varios estudios experimentales de algoritmos ACO para el problema de vendedor viajero indican valores para los parámetros del algoritmo que dan resultados de buen desempeño. Dada la similitud de nuestro problema con el del vendedor viajero se tomaron estos parámetros, que aunque no sabiendo si son los más indicados, arrojaron buenos resultados. Dado que no es el objetivo de este trabajo no se realizaron pruebas de desempeño teniendo a los parámetros del algoritmo como variables en estudio. Estos estudios recomiendan utilizar los siguientes parámetros:

α	β	ρ	K
1	2 a 5	0.5	N

Tabla 4.1. Parámetros recomendados para el algoritmo AS.

En este caso, el parámetro β se fijó en 2 para no desviar las primeras iteraciones hacia soluciones triviales y hacer converger el algoritmo más rápido hacia soluciones factibles. Por otro lado el número de hormigas corresponde al número total de nodos del problema, es decir, al producto del número de generadores y el número de puntos de operación de cada fuente. Por último, de acuerdo a las potencias máximas usadas de los generadores y las funciones de costo implementadas el valor C^{nn} fue fijado en $5(MXN/KWh)$. De acuerdo a experimentaciones realizadas (3 generadores), el

algoritmo convergía antes de la quinceava iteración, luego el número de colonias permaneció en este valor (15).

4.2. Análisis de resultados

En este capítulo se muestran los principales resultados que se obtuvieron a través de una serie de pruebas, se mostrarán aspectos respecto a los objetivos que busca la implementación de una microred como suministro ininterrumpido o modularidad.

4.2.1. Problema de no convergencia

Cuando la potencia de autogeneración es muy alta y se acerca al límite máximo de la capacidad instalada, la exploración del algoritmo puede no ser suficiente para que converja, principalmente por las siguientes dos causas:

1. El incremento de los estados de generación es alto y reduce el espacio de búsqueda al punto de que la exploración del algoritmo no permite considerar la o las soluciones factibles.
2. Para grandes instancias, el incremento de las posibles soluciones crece exponencialmente mientras el número de hormigas los hace en forma de producto, esto hace que la exploración no sea suficiente para encontrar las soluciones factibles.

Este problema se podría mejorar algorítmicamente implementando algún otro tipo de ACO o implementado la técnica de búsqueda local [34] haciendo que el algoritmo converja sabiendo que existe al menos una solución factible. Sin embargo, para esta herramienta se implementó una solución alternativa gracias a la particularidad del problema. Dado que se sabe que estos problemas de convergencia sólo se presentan cuando el sistema exige un estado de generación local cercano al máximo, cuando no se presente convergencia (fenómeno aleatorio) el algoritmo indicará trabajar al máximo

de la generación local y de esta manera seguir cumpliendo con la restricción principal.

4.2.2. Restricción Principal

De acuerdo a los objetivos del diseño, se estableció uno principal que viene dado por el hecho de que la demanda de energía de la red externa no supere cierto valor impuesto por el usuario. En la Figura 4.2 se muestra el comportamiento de la solución para 24 diferentes valores de demanda, estos valores pueden bien representar las 24 horas del día si los valores de demanda cambian dentro de un marco de tiempo de una hora, por facilidad de visualización las gráficas presentan interpolación lineal. En esta gráfica se puede observar que la demanda de la red externa (azul) efectivamente no sobrepasa el límite establecido (naranja) aun cuando la demanda total de la microred (morada) así lo exige. Por esto mismo, en aquellos instantes en que la demanda se hace máxima y se encuentra por encima del límite, la generación local (amarilla) pasa a hacer máxima también a cuentas de respetar el límite establecido.

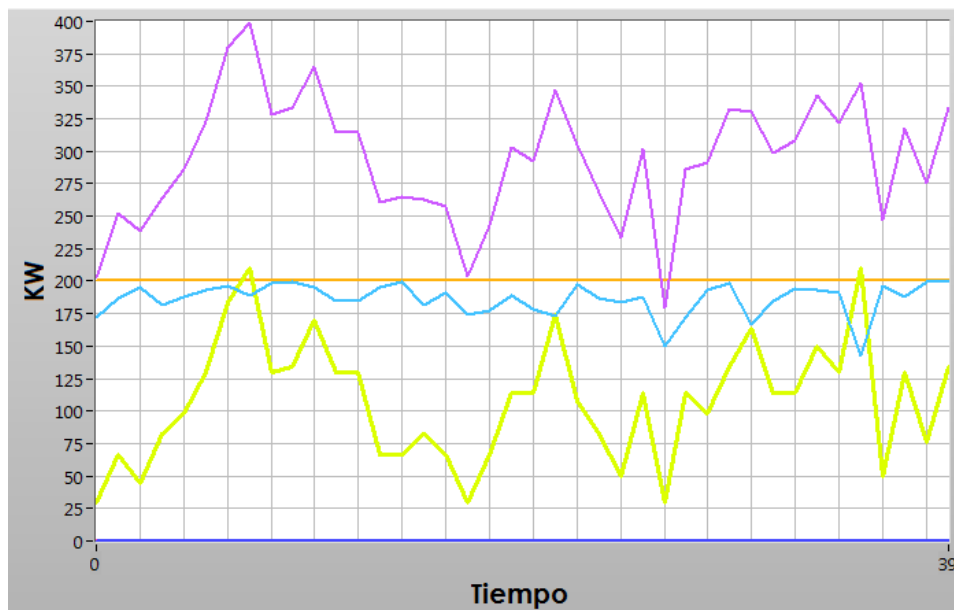


Figura 4.2. Comportamiento de la solución en un marco de tiempo de 40 unidades.

4.2.3. Caso de estudio 1

Una vez corroborado que el objetivo principal se cumple con el algoritmo, lo siguiente será realizar un análisis sobre la función objetivo de manera que se permita concluir que el algoritmo se comporta como debería. La Figura 4.3 muestra las funciones de costo implementadas para un primer análisis. En esta gráfica se observa tres funciones distintas: Una constante (verde), una lineal (roja) y una exponencial de índice mayor a uno (blanca). De esta gráfica se puede intuir que para bajas potencias (menores a 50KW) de generación será más deseable operar la función cuadrática dado que representa un menor costo con respecto a la lineal. Por otro lado el costo de operación de la función constante es tan bajo que siempre resulta factible elegir este generador dentro de la solución, representando así lo que podría ser el comportamiento para una fuente no-despachable.

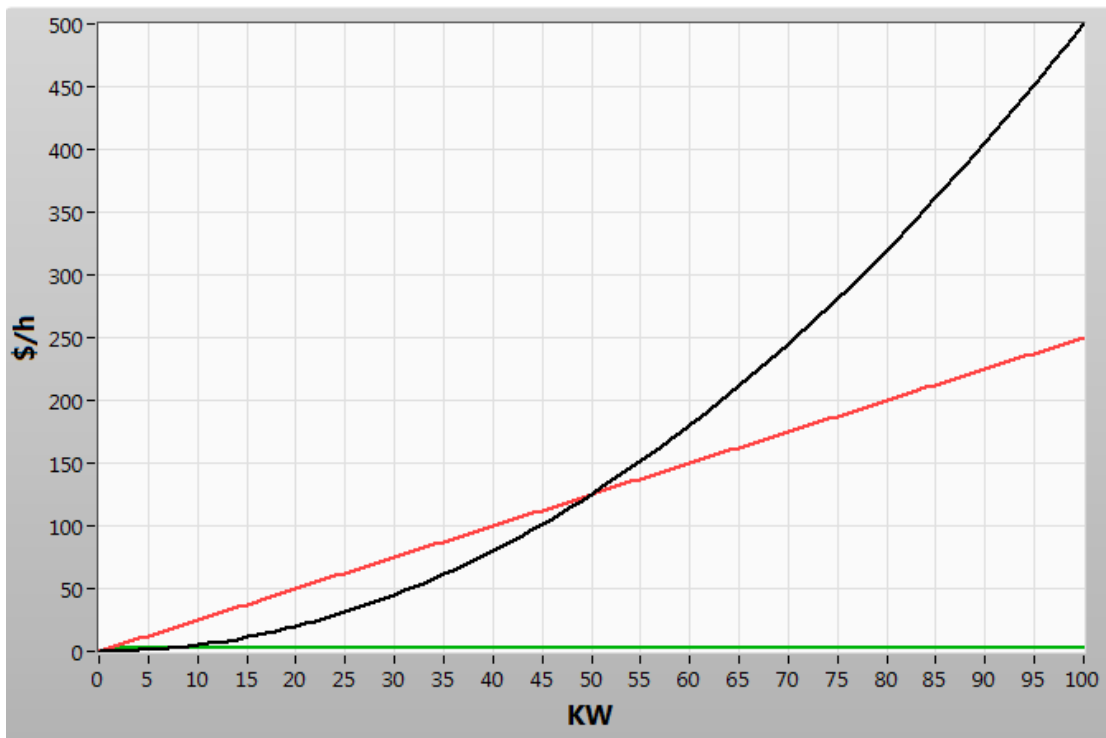


Figura 4.3. Funciones de costo implementadas para el caso de estudio 1.

En la Figura 4.4 se presenta el comportamiento del algoritmo para diferentes estados de demanda de la microred. El perfil de demanda utilizado presenta situaciones en las cuales no se requiere autogeneración y situaciones extremas de demanda cuando se requiere el máximo estado de generación local.

1. No se requiere autogeneración: Este caso se presenta durante las primeras 6 unidades de tiempo (Figura 4.4). Cuando la potencia de generación local es cero pueden presentarse soluciones triviales no deseadas (apagar todos los generadores) estas soluciones se evitaron estableciendo como potencia local requerida un valor pequeño comparado con el de los generadores (1KW). La solución converge a soluciones donde los puntos de operación varían según el generador como sigue:
 - a. Generador con función constante (verde): tiende a operar a su máxima potencia debido a que esta se ve desviada por la información heurística que indica que el costo-beneficio (inverso del costo normalizado) para este punto de operación es el mayor con respecto a los otros estados. Debido a esto en la Figura 4.4 este generador permanece entregando su máxima potencia (30KW).
 - b. Generador de función cuadrática (Amarillo): la mejor solución viene dada por un estado de operación en reposo, desviada gracias a la feromona quien indica que los menores costos de operación se presentan con este punto de operación.

c. Generador de función lineal (roja): del mismo modo que el generador de función cuadrática, si la potencia local requerida es cero, la convergencia del algoritmo arroja que el generador debe permanecer en reposo. Cabe resaltar que dada la particularidad de este generador donde su heurística hace que cualquier punto de operación sea igual de deseable, la feromona termina llevando la convergencia hacia un punto de operación de reposo, resultado que debe esperarse.

2. Se requiere autogeneración:

a. Generador de función constante (verde): Su comportamiento no varía en comparación con el caso anterior, siempre tenderá a entregar su máxima potencia de generación gracias a la información heurística. En el caso de las unidades de tiempo 7 y 8 donde la generación local requerida se suple únicamente con este generador se corrobora efectivamente que es el generador a emplear dados sus costos de operación.

b. Generador de función cuadrática (Amarillo): Cuando la potencia de generación local requerida no se alcanza a suplir con la fuente no-despachable (función constante) este generador entrará a operar en un estado u otro en combinación con el de función lineal. Como ya se mencionó anteriormente, debido a las funciones de costo se puede inferir que es deseable operar este generador en un estado menor a 50KW, comportamiento que se puede observar de la Figura 4.4, y sólo operarlo en una potencia mayor cuando los generadores restantes operan en su potencia máxima y se requiere de potencia adicional (tiempos: 17, 18 y 20).

- c. Generador de función lineal (roja): De acuerdo a su función de costo cualquier punto de operación es igual de deseable, sin embargo para altas potencias de generación es más factible usar este generador en vez del generador de función cuadrática. Debido a esto es que si la demanda lo amerita este generador se encontrará operando en su máxima potencia (tiempos 16 – 19 y 21 – 23).

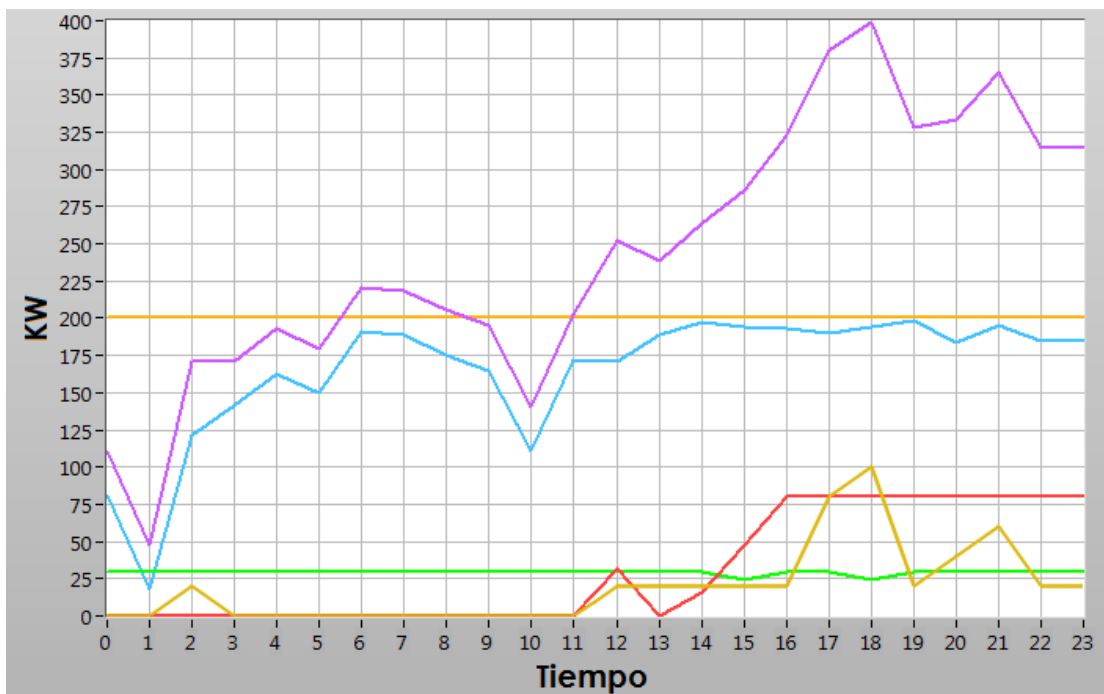


Figura 4.4. Comportamiento del algoritmo para diferentes situaciones de demanda en el caso de estudio 1.

Si bien cuando se requiere una generación local alta lo mejor es operar el generador de función cuadrática por debajo de 50KW y el de función lineal por encima de este mismo valor, un comportamiento tan marcado no es tan simple de ver cuando la generación local es pequeña. Para evaluar la función objetivo en estos estados se tomará como ejemplo el tiempo 12. En este

caso la potencia de autogeneración necesaria es mayor de 50 KW en cuyo caso 30 KW serán tomados del generador de función constante (verde) y el resto de los otros generadores. Aun cuando la potencia restante (aproximadamente 25KW) puede suplirse con el generador cuadrático operando en 40KW (dado que los puntos de operación son discretos), en cuyo caso generaría un costo de 80\$/h (2\$/KWh), el algoritmo decide operar éste en un estado anterior (20KW) y el generador lineal en 16KW generando un costo de 60MXN/h (1,6\$/KWh). Aunque ambas soluciones son factibles resulta más benéfico operar ambos generadores dado que su costo de operación normalizado es menor.

4.2.4. Caso de estudio 2

Como segunda experimentación se decidió trabajar con una función radical en vez de la función exponencial, esta función puede representar de mejor manera la función de costo de una microturbina (fuente despachable), debido a que éstas tienen su mayor eficiencia en una potencia nominal que por lo regular se encuentra cerca de su punto máximo de potencia de operación. La Figura 4.5 muestra las respectivas funciones de costo para los generadores usados, donde se puede inferir que a pequeñas potencias de generación resulta más económico trabajar con el generador de función constante. A continuación se realizará el respectivo análisis de este caso de estudio para la Figura 4.6 bajo el mismo perfil de demanda del caso de estudio 1:

1. No se requiere autogeneración: El comportamiento para esta situación no cambia con respecto al caso de estudio 1 debido a que para una generación local nula la mejor alternativa sigue siendo la de operar la fuente no despachable (desviada gracias a la información heurística) y mantener los otros generadores en reposo (desviada por feromona y heurística) donde se presenta el menor costo de operación cumpliendo con la restricción principal.

2. Se requiere autogeneración:
 - a. Generador de función constante (verde): Siempre la información heurística hará converger el algoritmo hacia un punto de operación de potencia máxima.
 - b. Generador de función cuadrática (Amarillo): A diferencia del caso anterior la feromona y heurística de este generador (costo-beneficio) harán converger el algoritmo hacia dos puntos de operación: uno de máxima potencia cuando es necesario hacer uso de este generador y uno de reposo total cuando no hay necesidad de operarlo. Debido a esto en la Figura 4.6 sólo se observa a este generador operando en dos estados (0 o 100KW)
 - c. Generador de función lineal (roja): De acuerdo a su función de costo cualquier punto de operación es igual de deseable, sin embargo para bajas potencias de generación es más factible usar este generador en vez del generador de función radical. Debido a esto es que si la demanda lo amerita este generador se encontrará operando en su máxima potencia sólo de ser necesario (tiempo 17).

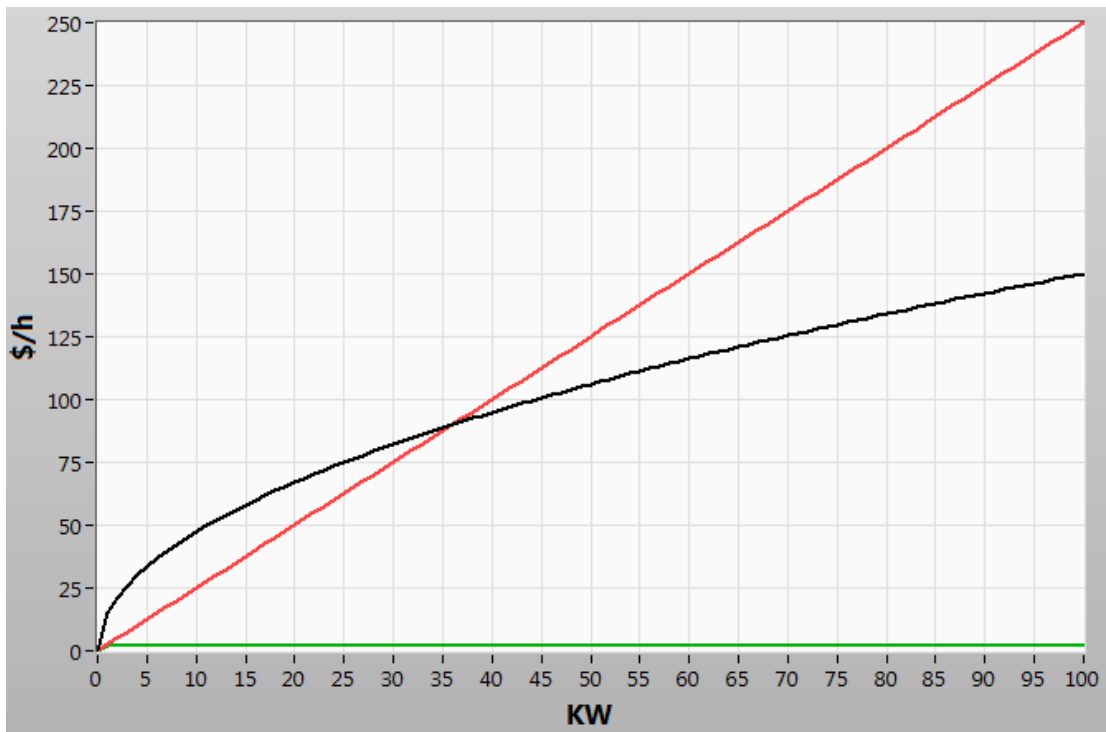


Figura 4.5. Funciones de costo para los generadores usados en el caso de estudio 2.

4.2.5. Caso de estudio 3: Modo isla

La facultad de poder operar aisladas de la red es una de las características principales de una microrred. Si ésta cuenta con mecanismos de respuesta a la demanda, donde un nivel máximo de demanda puede ser establecido, la microrred debe estar en capacidad de establecer un suministro ininterrumpido de energía dentro un rango de demanda limitado por el control de cargas (respuesta a la demanda).

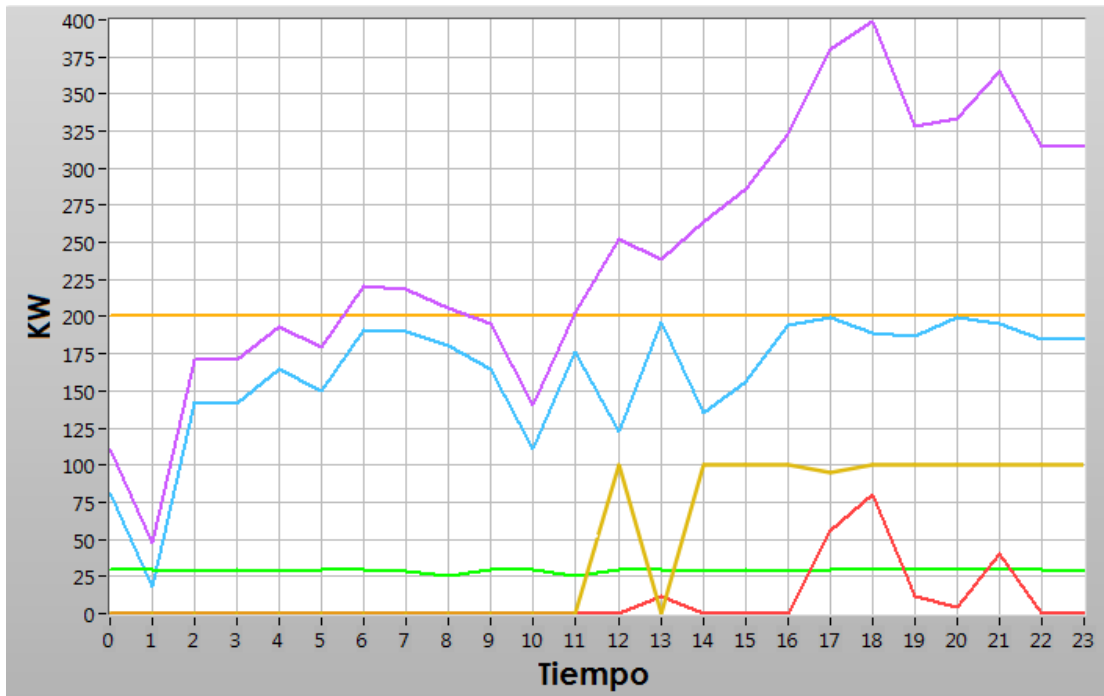


Figura 4.6. Comportamiento del algoritmo para diferentes situaciones de demanda en el caso de estudio 2.

Considerando que la microred en la cual esté operando el algoritmo cuenta con sistemas de control de cargas, la solución diseñada debe responder igualmente en esta clase de situaciones. A diferencia de un estado de conexión a la red externa, la generación local deberá ser suficiente para suplir la demanda total de la microred. Cuando la microred entre a operar en modo isla, la potencia requerida para generar de manera local no será la suficiente para no superar un límite de potencia de la red externa sino para suplir la demanda total de la microred.

La Figura 4.7 muestra cómo sería el comportamiento de la solución para una operación en modo isla. En esta figura un repentino corte de energía por parte del servicio público se presenta haciendo que la potencia externa (azul) se vaya a cero y los sistemas de respuesta a la demanda entren en vigencia logrando que la carga de la microred (morada) no supere cierto valor

(180KW). De acuerdo con esto, el algoritmo permite generar siempre una potencia local (gris) siempre mayor a la requerida, de igual manera, con la combinación de estados de potencia que impliquen el mejor costo-beneficio del sistema. Si la microred cuenta con sistemas almacenadores de energía, la potencia excedente puede dedicarse a la carga de estos sistemas, de lo contrario será energía desperdiciada.

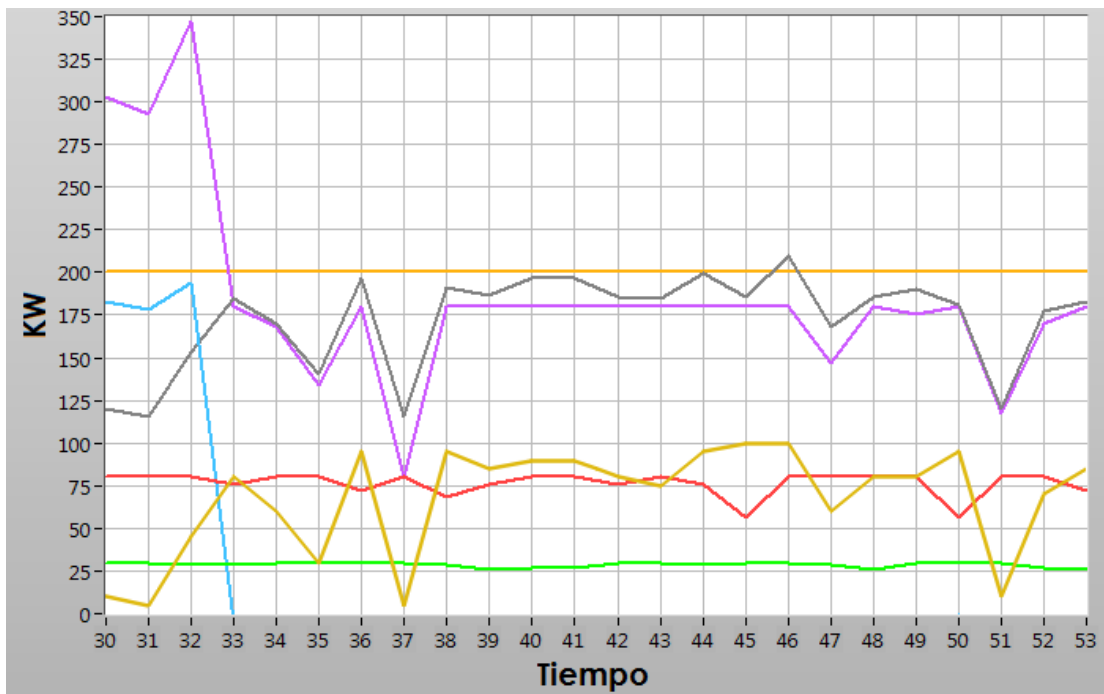


Figura 4.7. Comportamiento de los generadores con la microred operando en modo isla.

De los casos de estudio cabe resaltar que las soluciones entregadas por el algoritmo no siempre entregan el mínimo costo de operación debido a que la función objetivo está dada por un parámetro de costo-beneficio al operar los generadores y no únicamente de costo. Este enfoque es más benéfico para la aplicación debido a dos razones: por un lado, los generadores tenderán a operar en el mejor estado dada la restricción principal entregando la mejor relación costo/potencia es decir una alta potencia a un costo bajo; por otro lado, en situaciones donde el costo no es el mínimo posible, la potencia local será más de la necesaria haciendo que la energía consumida de la red

externa disminuya y esto se vea reflejado en una disminución adicional en los costos por tarifa eléctrica.

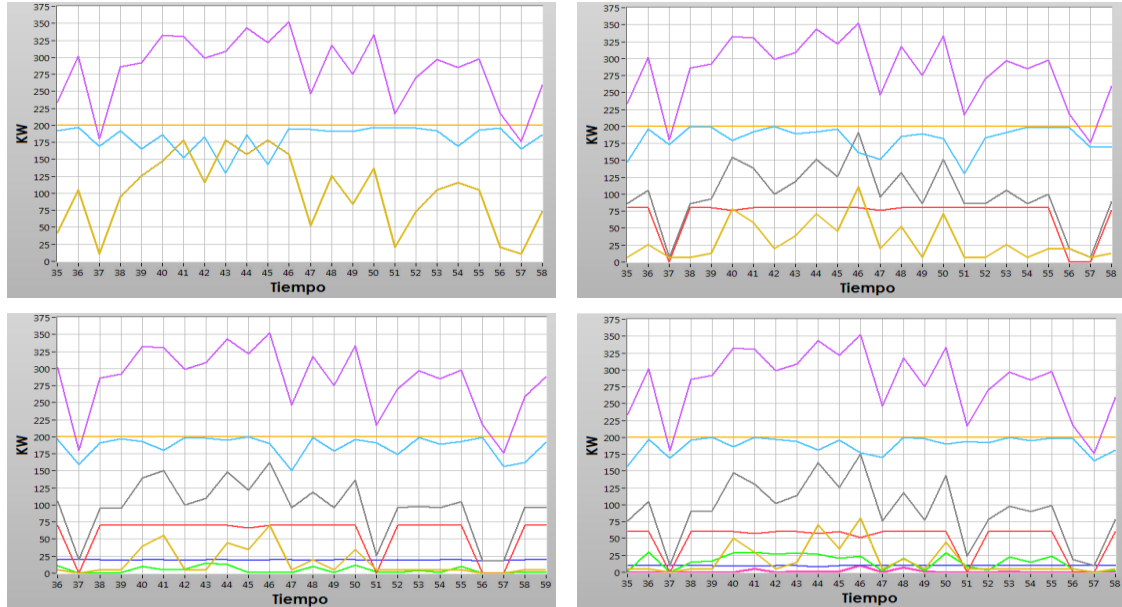


Figura 4.8. Respuestas del algoritmo para 1, 2, 4 y 5 generadores.

Por último se hicieron pruebas usando números diferentes de generadores para corroborar la modularidad de la solución, es decir, la capacidad del algoritmo de aceptar más generadores sin comprometer sus resultados. La Figura 4.8 muestra al algoritmo actuando con diferente número de generadores y un mismo perfil de demanda, asumiendo que la potencia máxima generada de manera local es suficiente para suplir el máximo requerido (La suma de las potencias máximas de los generadores siempre fue 210KW). Cualquiera que sea el caso la restricción principal siempre se sigue cumpliendo.

4.2.6. Tiempos de ejecución

Una de las principales motivaciones de haber usado una herramienta meta-heurística estuvo dada por la calidad de estos algoritmos para encontrar

soluciones en tiempos relativamente cortos. Debido a esto, es importante realizar un análisis en los tiempos de ejecución para determinar si efectivamente esta herramienta se acopla con el problema y así incrementar la viabilidad de llevar esta solución a la práctica.

La Tabla 4.2 muestra los tiempos de ejecución aproximados del algoritmo, teniendo en cuenta que sobre éstos las variables más influyentes son el número de hormigas y el número de colonias. Debido al problema de no convergencia explicado con anterioridad, fue necesario escoger un número de colonias común no muy alto de manera que no se justifique por los tiempos de ejecución, ni muy bajo de manera que represente un alto número de no convergencias dentro de la solución. De lo anterior, para esta prueba se escogió un número de colonias igual a 30 y sólo se tuvo en cuenta el número de hormigas como variable de estudio, el cual depende del número de generadores y el incremento discreto de los puntos de operación.

De la Tabla 4.2 se puede observar que el hecho de añadir generadores no es tan crítico como tener incrementos más finos de potencia en el algoritmo. Por último, se realizó una prueba adicional donde teniendo cinco generadores se estableció un incremento de un 1% (incremento extremo), obteniendo un tiempo de ejecución aproximado 30 segundos. Teniendo en cuenta que los cambios de las condiciones de operación en una microred industrial no varían con tal rapidez, esta prueba revela que algoritmo podría operar en un entorno real en cuanto a tiempos de ejecución se refiere. Estas ejecuciones se llevaron a cabo en una computadora Laptop Toshiba T215D-S1150 con 4GB de memoria RAM y Labview versión 2011 de 32 bits.

Número de generadores	Incremento (%)	Número de nodos/hormigas	Tiempo de ejecución (ms)
1	20	6	1
	15	8	3
	10	11	5
	5	21	21
2	20	12	6
	15	16	9
	10	22	21
	5	42	64
3	20	18	12
	15	24	19
	10	33	33
	5	63	115
4	20	24	24
	15	32	36
	10	44	47
	5	84	195
5	20	30	26
	15	40	38
	10	55	85
	5	105	305
	1	505	29735

Tabla 4.2. Tiempos aproximados de ejecución para diferentes pruebas.

Capítulo 5. Conclusiones y Trabajo Futuro

A lo largo del desarrollo de la solución propuesta se encontraron diferentes aspectos que valen la pena resaltar como resultados claves de esta investigación, tanto fortalezas como limitaciones hallados hacen parte de estos aspectos y son detallados a continuación. En seguida, se describirá de forma breve otros tipos de trabajos que se recomiendan llevar a cabo posterior a esta investigación, cuáles son las posibles rutas y los posibles beneficios que se pueden obtener de trabajos de este tipo.

5.1. Conclusiones

La carencia de herramientas que ayuden a la integración de energías alternativas en entornos industriales ha frenado este mercado a comparación de otros más desarrollados como la generación a gran escala en los parques eólicos. Este hecho enfatiza la necesidad incuestionable del desarrollo de instrumentos que permitan una penetración más prominente de estas energías en ambientes industriales. Esta tesis presentó una solución perfilada hacia la integración de energías alternativas en este tipo de ambientes dada la necesidad mencionada y sus beneficios económicos y medioambientales. La principal característica de esta solución viene dada por el hecho de que la energía es generada de manera local, cambiando el enfoque tradicional de las grandes compañías en México y permitiendo un control sobre la energía generada. Por otra parte, la herramienta es independiente de compañías y tecnologías que el usuario desee seleccionar.

La administración inteligente de energía en microrredes no es un problema sencillo; dentro de los principales desafíos que se deben afrontar se encuentra la naturaleza multi-objetiva que envuelve el desarrollo de estos

tipos de sistemas. En esta tesis se diseñó una herramienta para la administración de potencia y energía en microrredes industriales encargada de tomar decisiones y cumplir objetivos pactados sin comprometer índices básicos de desempeño. A fin de esto, se trabajó bajo dos directrices fundamentales: reducir el precio por KW/h generado y reducir los costos por consumo del servicio eléctrico. Para lograr esto se propusieron estrategias incorporadas a una herramienta de control basada en la generación de soluciones heurísticas por medio de colonias de hormigas (ACO) tomando en cuenta el mercado eléctrico en México. El hecho de trabajar bajo un régimen tarifario permitió establecer cuáles son los puntos estratégicos que permiten obtener un mejor beneficio económico con la administración de fuentes de energía.

Del hecho de tener tantos objetivos por cumplir en la administración de energía parte la necesidad de clasificar y priorizar cada uno de ellos con el fin de centrar la atención en aquellos de mayor relevancia. Los objetivos sobre los cuales se enfatiza este trabajo se describen a continuación:

5.1.1. Suministro ininterrumpido

De los objetivos a cumplir en la gestión de energía, el suministro ininterrumpido es sin duda el de mayor prioridad. Si bien mientras la microrred se encuentra conectada a la red externa no es la preocupación, en el caso de presentarse un corte de energía sí lo es. Para estas situaciones, la herramienta es capaz de cumplir con este objetivo mientras la demanda de la microrred se encuentre dentro de las capacidades de autogeneración instaladas.

5.1.2. Reducción de costos

Dado el régimen tarifario se pudo establecer que uno de los principales beneficios económicos por tarifa eléctrica viene dado por un control sobre la máxima demanda eléctrica de la microrred. Así pues, se pudo instaurar este

factor como restricción principal y cumplirla a cabalidad con la herramienta. Por otro lado, se estableció al costo de operación normalizado como función objetivo y así obtener precios por energía generada más convenientes. Dadas estas estrategias se obtienen reducciones de inversión por tarifa eléctrica (máxima demanda y reducción de energía acumulada) y por operación y mantenimiento de las fuentes de energía locales.

5.1.3. Modularidad

El uso de la herramienta meta-heurística proporciona a la solución una propiedad modular. Gracias a ésta, es posible operar la solución al usar cuales quiera número de fuentes/tecnologías de energía con sólo proporcionar su máxima potencia de operación y su correspondiente función de costo.

5.1.4. Beneficios Medioambientales

Aunque no es un objetivo directo de la solución, los beneficios medioambientales se presentan por añadidura. Al usar fuentes alternativas de energía, el hecho de dejar de consumir de la red externa proporciona dos beneficios principales: por un lado, se mejora la eficiencia energética evitando pérdidas en las líneas de transmisión, y por otro, si la central eléctrica de la cual se obtiene la energía externa trabaja bajo la quema de combustibles fósiles, una reducción de generación desemboca en una reducción en las emisiones de gases contaminantes.

Una vez vistos los beneficios potenciales de la administración de energía en microredes, es importante encarar los desafíos presentes al implementar esta solución en ambientes reales. El hecho de basar esta solución en herramientas computacionales tiene como principal finalidad hacer de la administración de energía una característica autónoma de la operación de la microred. Es importante notar que la toma de decisiones en la administración de la energía debe ser robusta y debe tomarse dentro de un marco de tiempo

acorde a la aplicación. La naturaleza multi-objetiva del problema y la necesidad de una “rápida” toma de decisiones hace de las técnicas heurísticas como la optimización por colonias de hormigas (ACO) una herramienta acorde a este tipo de problema dada su principal característica: encontrar soluciones cercanas a las óptimas dentro de un corto periodo de tiempo.

5.2. Trabajo Futuro

Si bien la herramienta implementada se acopla bien a la aplicación, existen más parámetros que no se tuvieron en cuenta y que pueden incluirse en el estudio de ésta y así seguir validando su potencial para usos en ambientes reales. Por una lado, las funciones de costo usadas no son reales, de esta manera un siguiente paso vendría dado por la implementación de un modelado que permita establecer funciones de costo que representen fuentes de energía reales. Por otro lado, aunque el propósito general al trabajar la función objetivo es disminuir los costos de operación de las fuentes de energía instaladas, un beneficio económico aún mayor podría obtenerse al tener como variable adicional los precios de energía de la red externa. De esta manera se podría considerar como una fuente adicional y obtener mejores resultados económicos no sólo de la energía a nivel local sino a nivel global.

Como segunda etapa de próximos desarrollos se puede considerar no sólo el control de despacho de potencia de generadores sino también el control de cargas eléctricas (conexión-desconexión, puntos de operación, modos de operación, etc.) y almacenadores de energía (despacho de potencia, estados de carga-descarga). Este control podrá mejorar la administración de energía y respetar límites de demanda más exigentes en el caso de estados conectados a la red y establecer estrategias de respuesta a la demanda en el caso de operar en modo isla. Así mismo, podría buscarse el cumplimiento de

otro tipo de objetivos no tratados mediante un enfoque multi-objetivo para algoritmos basados en colonias de hormigas [35]. Objetivos como el control de los ciclos encendido-apagado en generadores y carga-descarga en almacenadores de energía podrían ser de gran ayuda para extender su vida útil y disminuir costos de operación y mantenimiento.

En este trabajo, la herramienta diseñada no tiene en cuenta las pérdidas considerables que pueden presentarse en las redes de transmisión de la microred. Estudios en las arquitecturas de las microredes complementarían los objetivos planteados por la administración de la energía. Por un lado se encuentra la ubicación de los generadores, de esta ubicación depende en gran medida una mejora en la eficiencia energética por factores como pérdida en las interconexiones de dispositivos y pérdida de calor en los generadores de calor y potencia combinados. Por otro lado, de la correcta distribución sobre las cargas que alimentará cada generador depende la correcta operación de los generadores.

Si bien la administración de potencia y energía es una parte fundamental en la implementación exitosa de una microred, existen muchos otros aspectos que deben estudiarse para hacer de las microredes sistemas confiables, estables y flexibles. Factores de tiempo como los transitorios generados en la conexión y desconexión de dispositivos pueden limitar en cierta manera la administración de la energía. Por otro lado, una característica bien requerida en cualquier red eléctrica está dada por la calidad de la energía. Existen varios parámetros que deben cumplirse en las señales eléctricas para asegurar una buena calidad de la energía y no comprometer el rendimiento de ninguna carga eléctrica.

Existe un gran número de elementos adicionales que deben estudiarse para poder llevar a cabo la implementación de una microred: dispositivos de acoplamiento eléctrico (dispositivos electrónicos de potencia), sistemas de control en el despacho de potencia activa y reactiva, control de la frecuencia

eléctrica, dimensionamiento de generadores junto con almacenadores de energía, medidores inteligentes, sistemas de comunicación confiables, sistemas de monitoreo, protecciones y seguridad eléctrica, arquitecturas, sincronización y buses de interconexión, entre otros.

Referencias

- [1] Asamblea General . (1987,) Naciones Unidas. [Online].
<http://www.un.org/es/comun/docs/?symbol=A/42/427>
- [2] S. W. Couwenberg. (2008,) Overpopulation Awareness. [Online].
<http://www.overpopulationawareness.org/spain/es/articulos/66243-desarrollo-sostenible-y-crecimiento-demografico-como-problema-mundial.html>
- [3] UNED. (2013, Jun.) Energía y desarrollo sostenible. [Online].
<http://www.uned.es/biblioteca/energiarenovable3/impacto.htm#cabeceraimpacto>
- [4] F. A. Farret and M. G. Simoes, *INTEGRATION OF ALTERNATIVE SOURCES OF ENERGY*. Hoboken: Wiley, 2006.
- [5] International Energy Agency IEA, "CO2 Emissions From Fuel Combustion," 2012.
- [6] International Energy Agency IEA, "Key World Energy Statistics," 2012.
- [7] Communication, U.S. Department of Energy & Litos Strategic, "the SMART GRID: An introduction," 2008.
- [8] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, "World Population Prospects: The 2012 Revision, Highlights and Advance Tables," 2013.
- [9] C. Díaz and J. Hernández, "Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica – Estado del Arte," *Revista S&T*, pp.

53-81, 2011.

- [10] S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, and P. Crossley, *Microgrids and Active Distribution Networks*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [11] H. Zhou, T. Bhattacharya, D. Tran, T. S. T. Siew, and A. M. Khambadkone, "Composite Energy Storage System Involving Battery and Ultracapacitor With Dynamic Energy Management in Microgrid Applications," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 923-930, 2011.
- [12] J. Momoh, *SMART GRID Fundamentals of Design and Analysis*. Piscataway, New Jersey: JOHN WILEY & SONS, INC, 2012.
- [13] D. Hernández-Joya and J. Martínez-Carballido , "Strategies For Energy Management In Industrial Microgrids With A Local Cogeneration Approach," in *International Conference on Electronics, Communications and Computers*, Cholula, Puebla, 2013.
- [14] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas, "Microgrids management," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 6, no. 3, pp. 54-65, 2008.
- [15] Y. Chen and J. Wu , "Agent-based energy management and control of a grid-connected wind/solar hybrid power system," *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*, pp. 2362-2365, 2008.
- [16] P. Garcia, L. M. Fernandez, C. A. Garcia, and F. Jurado, "Energy Management System of Fuel-Cell-Battery Hybrid Tramway," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 4013-4023, 2010.

- [17] S. A. P. Kani, H. Nehrir, W. Caisheng, and C. Colson, "Real-time energy management of a stand-alone hybrid wind-microturbine energy system using particle swarm optimization," *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, 2011.
- [18] D. Meegahawatte, "A Design Method For Specifying Power Sources for Hybrid Power Systems," 2010.
- [19] A. Chaouachi, R. Kamel, R. Andoulsi, and K. Nagasaka, "Multiobjective Intelligent Energy Management for a Microgrid," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 99, 2011.
- [20] Comisión Federal de Electricidad (CFE). [Online]. <http://www.cfe.gob.mx/>
- [21] C. M. Colson, M. H. Nehrir, and S. A. Pourmousavi, "Towards real-time microgrid power management using computational intelligence methods," *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, pp. 1-8, 2010.
- [22] C. M. Colson, M. H. Nehrir, and C. Wang, "Ant colony optimization for microgrid multi-objective power management," *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES*, pp. 1-7, 2009.
- [23] J. Lagorse, M. G. Simoes, and A. Miraoui, "A Multi-Agent Fuzzy Logic Based Energy Management of Hybrid Systems," *Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. IEEE*, pp. 1-7, 2008.
- [24] M. Pipattanasomporn, H. Feroze, and S. Rahman, "Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation," *Power Systems Conference and Exposition*, pp. 1,8,15-18, 2009.

- [25] G. K. Venayagamoorthy, "Potentials and promises of computational intelligence for smart grids," *Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1,6,26-30, 2009.
- [26] R. Palma-Behnke, C. Benavides, E. Aranda, J. Llanos, and D. Saez, "Energy management system for a renewable based microgrid with a demand side management mechanism," *Computational Intelligence Applications In Smart Grid (CIASG), 2011 IEEE Symposium on*, pp. 1,8,11-15, 2011.
- [27] O. O. MENGI and I. H. ALTAS, "A Fuzzy Decision Making Energy Management System for a PV/Wind Renewable Energy System," 2011.
- [28] B. Sookananta, P. Utaton, and R. Khongsila, "Determination of the optimal location and sizing of Distributed Generation using Ant Colony Search," *Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) , 2010 International Conference on*, pp. 814-817, 2010.
- [29] H. Falaghi and M. Haghifam, "ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems," *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, pp. 555-560, 2007.
- [30] Y. Yang, W. Pei, and Z. Qi, "Optimal sizing of renewable energy and CHP hybrid energy microgrid system," *Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, pp. 1-5, 2012.
- [31] A. Bagherian and S. M. Moghaddas Tafreshi, "A developed energy management system for a microgrid in the competitive electricity market," *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*, pp. 1-6, 2009.
- [32] Departamento de Estadística e Investigación Operativa y Didáctica de

la Matemática. Universidad de Oviedo. [Online].
http://bellman.ciencias.uniovi.es/programacion_matematica/pmatematica_archivos/optsr056.pdf

- [33] Universidad de Valencia. [Online]. <http://www.uv.es/~sala/Clase14.pdf>
- [34] M. Dorigo and T. Stutzle, *Ant Colony Optimization*. Cambridge: Bradford, 2004.
- [35] A. P. Engelbrecht, *Fundamentals of Computational Swarm Intelligence*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005.

Apéndice A : Herramienta de pruebas

En esta sección se describirá la herramienta usada como banco de pruebas para los experimentos realizados. Se construyó una interfaz gráfica en *Labview* como se muestra en la Figura A.1. Esta interfaz se diseñó con un control de pestañas el cual permitirá al usuario alternar entre la modificación de los parámetros del algoritmo y las gráficas de desempeño.

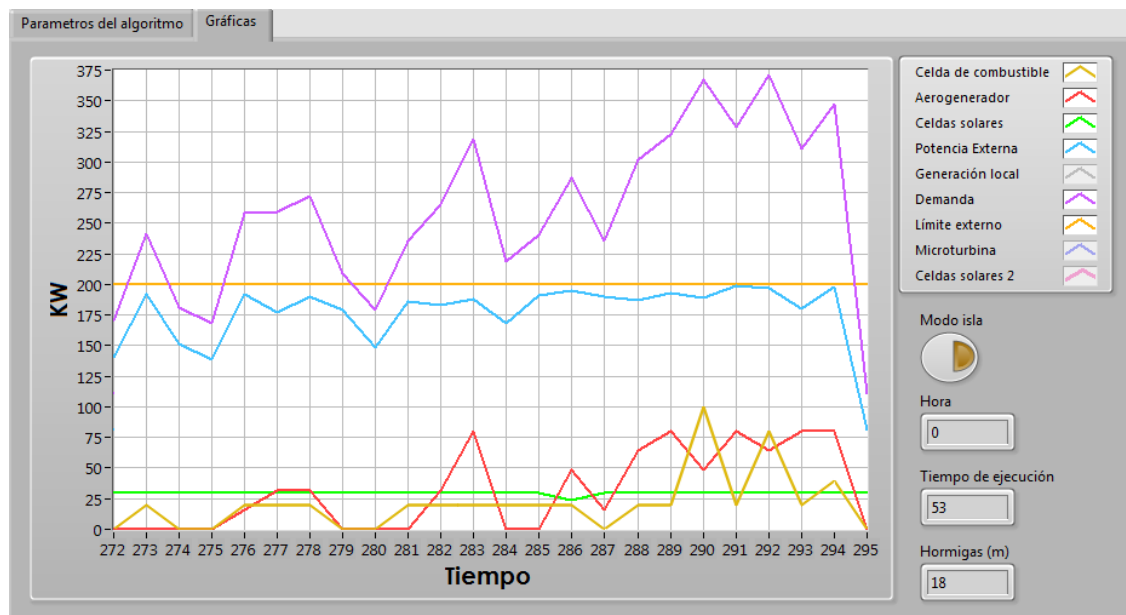


Figura A.1. Interfaz gráfica de la herramienta de pruebas.

Parámetros del algoritmo

En esta pestaña el usuario podrá ingresar todos los datos necesarios para la prueba. Como se observa en la Figura A.2 dentro de estos parámetros el usuario podrá cambiar el límite de potencia que la microred puede tomar de la red externa, parámetros correspondientes a los generadores (potencias máximas disponibles, tipo de función, etc.), parámetros propios de la

herramienta metaheurística (Factor de evaporación de la feromona, número de colonias etc.), un valor de retardo que se permite establecer para observar mejor el comportamiento de manera continua cuando el procesamiento es muy rápido y por último, aunque existe un vector de demanda de manera precargada con valores de todo tipo, el usuario podrá cargar este vector de manera manual para un caso particular.

Figura A.2. Parámetros del algoritmo.

Gráficas

En la pestaña de gráficas el usuario puede evaluar el desempeño de la herramienta mediante representaciones de potencia-tiempo. En esta pestaña se podrán visualizar todas las potencias de interés para el usuario listadas, a manera de ejemplo, en la parte derecha de la Figura A.1. Aunque el tiempo usado por el eje horizontal no es real, se quiso dar esta impresión asumiendo que la demanda eléctrica cambia dentro de un intervalo de tiempo definido, es por eso que cada tiempo discreto representa el desempeño de acuerdo a cada valor de demanda. Durante la ejecución de las pruebas el usuario podrá establecer el rango dentro del cual se encuentra cada eje de la gráfica y

establecer varios parámetros de ésta como se muestra en la Figura A.3. Modos de actualización o exportar los datos a Excel, son algunas de las acciones que se pueden ejecutar sobre la representación de los datos mediante el cuadro de dialogo que aparece mediante un clic derecho sobre la gráfica.

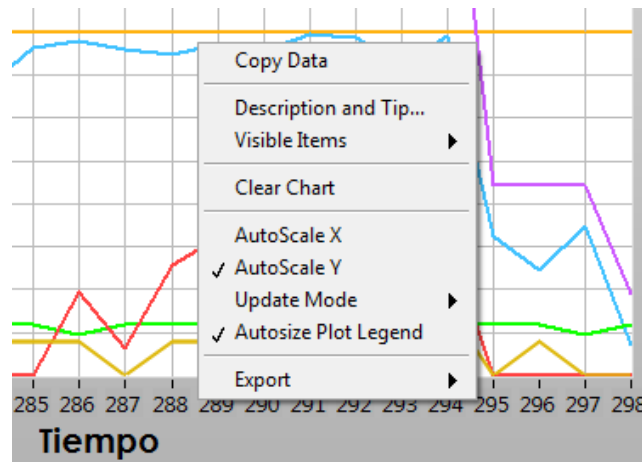


Figura A.3. Parámetros configurables para la representación de datos.

Así mismo se podrán modificar cada uno de los arreglos graficados por preferencias de visualización. Como se muestra en la Figura A.4, es posible para cada gráfica (mediante un clic izquierdo sobre la línea de color) modificar parámetros como: hacerlas visibles o no, cambiar de tipo de gráfica, modificar su presentación etc.

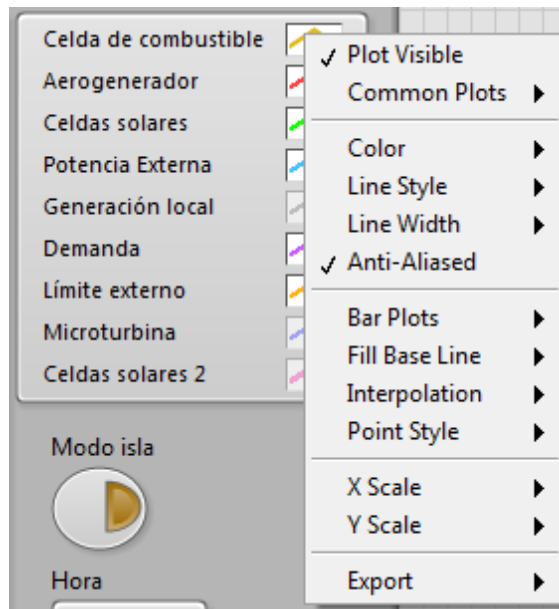


Figura A.4. Personalización de gráficas.

Para el caso de estudio 3, donde se presenta la operación de microrred en modo isla, aunque este parámetro es externo y debería comportarse en la interfaz como indicador, se construyó un control que permite simular este estado de operación (Figura A.5). Finalmente, para las pruebas de tiempo de ejecución se incluyeron tres indicadores adicionales (Figura A.5). El primero de ellos (Hora) permite visualizar en qué valor de tiempo se encuentra, es decir cuántos valores de demanda han entrado en operación. El segundo, tiempo de ejecución, muestra el tiempo que tardó el algoritmo en entregar la solución. El último indicador muestra el número de hormigas usado por el algoritmo.

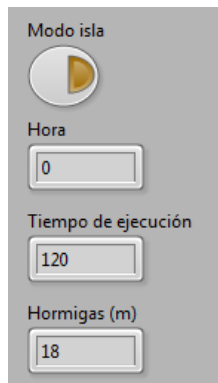


Figura A.5. Control de modo isla e indicadores adicionales.

Apéndice B: Publicaciones derivadas del trabajo

Durante el desarrollo de la tesis se presentaron dos publicaciones derivadas de ésta las cuales se citan a continuación:

- Hernandez-Joya, Daniel; Martinez-Carballido, Jorge, “Strategies for energy management in industrial microgrids with a local cogeneration approach,” *Electronics, Communications and Computing (CONIELECOMP), 2013 International Conference on*, vol., no., pp.17,20, 11-13 March 2013 [<http://dx.doi.org/10.1109/CONIELECOMP.2013.6525750>]

Abstract: In the integration of alternative energy in the electric power system, the microgrids concept provides an adequate platform for massive incorporation of this kinds of energy. This paper presents the multi-objective problem in the microgrids energy management and sets up strategies focused on industrial microgrids based on the electricity market framework and a local generation approach aims to beneficiate the users, the utilities and the environment.

- D. F. Hernández-Joya, J. Martínez-Carballido, “Multi-Technology Product Selection For Local Alternative Energy Generation On Companies With Small To Medium Electrical Load”, poster presented in the *Second International Symposium on Renewable Energy and Sustainability (ISRES), 2013*

Abstract: In an effort to contribute in the reduction of climate change and global warming, costumers of the power system are becoming more involved with the integration of the alternative sources of energy. Moreover, many

industries invest significant amounts of money on electricity; the autogeneration based on renewable energy helps alleviate these costs significantly, while improving the environment. Working with alternative energy requires considering a fluctuating regime, but a hybrid combination of alternative energy sources, including energy storage systems, can improve the stability and reliability of supply. Selecting and sizing the suitable technologies for a given set of conditions is an ever changing problem due to the available elements to design a solution in a given time.

Lista de Figuras

Figura 1.1. Porcentajes de combustibles usados en la generación de electricidad a nivel mundial.	4
Figura 1.2. Jerarquía de una microred en un sistema eléctrico tradicional (izquierda). Estructura típica de microred en una red de distribución (derecha). Tomada de [14].	9
Figura 1.3. Arquitectura general para un sistema híbrido de energía.	11
Figura 2.1. Consumo de energía eléctrica por sector a nivel mundial.	18
Figura 2.2. Perfil de demanda típico en una comunidad.....	19
Figura 3.1. Gráfica de construcción para administración de fuentes.	37
Figura 3.2. Componentes del algoritmo.	46
Figura 4.1. Parámetros requeridos para la construcción de las instancias del problema.....	52
Figura 4.2. Comportamiento de la solución en un marco de tiempo de 40 unidades.	55
Figura 4.3. Funciones de costo implementadas para el caso de estudio 1...	56
Figura 4.4. Comportamiento del algoritmo para diferentes situaciones de demanda en el caso de estudio 1.	59
Figura 4.5. Funciones de costo para los generadores usados en el caso de estudio 2.	62
Figura 4.6. Comportamiento del algoritmo para diferentes situaciones de demanda en el caso de estudio 2.	63
Figura 4.7. Comportamiento de los generadores con la microred operando en modo isla.	64
Figura 4.8. Respuestas del algoritmo para 1, 2,4 y 5 generadores.....	65
Figura A.1. Interfaz gráfica de la herramienta de pruebas.	81
Figura A.2. Parámetros del algoritmo.	82

Figura A.3. Parámetros configurables para la representación de datos. 83

Figura A.4. Personalización de gráficas..... 84

Figura A.5. Control de modo isla e indicadores adicionales. 85

Lista de tablas

Tabla 1.1. Compromisos en reducción de emisiones en países seleccionados.	3
Tabla 1.2. Acoplamiento eléctrico y control utilizado para la incorporación de dispositivos en una microred.....	13
Tabla 3.1. Mapeo del problema hacia el algoritmo AS.....	43
Tabla 4.1. Parámetros recomendados para el algoritmo AS.	53
Tabla 4.2. Tiempos aproximados de ejecución para diferentes pruebas.	67