

**LOCALIZACIÓN DE FUENTES DE ENERGÍA Y  
DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN EN UNA  
MICRO-RED AISLADA DE BAJA TENSIÓN**

**PEDRO FABIAN ACEVEDO RUEDA  
CRISTIAN DAVID CAMACHO PARRA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2018**

**LOCALIZACIÓN DE FUENTES DE ENERGÍA Y  
DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN EN UNA  
MICRO-RED AISLADA DE BAJA TENSIÓN**

PEDRO FABIAN ACEVEDO RUEDA  
CRISTIAN DAVID CAMACHO PARRA

*Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Electricista*

Director  
RUSBER OCTAVIO RODRÍGUEZ VELÁSQUEZ  
M.Sc. en Ingeniería Eléctrica

Codirector  
GERMAN ALFONSO OSMA PINTO  
Ph.D. en Ingeniería Eléctrica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2018

*Dedicado a*

A mis ángeles de la guardia, porque a pesar de su ausencia terrenal, su espíritu continuo conmigo y no me dejaron desfallecer.

*Agradezco a*

A Dios, por permitirme culminar exitosamente este proyecto.

A mis padres y hermana, por el apoyo y amor incondicional que siempre he recibido de su parte.

A mi familia, porque a pesar de las dificultades siempre estuvieron allí para ayudarme a levantarme en los momentos de dificultad.

A mis amigos que me ayudaron desinteresadamente y me permitieron ser parte de su vida.

A la familia Gómez Quijano, por acogerme como un familiar más durante mis años de estudio.

A mi amigo Cristian Camacho porque a pesar de las dificultades que se presentaron en el trabajo nunca dejo que nos rindiéramos.

**Pedro Fabian Acevedo Rueda**

*Dedicado a*

A mi padre *Lisandro Camacho* que con su ejemplo, esfuerzo y dedicación ha sido la base en mi formación personal y profesional.

A mi hermano *Juan Camilo Camacho* que me brindo su apoyo incondicional y el más sincero afecto en los momentos más críticos.

A mi madre *Yaneth Parra* que en el cielo está. Quien hasta su último momento confió en mi y que en su ultimo aliento me dio las fuerzas para culminar mi carrera universitaria.

A mi familia y amigos quienes con sus palabras y acciones me alentaron en los peores momentos.

*Agradezco a*

A la familia E3T, a mis docentes, amigos y compañeros quienes a lo largo de la carrera participaron en mi proceso de formación.

A Residencias Universitarias, porque más que un techo fue el lugar que me acogió cuando más lo necesite.

A mi director y a mi codirector quienes nos apoyaron en la formulación y desarrollo de este trabajo.

A *Pedro Acevedo*, que más que el compañero de este trabajo un amigo con quien compartí toda mi carrera.

Gracias a cada una de las personas que contribuyeron en el desarrollo de este trabajo.

**Cristian David Camacho Parra**

# Índice general

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>18</b>
<b>1 OBJETIVOS</b>	<b>20</b>
1.1 OBJETIVO GENERAL . . . . .	20
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS . . . . .	20
<b>2 MARCO TEÓRICO</b>	<b>21</b>
2.1 MICRO-REDES ELÉCTRICAS . . . . .	21
2.1.1 Generación distribuida. . . . .	22
2.1.2 Cargas dispersas. . . . .	26
2.1.3 Sistema de Control. . . . .	27
2.1.4 Calidad de la energía. . . . .	27
2.2 PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN . . . . .	28
2.2.1 Modelo de programación entera mixta. . . . .	28
2.2.2 Algoritmos de solución. . . . .	28
<b>3 METODOLOGÍA</b>	<b>34</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO . . . . .	34
3.1.1 Aproximaciones en el modelo de la red . . . . .	34
3.1.2 Función objetivo . . . . .	35
3.1.3 Restricciones . . . . .	38
3.1.4 Posibles topologías de la micro-red . . . . .	41
3.2 OPTIMIZACIÓN Y COMPARACIÓN . . . . .	42
3.2.1 Optimización de la función objetivo . . . . .	42
3.2.2 Comparación de los resultados . . . . .	43
3.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD . . . . .	44
3.3.1 Robustez de la micro-red . . . . .	45
3.3.2 Análisis de la variación de tensión . . . . .	45

3.3.3	Análisis de los perfiles de potencia . . . . .	45
<b>4</b>	<b>CASO ESTUDIO</b>	<b>46</b>
4.1	OPCIONES DE CONEXIÓN . . . . .	49
4.2	PARAMETROS DE LA MICRO-RED . . . . .	51
4.2.1	Demanda. . . . .	51
4.2.2	Generación y sistema de almacenamiento. . . . .	52
4.2.3	Conductor. . . . .	54
4.2.4	Costos unitarios. . . . .	54
4.3	OPTIMIZACIÓN Y COMPARACIÓN . . . . .	55
4.4	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD . . . . .	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>61</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>65</b>

## Índice de figuras

Figura 2.1	Algoritmo Genético . . . . .	31
Figura 2.2	Optimización por enjambre de partículas con comportamiento cuántico . . . . .	33
Figura 3.1	Flujograma de la Función Objetivo . . . . .	36
Figura 3.2	Algoritmo de localización y dimensionamiento . . . . .	44
Figura 4.1	Localización de las viviendas y posible ubicación de la generación	48
Figura 4.2	Opciones de conexiones . . . . .	50
Figura 4.3	Demanda de vivienda 1 . . . . .	51
Figura 4.4	Demanda de la vivienda tipo . . . . .	52
Figura 4.5	Potencia máxima del PV . . . . .	54
Figura 4.6	Potencia máxima con mínimo promedio de radiación solar . . .	58
Figura 4.7	Perfiles de tensión . . . . .	59
Figura 4.8	Perfiles de potencia generada . . . . .	60

## Índice de tablas

Tabla 2.1	Tecnologías de Generación . . . . .	26
Tabla 4.1	Ubicación de las viviendas . . . . .	47
Tabla 4.2	Ubicación de los posibles generadores . . . . .	47
Tabla 4.3	Ubicación del sistema de almacenamiento . . . . .	48
Tabla 4.4	Potencia nominal de Generación . . . . .	52
Tabla 4.5	Datos de generación . . . . .	53
Tabla 4.6	Datos del sistema de almacenamiento . . . . .	53
Tabla 4.7	Datos de Conductores . . . . .	54
Tabla 4.8	Costos unitarios . . . . .	55
Tabla 4.9	Resultados de la optimización . . . . .	56
Tabla 4.10	Solución de la localización y dimensionamiento de la micro-red .	57

## ***Lista de anexos***

**(Ver anexos en el CD y puede visualizarlos en la Base de Datos de la  
Biblioteca UIS)**

Anexo A. Catálogos.

Anexo B. Códigos de GAMS.

Anexo C. Códigos de MATLAB.

## ***Nomenclatura***

### **Conjuntos**

$\Omega_H$  Conjunto de conductores.

$\Omega_I$  Conjunto de nodos.

$\Omega_{IJ}$  Conjunto de tramos.

$\Omega_T$  Conjunto de tiempo.

### **Subconjuntos**

$\Omega_I^{PV}$  Subconjunto de nodos posibles de generación fotovoltaico.

$\Omega_I^{PCH}$  Subconjunto de nodos posibles de generación de PCH.

$\Omega_I^{DISEL}$  Subconjunto de nodos posibles de generadores diésel.

$\Omega_I^{ALM}$  Subconjunto de nodos posibles de almacenadores de energía.

### **Parámetros**

$C_{Gen}$  Costo de potencia generada por tipo de generador [ $\$/kWh$ ].

$C_{Diesel}$  Costo del diésel.

$Q_{Diesel_N}$  Consumo de combustible a potencia nominal.

$P_{G_N}$  Potencia nominal del generador diésel.

$C_{Per}$  Costo por pérdidas de potencia en el sistema de distribución [ $\$/kWh$ ].

$C_{Sdh}$  Costo del sistema de distribución por km para cada conductor [ $\$/km$ ].

$R_h$  Resistencia por tipo de conductor [ $\Omega/km$ ].

$XL_h$  Reactancia por tipo de conductor [ $\Omega/km$ ].

$P_{C_{i,t}}$  Potencia activa de la carga en el nodo y por tiempo [ $kW$ ].

$\underline{V}_i$  Mínima magnitud de tensión por nodo del sistema de distribución [ $V$ ].

$\overline{V}_i$  Máxima magnitud de tensión por nodo del sistema de distribución [ $V$ ].

$\overline{P}_{ij,h}$  Potencia activa máxima transportada por el tramo ij [ $kW$ ].

$\underline{P}_{ij,h}$  Potencia activa mínima transportada por el tramo ij [ $kW$ ].

$L_{ij}$  Longitud del tramo [ $km$ ].

$\Delta_t$  Delta de tiempo [ $t$ ].

$\eta_c$  Eficiencia de carga de los almacenadores.

$\eta_d$  Eficiencia de descarga de los almacenadores.

$\overline{P}_{iny}$  Potencia activa máxima inyectada por el almacenador [ $kW$ ].

$\underline{P}_{iny}$  Potencia activa mínima inyectada por el almacenador [ $kW$ ].

$\overline{P}_{ext}$  Potencia activa máxima extraída por cada almacenador [ $kW$ ].

$\underline{P}_{ext}$  Potencia activa mínima extraída por cada almacenador [ $kW$ ].

$\overline{SOC}$  Energía máxima almacenada.

$\underline{SOC}$  Energía mínima almacenada.

$\overline{w}$  Número máximo de almacenadores.

$\overline{x}$  Número máximo de conductores en la red.

$\overline{z^{pv}}$  Número máximo de generadores fotovoltaicos presentes en la micro-red.

$\overline{z^{pch}}$  Número máximo de generadores PCH presentes en la micro-red.

$\overline{z^{diesel}}$  Número máximo de generadores diesel presentes en la micro-red.

$Nt$  Número total de nodos conectados.

$G_{ij,h}$  Conductancia por tramo para cada tipo de conductor.

$Dis_{ij}$  Distancia entre nodos.

## **Variables continuas**

$V_{i,t}$  Magnitud de tensión en cada nodo por tiempo.

$P_{G_{i,t}}$  Potencia activa generada en cada nodo por tiempo.

$SOC_{i,t}$  Estado de carga del sistema de almacenamiento.

$P_{Ext_{i,t}}$  Potencia extraída por el almacenador.

$P_{Iny_{i,t}}$  Potencia inyectada por el almacenador.

## **Variables binarias**

$x_h$  Existencia del conductor.

$y_{ij}$  Existencia del tramo.

$z_i$  Existencia de generación.

$w_i$  Existencia de almacenamiento.

# RESUMEN

**Título:** LOCALIZACIÓN DE FUENTES DE ENERGÍA Y DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN EN UNA MICRO-RED AISLADA DE BAJA TENSIÓN<sup>1</sup>.

**Autores:** Pedro Fabian Acevedo Rueda<sup>2</sup>, Cristian David Camacho Parra<sup>2</sup>

**Palabras Clave:** Dimensionamiento, Energías Renovables, Generación Distribuida (GD), Localización, Micro-red (MG), Optimización, Programación No Lineal Entera Mixta (MINLP).

## DESCRIPCIÓN:

Para la planificación de micro-redes aisladas destinadas a zonas remotas no interconectadas, las cuales presentan dispersión de las viviendas, se hacen necesario encontrar la ubicación de los generadores convencionales, fuentes de energía renovables y almacenadores, como también el dimensionamiento de la red, con el fin de satisfacer la demanda con mínimas pérdidas de potencia, que cumpla regulación de tensión en los nodos y la cargabilidad en cada uno de sus componentes; brindando así un sistema confiable y seguro para el usuario final.

Para cumplir este objetivo es necesario encontrar una función que integre los costos de operación y mantenimiento de la generación, el mantenimiento del sistema de almacenamiento de energía, la adquisición del sistema de distribución y las pérdidas de potencia en las líneas; sujeto a restricciones de operación del sistema eléctrico como lo son regulación y cargabilidad, de modo que se puedan optimizar y con esto obtener una solución que satisfaga los requerimientos planteados. Con la intención de abordar este problema, se planteo un modelo de programación no lineal entero mixto y se le dio solución mediante diferentes algoritmos que permitieron comparar entre sus resultados y elegir la mejor solución; entregando una sucesión de pasos que ayuden a la planeación de las micro-redes.

---

<sup>1</sup>Trabajo de Grado

<sup>2</sup>Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y Telecomunicaciones. Director: M.Sc. Rusber Octavio Rodríguez Velásquez, Codirector: Dr. German Alfonso Osma Pinto.

# ABSTRACT

**Title:** LOCATION OF ENERGY SOURCES AND SIZING OF THE DISTRIBUTION SYSTEM IN A MICROGRID ISOLATED OF LOW VOLTAGE<sup>1</sup>.

**Authors:** Pedro Fabian Acevedo Rueda <sup>2</sup>, Cristian David Camacho Parra <sup>2</sup>

**Key Words:** Distributed generation, Location, Micro-Grid (MG), Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP), Optimization, Renewable Energy, Sizing.

## DESCRIPTION:

For the planning of isolated micro-networks destined to non-interconnected remote areas, which present dispersion of the houses, it is necessary to find the location of conventional generators, renewable energy sources and storage, as well as the dimensioning of the network, with the purpose of satisfying the demand with minimum power losses, which complies with voltage regulation in the nodes and the chargeability in each of its components; thus providing a reliable and safe system for the end user.

To fulfill this objective it is necessary to find a function that integrates the costs of operation and maintenance of the generation, the maintenance of the energy storage system, the acquisition of the distribution system and the power losses in the lines; subject to operating restrictions of the electrical system such as regulation and chargeability, so that they can be optimized and thus obtain a solution that meets the requirements. With the intention of addressing this problem, a mixed whole nonlinear programming model was proposed and it was given a solution by means of different algorithms that allowed comparing its results and choosing the best solution; delivering a succession of steps that help the planning of micro-networks.

---

<sup>1</sup>Bachelor Thesis

<sup>2</sup>Physic-mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering School. Director: M.Sc. Rusber Octavio Rodríguez Velásquez. Co-director: Dr. German Alfonso Osma Pinto

## ***INTRODUCCIÓN***

La energía eléctrica es un factor primordial en la calidad de vida de los habitantes de una región, es por esto que uno de los objetivos del desarrollo sostenible que propone la Organización de Naciones Unidas (ONU) es “garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos” [31]. En Colombia el 99 % de la población tiene acceso a este servicio [4], pero dentro de este porcentaje existen poblaciones en donde el servicio es precario, su acceso se limita a un par de horas al día y en su mayoría la generación es llevada a cabo por máquinas de combustión interna que aumentan la contaminación ambiental.

Una de las soluciones planteadas por el Ministerio de Minas y Energía [24] es el uso de micro-redes, las cuales pueden funcionar conectadas a la red o de manera remota. Estas últimas son utilizadas en zonas de difícil acceso y presentan un mayor reto en su dimensionamiento ya que al funcionar de manera aislada deben garantizar un nivel de tensión y controlar la frecuencia dentro de los rangos permisibles. Este reto se incrementa cuando pensamos en la integración de energías alternativas, ya que cierta parte de ellas generan de manera intermitente, haciendo que la localización de la generación se convierta en eje fundamental en el dimensionamiento de la micro-red.

A estos múltiples retos la literatura presenta diferentes alternativas de solución todos apuntando a la operación óptima de la micro-red desde diferentes enfoques tales como el flujo óptimo de potencia [20], la localización óptima de fuentes de energía [21], la planeación del sistema de distribución de la micro-red [13], la ubicación óptima de los almacenadores de energía [15]. Muchos de estos son modelados como un problema de programación entera mixto lineal y no lineal (MILP, MINLP) y le dan solución por medio de diferentes estrategias, estos implementados mediante MATLAB ó GAMS.

Este trabajo de grado plantea un algoritmo que permite la localización de fuentes y

almacenadores de energía junto al dimensionamiento del sistema de distribución, a partir de la minimización de los costos de operación y mantenimiento de la micro-red, las pérdidas de potencia en las líneas y los costos de adquisición de la red. Teniendo en cuenta restricciones de operación como lo son la regulación de tensión y cargabilidad en las líneas. Para lograr dicha minimización se planteó utilizar tres solvers del software GAMS y dos algoritmos, QPSO y Algoritmos Genéticos, esto con el fin de obtener la mejor respuesta. El algoritmo se puso a prueba con el caso estudio presentado en [26]. Una vez obtenida la solución del caso se prosiguió a validar los datos con un estudio de sensibilidad. Mediante la variación del perfil de generación de una fuente de energía presente en la micro-red. Para el caso de estudio la variación se realizó en el generador fotovoltaico debido a que es una fuente dependiente de las condiciones ambientales.

# **Capítulo 1**

## **OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un algoritmo que permita realizar el dimensionamiento del sistema de distribución radial y la determinación de la localización óptima de fuentes y almacenadores de energía para una micro-red aislada de baja tensión con cargas dispersas.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- ❖ Definir una función objetivo para evaluar el costo financiero de la red de distribución considerando parámetros como pérdidas de energía, cargabilidad y regulación de tensión
- ❖ Implementar los modelos en los softwares, Matlab usando algoritmos genéticos(AG) y QPSO (Quantum Particle Swarm Optimization) y GAMS por medio de los solvers BARON, LINDO, BONMIN comparando la solución entregada por cada uno, en la optimización del sistema de distribución de una micro-red no interconectada integrando la localización de las fuentes de energía y la arquitectura de la red de distribución.
- ❖ Estimar el efecto de la variación del perfil de generación de una fuente de energía sobre el dimensionamiento de la red.

## ***Capítulo 2***

### ***MARCO TEÓRICO***

En este capítulo se abordarán las definiciones de las terminologías de micro-redes eléctricas y sus principales características. También se explica el modelo de programación entera mixta junto con algunos métodos de solución para este tipo de problemas. Los cuales son importantes para el entendimiento de los próximos capítulos.

#### **2.1. MICRO-REDES ELÉCTRICAS**

La definición de micro-red dentro del ámbito energético no está del todo unificada, sin embargo, diferentes entidades públicas y privadas se han dado a la tarea de formalizar el concepto. Entre los más destacados se encuentran:

- ❖ Las micro-redes son sistemas de distribución eléctrica que contienen cargas y fuentes de energía distribuida (generadores distribuidos, equipos de almacenamiento o cargas controlables) que pueden operarse de forma controlada y coordinada, ya sea mientras están conectados a la red de alimentación principal o mientras se encuentran aislados [22].
- ❖ Una micro-red es un grupo de cargas interconectadas y recursos energéticos distribuidos. Dentro de los límites eléctricos claramente definidos que actúa como una sola entidad controlable con respecto a la red. Una micro-red puede conectarse y desconectarse de la red para permitir que funcione tanto conectado a la red como en modo isla [30].

Aunque existen algunas diferencias entre estas definiciones, todas concuerdan que la micro-red debe estar compuesta por generación distribuida, cargas locales (controlables y no controlables), sistemas de almacenamiento, sistema de control y debe poder operar conectado a la red o de modo aislado.

**2.1.1 Generación distribuida.** El sistema de suministro eléctrico está constituido por el conjunto de instalaciones de generación, transporte y distribución de la energía eléctrica, los cuales están dotados de mecanismos de control, seguridad y protección, que garantizan una adecuada explotación de los recursos energéticos [2]. Durante varias décadas el sistema de suministro eléctrico estaba compuesto en su mayoría por grandes instalaciones de generación centralizadas. La energía producida por estas, era transportada por largas distancias hasta los nodos de consumo; a pesar de que esto implicaba grandes gastos en infraestructura económicamente era mejor que tener pequeños generadores, debido a los altos costos y las bajas eficiencias que estos presentaban. Pero con el pasar de los años, la tecnología de las fuentes de energía eléctrica ha mejorado, disminuyendo su tamaño y aumentando su eficiencia; permitiendo tener pequeños generadores cercanos a los consumidores y eliminando los costes de transmisión de energía; a este nuevo sistema de generación se le ha denominado “Generación distribuida”.

Al igual que con las micro-redes, la generación distribuida tiene diversas definiciones, las cuales guardan similitudes, pero difieren en varios aspectos. Un ejemplo de estas diferencias son los términos que existen para el mismo tipo de generación, A continuación se nombran algunos de ellos: en los países Anglo-Americanos se suele utilizar el término "generación incorporada", en América del Norte es común encontrar el término "generación dispersa" y en Europa y partes de Asia el término "generación descentralizada”.

Estas son algunas de las definiciones que podemos encontrar en la literatura:

- ❖ El Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRE) define a la generación distribuida como todos los generadores con una capacidad de entre 50MW a 100MW, conectados al sistema eléctrico de distribución y que no están diseñados ni despachados de forma centralizada [7].
- ❖ El Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica(IEEE), define a la generación distribuida como la generación de energía eléctrica por medio de instalaciones que son suficientemente más pequeñas que las plantas de generación centra-

les con el fin de permitir la conexión en casi cualquier punto del sistema de energía [12]

- ❖ La Agencia Internacional de la Energía (IEA), define a la generación distribuida como la producción de energía por parte de los consumidores o de la empresa distribuidora, suministrando energía directamente a la red de distribución, en baja tensión, asociado a tecnologías como motores, micro-turbinas, pilas de combustible y energía solar fotovoltaica. [25]

Por otra parte, la definición más consensuada es la que presenta Ackermann y colaboradores [1], estos autores abordan la definición de generación distribuida a partir de los siguientes aspectos:

- a. **Propósito.** La generación distribuida tiene el propósito es proporcionar una fuente de energía activa
- b. **Ubicación.** La operación e instalación de las unidades de generación de energía eléctrica debe hacerse directamente en la red de distribución o directamente en la red del consumidor.
- c. **Clasificación.** La calificación de las fuentes de energía de la generación distribuida no es relevante para la definición sin embargo los problemas técnicos pueden variar de acuerdo a la clasificación. Se propone la siguiente clasificación en función de la potencia nominal de la instalación:
  - Micro generación distribuida:  $\sim 1W < 5kW$ ;
  - Pequeña generación distribuida:  $5kW < 5MW$ ;
  - Mediana generación distribuida:  $5MW < 50MW$ ;
  - Gran generación distribuida:  $50MW < 300MW$ ;
- d. **Área de suministro de energía.** La zona de suministro no es relevante para la definición.
- e. **Tecnología.** La generación distribuida suele vincularse a las fuentes de energía renovables, sin embargo, el tipo de tecnología no debe ser relevante en la definición

- f. **Impacto medioambiental.** La generación distribuida suele asociarse al daño medioambiental, pero su valoración resulta muy compleja, por eso los autores no lo consideran para la definición
- g. **Modo de funcionamiento.** El funcionamiento de la generación distribuida por lo general no está sometida a las normativas de los sistemas centralizados. Sin embargo, el modo de funcionamiento de la generación distribuida dependerá de las normativas propias del país donde se instale, es por esto que los autores no toman relevante este aspecto para la definición.
- h. **Propiedad.** Los propietarios pueden ser cualquier empresa del sector o el mismo consumidor, por eso este aspecto no es relevante para la definición de la generación distribuida
- i. **Penetración de la generación distribuida.** La cantidad de generación distribuida de la red, es un tema de discrepancia en la literatura, algunos hablan de suficiente energía no centralizada como para no necesitar de la construcción de líneas de transmisión y otro hablan de simplemente una fracción de la energía consumida. Por esto los autores no consideran relevante este aspecto.

Teniendo en cuenta los aspectos enumerados anteriormente, Akerman y colaboradores definen de manera general a la generación distribuida de la siguiente manera: *"La generación distribuida es una fuente de energía eléctrica conectada directamente a la red de distribución o en el sitio donde se encuentra el medidor del cliente"* [1].

Por último, el estado colombiano con la ley 1715 define a la generación distribuida de la siguiente manera: *"Es la producción de energía eléctrica, cerca de los centros de consumo, conectada a un Sistema de Distribución Local (SDL). La capacidad de la generación distribuida se definirá en función de la capacidad del sistema en donde se va a conectar, según los términos del código de conexión y las demás disposiciones que la CREG defina para tal fin."* [8] El código que se nombra en la definición es la resolución CREG 030 de 2018. Este también da una definición pero esta vez de generador distribuido, que dice lo siguiente: *"Persona jurídica que genera energía eléctrica cerca de los centros de consumo, y está conectado al Sistema de Distribución Local y con potencia instalada menor o igual a 0.1MW."* [10]

**2.1.1.1 Tecnologías empleadas en la generación distribuida.** En la definición de generación distribuida, el tipo de tecnología de generación empleada no es algo relevante, si bien se suele asociar las fuentes de energía renovables, estas no son las únicas a implementar, tecnologías más tradicionales como la turbinas a gas o la cogeneración también tiene su espacio. A continuación, se muestran algunas de las tecnologías utilizadas en la generación distribuida, las cuales pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

❖ **Tecnologías convencionales**

- Cogeneración.
- Turbina de gas.
- Micro-turbina.
- Motores de combustión interna

❖ **Tecnologías basadas en energías renovables**

- Turbinas eólicas.
- Solar térmica
- Instalaciones fotovoltaicas.
- Minihidráulicas.
- Biomasa.
- Geotérmica.
- Mareomotriz.
- Pilas de combustible.

En la Tabla 2.1 se muestra un resumen de las características más importantes de las tecnologías de generación, construida con base en la información consultada en [2], [18], [29]

Tabla 2.1: Tecnologías de Generación

Tecnología	Energía primaria	Potencia [MW]	Rendimiento [%]
Motor alternativo	Gas natural Diesel Biogás Propano	0,08 – 20	28 – 42 Gas natural 30 – 50 Diesel 80 – 85 Cogeneración
Turbina de gas	Biogás Gas natural Propano	0,25 – 500	25 – 60 70 – 90 Cogeneración
Minihidráulica	Agua	0,01 – 10	80 – 90
Eólica	Viento	0,03 – 5	22 – 40
Solar Térmica	Sol	0,0002 – 200	13 – 21
Fotovoltaica	Sol	< 0,01 – 0,1	14 – 22
Microturbinas	Gas natural Hidrógeno Diesel Biogás Propano	0,025 – 1	25 – 40 hasta el 85 Cogeneración
Pila de Combustible	Gas natural Metano propano Hidrógeno	0,001 – 11	35 – 65 hasta el 85 Cogeneración

**2.1.2 Cargas dispersas.** La función principal de la micro-red es suplir la demanda requerida ante diferentes maniobras de operación, es por esta razón que las cargas son un pilar importante en la planeación de las micro-redes, porque tanto la ubicación de la generación como la arquitectura de la red dependen de su demanda y ubicación.

En las zonas remotas las cargas suelen encontrarse distanciadas por varios metros, haciendo del dimensionamiento del sistema de distribución un reto para quien las diseña, ya que lleva a que las pérdidas de potencia en las líneas y la regulación entren a ser prioridad en la planificación de esta.

Adicionalmente a los requerimientos técnicos que presentan este tipo de cargas para la planeación de la micro-red, están los costos en cuanto a inversión, manteni-

miento y operación, debido a que una de las ventajas de la micro-red es brindar un eficiente servicio a bajo costo.

**2.1.3 Sistema de Control.** Las estrategias de control que se usan en las micro-redes van enfocadas a mejorar la calidad de la energía suministrada, y son seleccionadas según las funciones requeridas y los posibles escenarios de operación. Las principales funciones de control en los recursos energéticos distribuidos son: tensión, frecuencia y/o control de potencia activa y reactiva [6].

Para el control de la micro-red es necesario un control jerárquico que la literatura subdivide en tres secciones:

- ❖ Nivel primario: El control primario realiza el control de la potencia local, la tensión y la corriente [23].
- ❖ Nivel secundario: Se ocupa del control de calidad de la energía, como la restauración de tensión / frecuencia, así como el desequilibrio de tensión y la compensación de armónicos [23].
- ❖ Nivel terciario: El objetivo del control terciario es introducir la inteligencia en todo el sistema. Con ese fin, el control terciario intentará optimizar la operación de MG en función de los méritos de los intereses, principalmente la eficiencia y la economía [23].

**2.1.4 Calidad de la energía.** EL avance continuo en el estudio de micro-redes va enfocado en minimizar costos de operación y mantenimiento vinculando estrategias de control que permitan un flujo óptimo de potencia, entregando a la carga una energía de calidad.

Dichas estrategias de control van orientadas en la estabilidad de la micro-red, para esto es necesario monitorizar las variables de tensión y frecuencia para dar control a las potencias activa y reactiva del sistema.

Una de las formas de evaluar la confiabilidad del suministro de energía es mediante la frecuencia de interrupción y/o duración del evento que lo ocasiona. El mejoramiento de la confiabilidad del sistema puede traer mejoras económicas significativas para los consumidores, debido al uso de las estrategias de control y automatización en la micro-red. Los estudios asociados a confiabilidad van enfocados a la evaluación y mejora debido a la penetración de fuentes de energía renovable y la calidad de potencia [6].

## **2.2. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN**

**2.2.1 Modelo de programación entera mixta.** Es una programación matemática con variables continuas y discretas que presenta no linealidades en la función objetivo y sus restricciones. Este es usualmente utilizado para formular problemas donde es necesario optimizar simultáneamente la estructura del sistema discreto y los parámetros continuos.

Estos han sido utilizados en diversas aplicaciones, incluyendo la industria de procesos y los sectores de investigación financiera, ingeniería, ciencia administrativa e investigación de operaciones. Incluye problemas en las hojas de flujo del proceso, selección de cartera, procesamiento por lotes en ingeniería química (que consiste en mezcla, reacción y separación centrífuga) y diseño óptimo de redes de transmisión.

Las necesidades en áreas tan diversas han motivado la investigación y el desarrollo en la tecnología de resolución de MINLP, particularmente en algoritmos para el manejo de problemas a gran escala, altamente combinatorios y altamente no lineales [5].

**2.2.2 Algoritmos de solución.** Para la solución de problemas no lineales enteros mixtos que son complejos se presentan dos software que permiten acercarnos o encontrar una solución óptima.

**2.2.2.1 El Sistema de modelado algebraico general (GAMS).** Es un sistema de modelado de alto nivel para la programación matemática y la optimización. Consiste en un compilador de lenguaje y un conjunto de solucionadores integrados de alto rendimiento. GAMS está diseñado para aplicaciones complejas

de modelado a gran escala, que le permite construir modelos grandes y fáciles de mantener, que se pueden adaptar rápidamente a situaciones nuevas. GAMS está específicamente diseñado para modelar problemas de optimización de enteros lineales, no lineales y mixtos [16].

- ❖ **El navegador de optimización de ramificación y reducción (BARON).** Es un sistema computacional para la solución de problemas algebraicos no lineales (NLP) y no lineales enteros mixtos (MINLPs).

Este implementa algoritmos de optimización global determinísticos del tipo branch-and-bound que están garantizados para proporcionar un óptimo global bajo suposiciones bastante generales. Estos incluyen la existencia de límites finitos superior e inferior en expresiones no lineales a resolver [27].

GAMS proporciona una licencia para el uso de BARON dentro de su sistema de modelado.

- ❖ **Programación de enteros mixtos no lineales de fuente abierta (BONMIN).**

Como su nombre lo indica BONMIN es un solucionador de código abierto para resolver problemas no lineales enteros mixtos (MINLP). Este implementa algoritmos de branch-and-bound, branch-and-cut y algoritmos de aproximación entera. Puede manejar modelos de programación no lineal de enteros mixtos cuyas funciones deben ser dos veces continuamente diferenciables [11]. El enlace BONMIN en GAMS admite variables continuas, binarias y enteras, conjuntos ordenados especiales, prioridades de bifurcación, pero no variables semicontinuas o semienteras.

- ❖ **Optimizador lineal, interactivo y discreto (LINDO).** Encuentra soluciones globalmente óptimas garantizadas a problemas generales no lineales con variables continuas y / o discretas [16].

Emplea métodos de ramificación y corte para dividir un modelo NLP en una lista de sub-problemas. Cada sub-problema se analiza y se demuestra que:

- No tiene una solución viable u óptima.
- Se encuentra una solución óptima al sub-problema, por ejemplo, porque el sub-problema se muestra convexo.

- El sub-problema se divide en dos o más sub-problemas que luego se colocan en la lista. Dadas las tolerancias apropiadas, después de un número finito, aunque posiblemente grande, de pasos, se devuelve una solución globalmente óptima para las tolerancias.

Los solucionadores no lineales tradicionales pueden atascarse en soluciones locales que no son óptimas. Este ya no es el caso cuando se usa el solucionador global.

**2.2.2.2 MATLAB.** Es un entorno informático, diseñado para la computación técnica. Su nombre proviene de la abreviatura de MATrix LABoratory ( Laboratorio de Matrices), dado que el tipo de dato básico que gestiona es una matriz. MATLAB es utilizado en computación matemática, modelado y simulación, análisis y procesamiento de datos, visualización y representación de gráficos, así como para el desarrollo de algoritmos [17].

En este trabajo se utilizó MATLAB para implementar los algoritmos que se definen a continuación:

- ❖ **Algoritmos Genéticos(AG).** Los Algoritmos Genéticos (AGs), son uno de los Algoritmos Evolutivos(AEs) más populares. Los AEs son una técnica para la resolución de problemas de búsqueda y optimización, están inspirados en la teoría de las especies y la selección natural. Estos algoritmos fusionan características de búsqueda aleatoria con características búsqueda dirigida que proviene del mecanismo de los individuos más adaptados, esto les permite acceder a cualquier región del espacio de búsqueda, a la vez que explora el espacio de soluciones de una forma mucho más eficiente que los métodos puramente aleatorios [3]. Los AGs fueron propuestos por Holland en 1975 [19]. Se caracterizan por representar las soluciones al problema que abordan en forma de cadena de bits [3].

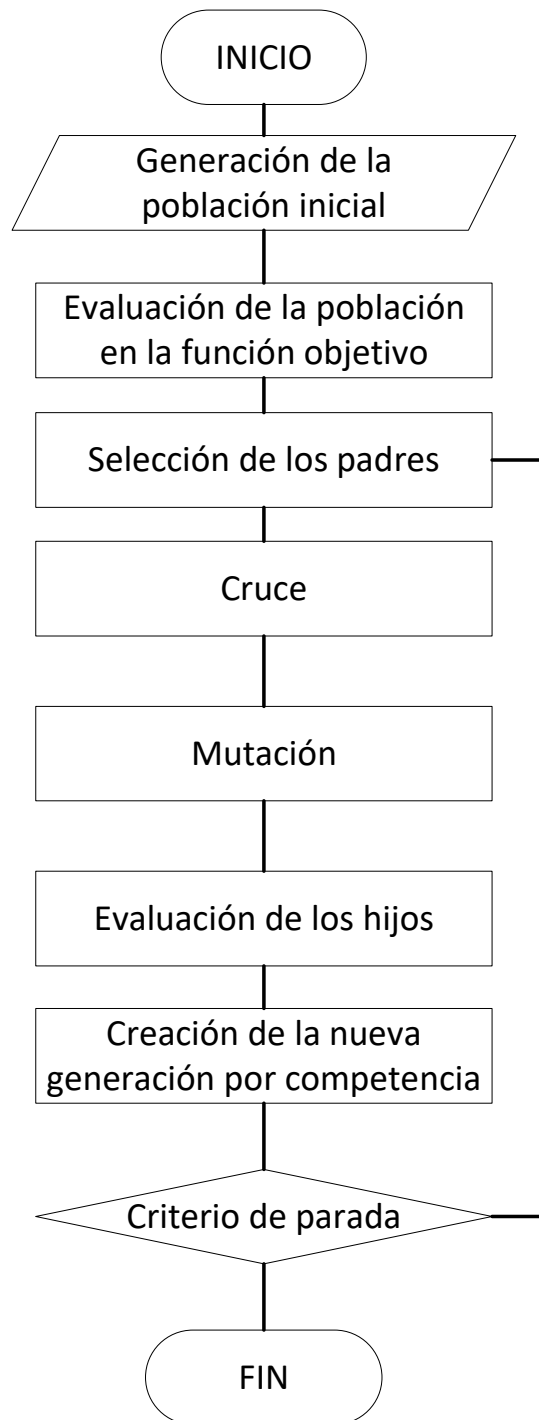


Figura 2.1: Algoritmo Genético

- ❖ **Optimización por enjambre de partículas con comportamiento cuántico (QPSO).** La optimización por enjambre de partículas con comportamiento cuántico (QPSO) es una extensión de los métodos de optimización por enjambre de partículas (PSO), en el que se adopta el concepto de la mecánica cuántica. El estado de una partícula en QPSO se describe mediante la función de onda derivada de la ecuación de Schrodinger, mientras que el de una partícula en PSO estándar tiene su ubicación y velocidad como su estado [28]. La función de onda mencionada anteriormente es:

$$X_m(s + 1) = P \pm \beta |C(s) - X_m(s)| \cdot \ln(1/u) \quad (2.2.1)$$

Donde:

$X_m$  Es Partícula m-cima.

$s$  Es la iteración actual.

$u$  Es un número random entre 1 y 0.

$\beta$  Coeficiente de contracción-expansión.

$C(s)$  Es la mejor posición media.

$P$  Es un atractor local.

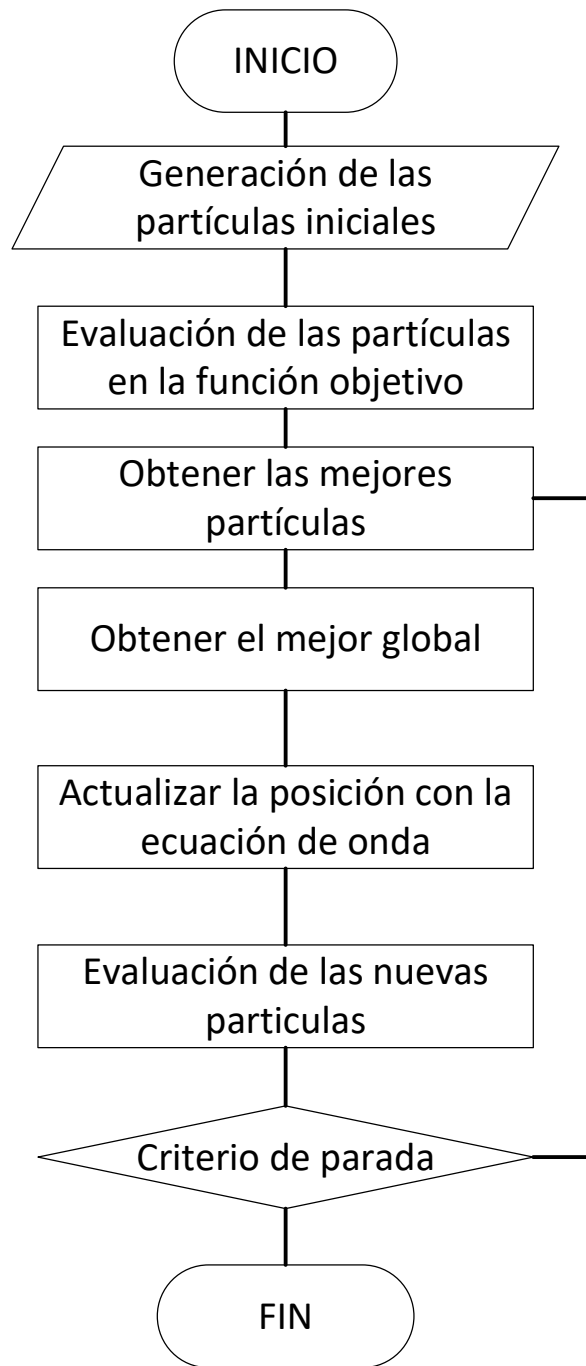


Figura 2.2: Optimización por enjambre de partículas con comportamiento cuántico

## **Capítulo 3**

# **METODOLOGÍA**

En este capítulo se plantea una metodología que permita ubicar las unidades de generación y el sistema de almacenamiento junto con el dimensionamiento del sistema de distribución haciendo la selección óptima del conductor y una red radial con costo mínimo de inversión, para ello se presenta un modelo de programación no lineal entera mixta (MINLP). Luego se le dio solución mediante diferentes técnicas de optimización que se permitieran comparar entre sus resultados y elegir la mejor solución. Para validar la robustez de la solución se hace una variación en el perfil de potencia máxima entregado por una unidad de generación renovable y se hace un análisis del perfil de tensión un cada uno de sus nodos y el perfil de potencia de los generadores presentes en la micro-red.

### **3.1. DESCRIPCIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO**

Para la creación de la función objetivo, se buscó una función que permitiera modelar los costos variables asociados a la micro-red y que al ser minimizada pudiera encontrar la ubicación de las fuentes de energía y del sistema de almacenamiento, una arquitectura del sistema de distribución óptima y un calibre de conductor adecuado. Cumpliendo las características que un sistema eléctrico requiere, como lo es la regulación de tensión y las cargabilidades en los elementos de la micro-red.

#### **3.1.1 Aproximaciones en el modelo de la red**

Con el fin de reducir la complejidad del modelo se consideraron algunas simplificaciones en las ecuaciones de potencia [21]. Las simplificaciones son válidas para sistemas de distribución radiales y con una alta relación de R/X. La principal ventaja

de hacer estas simplificaciones radica en considerar solamente la magnitud de las tensiones y la potencia activa, lo cual evita el uso de los ángulos y la potencia reactiva como variables de decisión.

En un modelo AC tradicional de flujo de potencia activa que viaja desde el nodo  $i$  hasta el nodo  $j$  se puede expresar como:

$$P_{i,j} = |V_i|^2 G_{i,j} - |V_i| |V_j| G_{i,j} \cos(\delta_{i,j}) - |V_i| |V_j| B_{i,j} \sin(\delta_{i,j}) \quad (3.1.1)$$

Donde:

$P_{i,j}$  Es el flujo de potencia activa ente los nodos  $i,j$ .

$V_i$  Es la magnitud de tensión en el nodo  $i$ .

$G_{i,j}$  Es la conductancia entre el nodo  $i$  y el  $j$ .

$B_{i,j}$  Es la susceptancia entre el nodo  $i$  y el  $j$ .

$\delta_{i,j}$  Es la diferencia angular de la tensión entre el nodo  $i$  y el  $j$ .

Si se considera la diferencia angular entre nodos aproximadamente igual a cero, se obtiene la siguiente expresión:

$$P_{i,j} = |V_i|^2 G_{i,j} - |V_i| |V_j| G_{i,j} = G_{i,j} |V_i| (|V_i| - |V_j|) \quad (3.1.2)$$

Las pérdidas de potencia pueden ser expresadas como la suma de los flujos en ambas direcciones. Teniendo esto en cuenta esto se obtiene la siguiente expresión:

$$P_{Per_{i,j}} = G_{i,j} (|V_i| - |V_j|)^2 \quad (3.1.3)$$

### 3.1.2 Función objetivo

Esta Función integra los costos de inversión del sistema de distribución, el costo de generación por unidad y el costo asociado a las pérdidas de potencia de modo tal que al minimizado, se encuentre la ubicación ideal de los generadores y el sistema de almacenamiento como también una optima arquitectura del sistema de distribución de la micro-red.

En la figura 3.1 se presenta un diagrama de bloques de la función objetivo, el cual nos permite una versión resumida de lo planteado en el trabajo de grado.

Seguidamente se presentan de manera detallada la formulación de la función y sus restricciones.



**3.1.2.1 Costos de Generación.** Estos hacen referencia a los costos por unidad de generación en función de la energía suministrada, que suplirán la demanda requerida por el usuario final y la energía requerida por el sistema de distribución y el sistema de almacenamiento.

El costo de generación por parte de las energías renovables (fotovoltaica y PCH) es 0 \$COP, esto se debe a que la fuente de energía primaria (radiación solar y caudal de agua) no presentan costos proporcionales a la potencia generada. A diferencia del costo de la generación con motores de combustión interna que si están directamente relacionados con el consumo de combustible. Esta relación se observa en 3.1.5 y 3.1.6, las cuales fueron tomadas de [26]

$$\sum_{i \in \Omega_i} \sum_{t \in \Omega_t} C_{Gen}(P_{G_{i,t}}) \Delta t \quad (3.1.4)$$

$$C_{Gen_{Diesel}}(P_{G_{i,t}}) = C_{Diesel} * Q_{Diesel}(P_{G_{i,t}}) \quad (3.1.5)$$

$$Q_{Diesel}(P_{G_{i,t}}) = 0,22 * 0,3 * P_{G_N} + 0,78 * \frac{P_{G_{i,t}} * Q_{Diesel_N}}{P_{G_N}} \quad (3.1.6)$$

**3.1.2.2 Costos asociados a las pérdidas.** En todo sistema eléctrico el aprovechamiento de la energía no es de un 100 % dado que existe una energía que es necesaria en la distribución que no será entregada al usuario final. Estas tienen asociado un costo de operación que permite cuantificar la energía no aprovechada por el usuario final que el generador si esta entregando. La energía que este requiere, se modela a través de las pérdidas de potencia activa que consumen los conductores encargados de transportar la energía desde las fuentes de generación hasta la carga.

$$\sum_{ij \in \Omega_{IJ}} \sum_{h \in \Omega_H} \sum_{t \in \Omega_T} C_{Per}(G_{ij,h}(V_{i,t} - V_{j,t})^2) \Delta t \quad (3.1.7)$$

**3.1.2.3 Costo del sistema de distribución.** Para el óptimo dimensionamiento del sistema de distribución es de vital importancia la selección del conductor, esto mediante la selección de parámetros eléctricos tales como: resistencia eléctrica, tensión de operación, capacidad de corriente y flujo máximo que transporta dicho conductor.

Se evaluarán costos que el sistema de distribución requiere para su instalación, tales como: postes, conductores, herrajes e instalación.

$$\sum_{ij \in \Omega_{IJ}} \sum_{h \in \Omega_H} C_{Sd_h} L_{ij} x_h \quad (3.1.8)$$

### 3.1.3 Restricciones

En el modelamiento del problema de optimización se deben considerar los requerimientos técnicos que un sistema eléctrico requiere para su funcionamiento, a continuación se presentan las restricciones que debe cumplir nuestro modelo de manera que tenga un buen comportamiento como micro-red.

**3.1.3.1 Balance de potencia.** Todo sistema eléctrico debe cumplir con un balance de potencia por nodo, de tal forma que se pueda verificar que la potencia que se esta generando sea consumida por la carga y el restante sea aprovechado por el sistema de distribución y almacenamiento.

$$P_{G_{i,t}} = P_{C_{i,t}} + P_{Ext_{i,t}} - P_{Iny_{i,t}} + \sum_{h \in \Omega_H} \sum_{j \in \Omega_I} P_{ij,h,t} \quad (3.1.9)$$

$$P_{ij,h,t} = G_{ij,h} V_{i,t}^2 - G_{ij,h} V_{i,t} V_{j,t} \quad (3.1.10)$$

$$G_{ij,h} = \frac{R_h}{(R_h^2 + XL_h^2)L_{ij}}x_h \quad (3.1.11)$$

**3.1.3.2 Cargabilidad de la línea.** Presenta el flujo máximo que la línea de distribución puede transportar.

$$\underline{P}_{ij,h}x_h \leq P_{ij,h,t} \leq \overline{P}_{ij,h}x_h \quad (3.1.12)$$

**3.1.3.3 Límites de Generación.**

$$\underline{P}_{G_{i,t}}z_i \leq P_{G_{i,t}} \leq \overline{P}_{G_{i,t}}z_i \quad (3.1.13)$$

**3.1.3.4 Estado de carga de unidades de almacenamiento.**

$$SOC_{i,t} = SOC_{i,t-1} + (P_{Ext_{i,t}}\eta_c - \frac{P_{Iny_{i,t}}}{\eta_d})\Delta_t \quad (3.1.14)$$

**3.1.3.5 Límites de estado de carga.**

$$\underline{P}_{Iny} \leq P_{Iny_{i,t}} \leq \overline{P}_{Iny} \quad (3.1.15)$$

$$\underline{P}_{Ext} \leq P_{Ext_{i,t}} \leq \overline{P}_{Ext} \quad (3.1.16)$$

$$\underline{SOC}w_i \leq SOC_{i,t} \leq \overline{SOC}w_i \quad (3.1.17)$$

### 3.1.3.6 Límite de almacenadores.

$$\sum_{i \in \Omega_i^{ALM}} w_i \leq \bar{w} \quad (3.1.18)$$

### 3.1.3.7 Límites de magnitud de tensión.

$$\underline{V}_i \leq V_{i,t} \leq \bar{V}_i \quad (3.1.19)$$

### 3.1.3.8 Unicidad del conductor por tramo.

$$\sum_{h \in \Omega_H} x_h = 1 \quad (3.1.20)$$

### 3.1.3.9 Cantidad máxima de generadores fotovoltaicos en la micro-red.

$$\sum_{i \in \Omega_I^{PV}} z_i = \overline{z^{pv}} \quad (3.1.21)$$

### 3.1.3.10 Cantidad máxima de generadores PCH en la micro-red.

$$\sum_{i \in \Omega_I^{PCH}} z_i = \overline{z^{pch}} \quad (3.1.22)$$

### 3.1.3.11 Cantidad máxima de generadores Diesel en la micro-red.

$$\sum_{i \in \Omega_I^{Diesel}} z_i = \overline{z^{diesel}} \quad (3.1.23)$$

### 3.1.4 Posibles topologías de la micro-red

Ante la infinidad de posibles conexiones que se pueden presentar en un sistema donde no se tiene una red inicial se deben colocar una serie de restricciones de manera que se haga más sencillo la selección de la misma.

Para ello se hizo necesaria una función que permitiera encontrar una topología con la mínima distancia, teniendo en cuenta que debe conservarse la idea de una red radial.

A continuación, se presenta el modelo planteado en la optimización de la red radial de mínima distancia.

$$\sum_{i,j} y_{i,j} Dis_{i,j} \quad (3.1.24)$$

Sujeto a :

$$\sum_{j \in \Omega I} y_{i,j} \geq 1 \quad (3.1.25)$$

$$\sum_{i,j} y_{i,j} = 2(Nt - 1) \quad (3.1.26)$$

$$y_{i,j} \cdot y_{i,k} \cdot y_{l,k} \cdot y_{j,l} + y_{i,j} \cdot y_{i,l} \cdot y_{j,l} = 0 \forall i \neq j \neq k \neq l \quad (3.1.27)$$

## 3.2. OPTIMIZACIÓN Y COMPARACIÓN

En esta sección se abordará el proceso de optimización de la función objetivo descrita en el capítulo anterior mediante los cinco solucionadores propuestos en el capítulo 1 y el proceso de comparación entre los resultados, de manera que se pueda obtener la solución óptima.

### 3.2.1 Optimización de la función objetivo

Para la optimización de la función es importante definir las características de los parámetros que vamos a ingresar a cada uno de los softwares.

**3.2.1.1 Parámetros.** Para lograr un resultado por parte de los softwares es necesario el ingreso de los siguientes parámetros con las características mencionadas a continuación.

- ❖ **Opciones de conexiones:** En la selección de estas opciones se utiliza el modelo de optimización presentado en el capítulo 3.4 y así obtener las opciones de conexiones con la mínima distancia.
- ❖ **Demanda:** El perfil de demanda de cada una de las unidades de vivienda durante el periodo de tiempo requerido y la ubicación nodal de las unidades de vivienda para cada opción de conexión.
- ❖ **Generación:** Los perfiles de Potencia máxima para cada tipo de fuente de generación y la posible ubicación nodal de las unidades de generación para cada opción de conexión.
- ❖ **Sistema de almacenamiento:** El estado de carga máximo y mínimo, la potencia máxima y la eficiencia de carga y descarga y la posible ubicación nodal del sistema de almacenamiento para cada opción de conexión.
- ❖ **Conductor:** La resistencia y reactancia de la línea y los límites de potencia que puede fluir por cada conductor.
- ❖ **Costos Unitarios:** costo del combustible, costo asociado a las pérdidas de energía, costo por tipo de conductor, costo asociado al sistema de distribución.

**3.2.1.2 Proceso de optimización.** Una vez ingresado los parámetros y haber definido las ecuaciones de la función objetivo y sus restricciones en cada uno de los softwares se procede a ejecutar los solvers.

Como el modelo que se presenta no es convexo se espera como resultado al menos un optimo local.

Cada método de optimización devuelve como respuesta: La localización de las fuentes, el dimensionamiento de la red, tiempo de CPU y el valor del costo obtenido para esa solución. Adicional a esto entregará el perfil del despacho de potencia y el perfil de tensión por nodo, que serán utilizados en el análisis de sensibilidad.

## **3.2.2 Comparación de los resultados**

Una vez obtenidos los resultados de cada uno de los solucionadores se procede a la etapa de comparación, con el fin de obtener una mejor solución. Para esta se tienen en cuenta dos criterios de selección:

**1 Costo obtenido por cada solver**

**2 Tiempo de CPU**

Para el ingreso a la comparación se seguirán los siguientes pasos:

- I Se enumeran las soluciones de 1 a 5 sin orden de importancia.
- II Se hace la comparación según el primer criterio para la solución  $i$  con respecto a la solución  $i+1$ . Si en el resultado de la comparación una de estas es menor que la otra, pasará a optar la posición  $i+1$ . De ser iguales se pasará al ítem III
- III Se hace la comparación según el segundo criterio. Si en el resultado de la comparación una de estas es menor que la otra, pasará a optar la posición  $i+1$ .
- IV Luego se actualizará  $i$  y se repetirá la secuencia desde el paso II. Esto sucederá hasta que  $i$  llegue a 4. Al finalizar de este paso se obtendrá la solución óptima.

En la figura 3.2 se observa el algoritmo descrito en este capítulo; desde la etapa inicial hasta el proceso de selección de la solución óptima quedando por resolver el análisis de sensibilidad que será desarrollado en el siguiente capítulo.

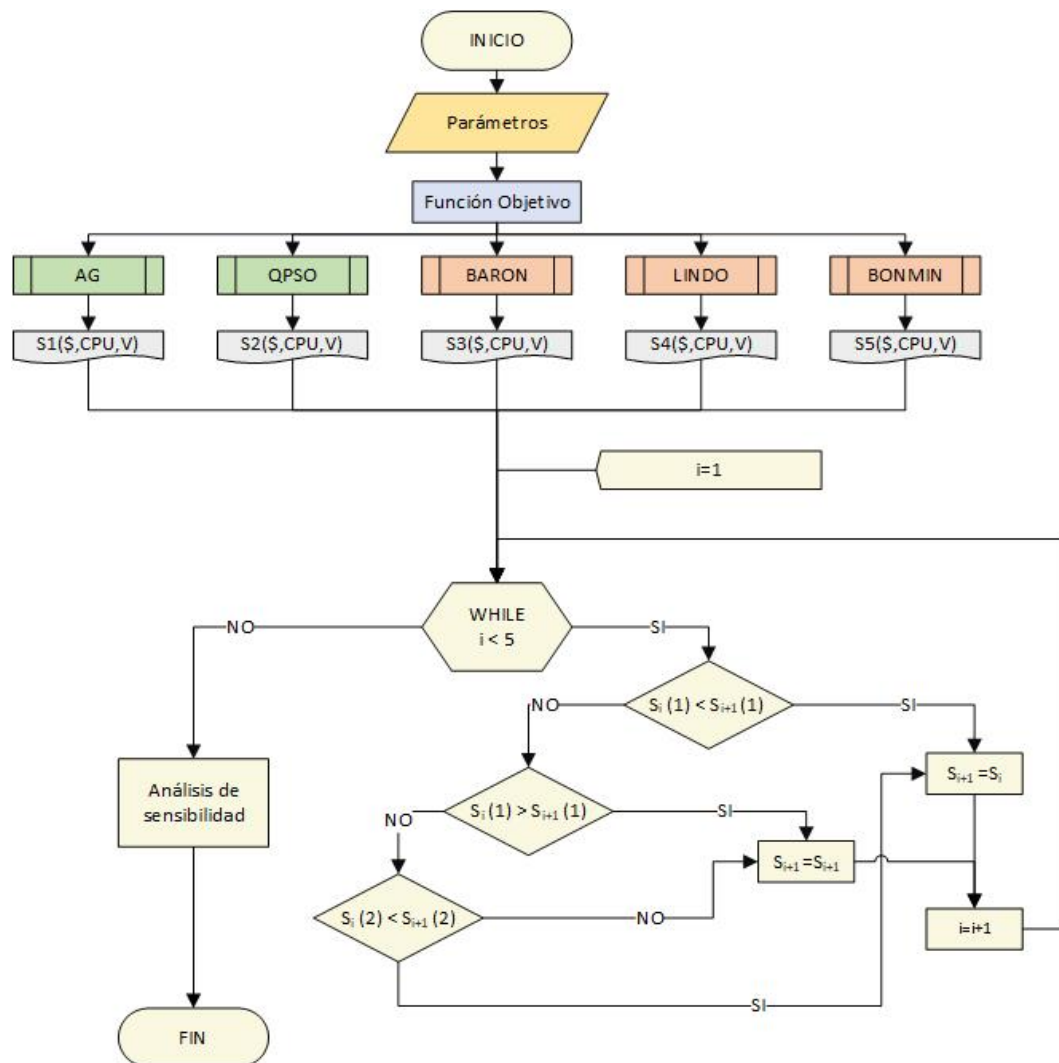


Figura 3.2: Algoritmo de localización y dimensionamiento

### 3.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para ratificar la solución obtenida en el proceso de optimización se hace necesario un análisis que permita validar la robustez de la micro-red ante pequeñas variaciones en uno de los perfiles de generación existentes en la red ya dimensionada.

En este análisis se tuvo en cuenta la generación fotovoltaica, ya que al ser una fuente de generación dependiente de las condiciones ambientales es la fuente ideal para este. Se propone tomar el perfil de máxima potencia que puede entregar el generador en el día con el promedio de irradiación más bajo de un año para así validar la localización y el dimensionamiento que se propone en este trabajo.

Una vez se pueda validar la robustez de la micro-red, se procede con el análisis de la estrategia de despacho por los generadores ante la presencia de dicha variación, seguidamente se hace un análisis de la variación de tensión en cada uno de los nodos existentes, en comparación a la solución original.

### **3.3.1 Robustez de la micro-red**

Para analizar la robustez de la red se procede a realizar el proceso de optimización con la variación en el perfil de potencia del generador fotovoltaico. Una vez obtenida la solución de este proceso, se compara con la original. De tener la misma localización de las fuentes y el dimensionamiento del sistema de distribución, la micro-red se puede definir como robusta.

### **3.3.2 Análisis de la variación de tensión**

Ya comprobada la robustez de la micro-red, se genera interés en conocer la variación del perfil de tensión con respecto al caso original. Para llevar a cabo dicho análisis se hace una comparación de los perfiles de tensión en cada nodo y de esta manera determinar el grado de afectación que tiene la disminución de la potencia fotovoltaica en la micro-red, haciendo énfasis en los nodos que se encuentran cercanos al generador.

### **3.3.3 Análisis de los perfiles de potencia**

Simultáneamente se hace un análisis del nuevo despacho de los generadores, con el fin de conocer como los generadores deben adaptarse a esta situación. Para esto es necesario hacer una comparación de la generación del caso original con el nuevo, partir de sus curvas de potencia e identificar que generador esta supliendo la mayoría de la potencia faltante.

## **Capítulo 4**

### **CASO ESTUDIO**

Con fin de poder aplicar todo lo planteado anteriormente, se decidió utilizar los datos consignados en la tesis de maestría "PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA DE MICRO-REDES EN ZONAS NO INTERCONECTADAS CON CONDICIONES DE DEMANDA DISPERSA" [26], los cuales corresponden a una región no interconectada, perteneciente al municipio de Cimitarra, Colombia. La región comprende 636 240m<sup>2</sup> aproximadamente y esta conformada por 7 viviendas, una fuente hídrica para implementar una PCH y 4 posibles opciones para la implementación de generadores fotovoltaicos.

Para un mejor tratamiento de los datos el autor de [26] modeló mediante una matriz de 100 X 100 posiciones la región seleccionada, la cual representa la ubicación de subzona de 10m X 10m. Esto permite crear matrices en las que se almacena los datos geográficos de la región. En las tablas 4.1,4.2 y 4.3 se consignan la posición de las viviendas, de las opciones para las fuentes de generación y los sistemas de almacenamiento junto con la altura a la que se encuentran.

Tabla 4.1: Ubicación de las viviendas

<b>Vivienda</b>	<b>Fila</b>	<b>Columna</b>	<b>Altitud</b>
1	52	53	590
2	29	72	522
3	5	40	556
4	7	16	644
5	52	23	607
6	57	70	617
7	87	52	710

Tabla 4.2: Ubicación de los posibles generadores

<b>Tipo de Generación</b>	<b>Opción</b>	<b>Fila</b>	<b>Columna</b>	<b>Altitud</b>
Generador fotovoltaico	1	24	3	677
	2	6	4	640
	3	66	66	655
	4	14	65	508
Pequeña central hidraulica	1	24	51	522
Generador Diesel	1	52	53	590
	2	29	72	522
	3	5	40	556
	4	7	16	644
	5	52	23	607
	6	57	70	617
	7	87	52	710

Tabla 4.3: Ubicación del sistema de almacenamiento

Opción	Fila	Columna	Altitud
1	52	53	590
2	29	72	522
3	5	40	556
4	7	16	644
5	52	23	607
6	57	70	617
7	87	52	710

En la figura 4.1 se presenta la ubicación en plano de dos dimensiones que permite la visualización de problema en cuestión.

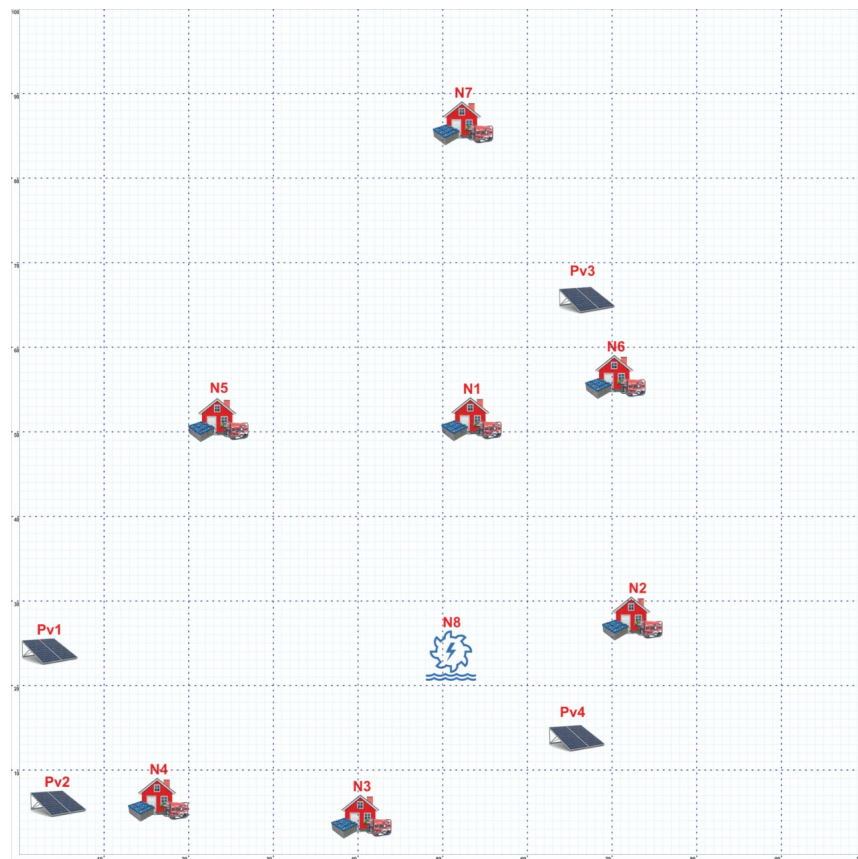


Figura 4.1: Localización de las viviendas y posible ubicación de la generación

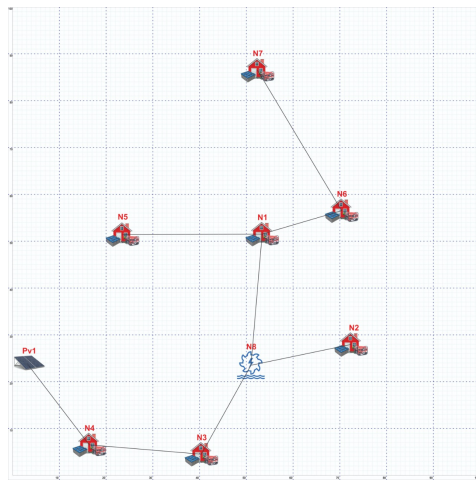
## 4.1. OPCIONES DE CONEXIÓN

Para la determinación de la red radial que interconecta la generación y el sistema de almacenamiento con las cargas se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

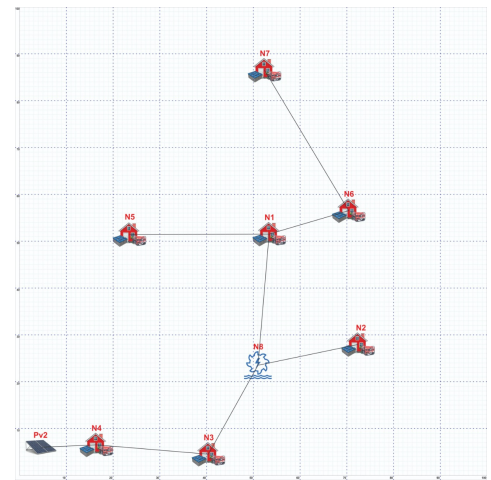
- ❖ La existencia de una unidad de generación por tipo de generación.
- ❖ La pequeña central hidráulica siempre debe estar conectada.
- ❖ se debe dimensionar una red con la menor distancia.
- ❖ Solo debe existir una unidad de almacenamiento y estará ubicado en los lugares donde estén ubicadas las cargas.
- ❖ La unidad de generación diésel estará ubicada en una de las cargas.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones se procedió a ejecutar el modelo de optimización de mínima distancia, para tal fin se hizo la siguiente propuesta:

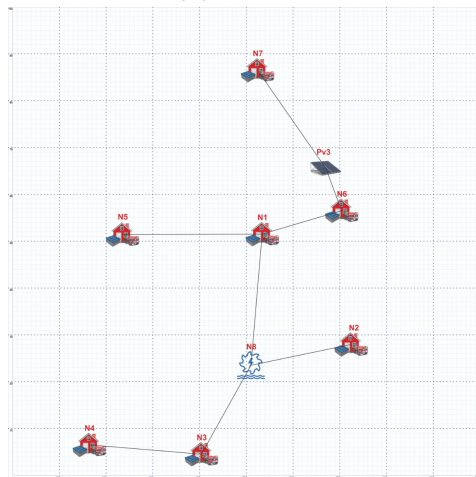
Se propusieron 4 casos, uno por cada posible ubicación de la generación fotovoltaica. Cada uno de estos fueron evaluados por cada solucionador de manera que el algoritmo de optimización logre encontrar la respuesta optima dentro de este conjunto de posibles conexiones, que deben cumplir con los requerimientos que una red eléctrica requiere, como lo es el balance de potencia la cargabilidad y regulación de tensión.



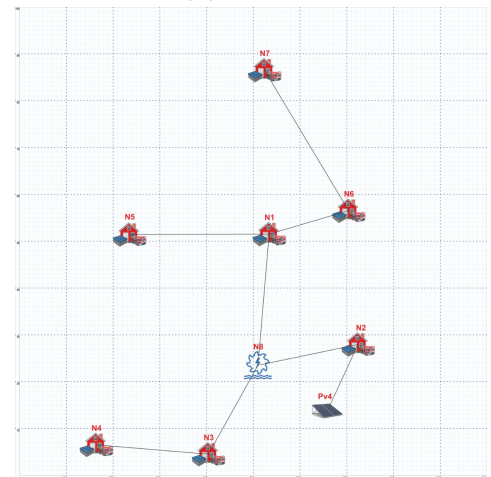
(a) Caso 1



(b) Caso 2



(c) Caso 3



(d) Caso 4

Figura 4.2: Opciones de conexiones

- (a) **Caso 1:** Se conectan las unidades de vivienda, la PCH y el generador fotovoltaico en la primera posible posición.
- (b) **Caso 2:** Se conectan las unidades de vivienda, la PCH y el generador fotovoltaico en la segunda posible posición.
- (c) **Caso 3:** Se conectan las unidades de vivienda, la PCH y el generador fotovoltaico en la tercera posible posición.
- (d) **Caso 4:** Se conectan las unidades de vivienda, la PCH y el generador fotovoltaico en la cuarta posible posición.

## 4.2. PARAMETROS DE LA MICRO-RED

A continuación, se presentan los parámetros necesarios para la implementación de la micro-red.

**4.2.1 Demanda.** Para las viviendas 7, se tomo una demanda máxima unitaria de 800[W] y para su perfil de demanda se utilizó el expuesto en la Norma para cálculos y diseño de sistemas de distribución de la Electrificado de Santander(ESSA) [14]. Además la casa 1 cuenta con dos motores monofásicos 1657[W] cada uno y un congelador el cual tiene un consumo de 190[W]. Para el perfil de demanda de estos motores, se utilizó el recopilado por el autor de [26].

La figura 4.3 representa la demanda conjunta de la casa y los motores y la figura 4.4 representa solo la demanda de la casa tipo.

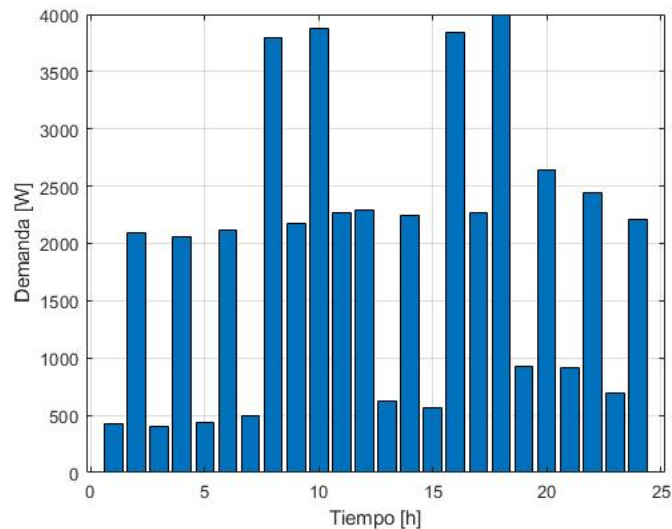


Figura 4.3: Demanda de vivienda 1

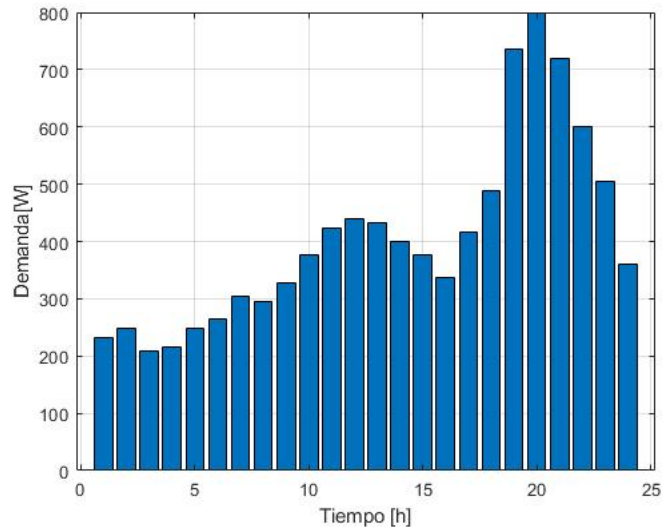


Figura 4.4: Demanda de la vivienda tipo

**4.2.2 Generación y sistema de almacenamiento.** Para la selección de las potencias para cada fuente de generación y el sistema de almacenamiento se tomó como punto de partida las obtenidas en el dimensionamiento planteado en [26], el cual se puede observar en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Potencia nominal de Generación

Fuente de energía	Sistema Fotovoltaico	Generador eólico	Pequeña central Hidráulica	Sistema de Almacenamiento	Grupo electrógeno
Potencia Nominal	800 [W]	0 [W]	4245 [W]	104310 [W/h]	2750 [W]

Luego se tomaron valores comerciales de potencia que fueran los más cercanos posibles a estos. Los valores y sus respectivas marcas de los equipos se pueden observar en la tabla 4.5

Tabla 4.5: Datos de generación

Fuente de energía	Sistema fotovoltaico	PCH	Grupo Electrónico	Sistema de Almacenamiento
Potencia Nominal	810 [W]	6 [kW]	3 [kW]	108 [kWh]
Marca	Canadian Solar	FH Hydro Energy	Bison	Power Safe
Modelo	CS6K-270	CF3.0-4	BS3500DSE	12OPzV1500

Adicionalmente se tomaron los parámetros del sistema de almacenamiento consignados en la tabla 4.6 y el perfil de potencia máxima de la generación fotovoltaica se obtuvo promediando la generación hora a hora durante un año. Este perfil se puede observar en la figura 4.5

Tabla 4.6: Datos del sistema de almacenamiento

Parámetro	Valor
Estado de carga máxima	100 %
Estado de carga mínimo	20 %
Estado de carga inicial	20 %
Potencia extraída máxima	86.4 [kW]
Potencia extraída mínima	0 [W]
Potencia inyectada máxima	86.4 [kW]
Potencia inyectada mínima	0 [W]
Eficiencia de carga	0.9
Eficiencia de descarga	0.9

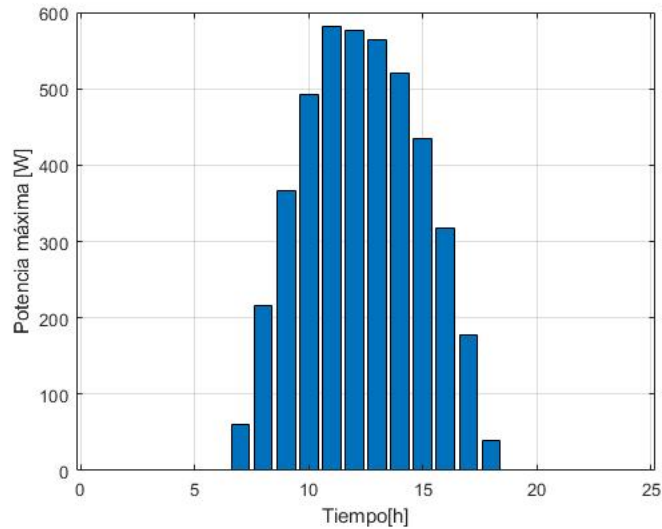


Figura 4.5: Potencia máxima del PV

**4.2.3 Conductor.** En la selección del conductor se deben determinar los parámetros propios de cada tipo de conductor, como su resistencia, reactancia y límite de flujo de potencia máximo por la línea.

Para este caso se usaron los datos que proporciona el fabricante de cables Nexans en las fichas técnicas adjuntas en este documento. Los datos relevantes se presentan a continuación:

Tabla 4.7: Datos de Conductores

Descripción del cable	Resistencia $\Omega/\text{km}$	Reactancia $\Omega/\text{km}$	Límite Máx kW
1X4+4 AWG DPLEX AAC/ACSR 600V 90C	0.001414	0.000108	16.2
1X2+2 AWG DPLEX AAC/ACSR 600V 90C	0.000888	0.000102	12
1/0+1/0AWG DPLEX AAC/ACSR 600V90C	0.000558	0.000099	9

**4.2.4 Costos unitarios.** Los costos unitarios de los parámetros de operación fueron definidos teniendo en cuenta los costos de la energía y combustible en Santander, los costos del conductor que presenta el fabricante de cables Nexans y los costos de los apoyos que se puede consultar en la CREG 015 de 2018 [9]. La tabla 4.8 presenta todos los costos unitarios necesarios para la operación.

Tabla 4.8: Costos unitarios

Parámetro	Costo
A.C.P.M	2.280 [\$/COP/L]
Perdidas de energía	460 [\$/COP/kWh]
Conductor 4AWG	2.215 [\$/COP/m]
Conductor 2AWG	2.256 [\$/COP/m]
Conductor 1/0 AWG	3.967 [\$/COP/m]
Costo de apoyos y herrajes	11.700 [\$/COP/m]

### 4.3. OPTIMIZACIÓN Y COMPARACIÓN

Una vez se obtuvieron los parámetros necesarios para la optimización se adaptaron en un archivo Excel de manera que la lectura de los mismos fuera sencilla para los softwares. Así como también la escritura del modelo propuesto en cada una de sus interfaces, en el caso GAMS de la interfaz permite una programación práctica, debido a que para cada solver no requiere de reescribir el modelo. En el caso de MATLAB si es necesario reestructurar la programación del modelo según el solver. En la siguiente tabla se presenta los resultados obtenidos por cada método de optimización. En ellas se pueden identificar los valores de las variables binarias, junto con el valor de la función objetivo y el tiempo de C.P.U. utilizado.

Tabla 4.9: Resultados de la optimización

Solucionadores y algoritmos	conductor [AWG]	Ubicación del almacenador	Ubicación del Generador		F. Ob. [\$COP]	CPU [s]
BARON	2	n1	PV	pv3	8273700	457.61
			PCH	n8		
			G.E.	n1		
BONMIN	2	n7	PV	pv3	8271350	1286.41
			PCH	n8		
			G.E.	n6		
LINDO	2	n5	PV	pv3	8271500	871.7
			PCH	n8		
			G.E.	n6		
AG	1/0	n1	PV	pv2	13153000	698.77
			PCH	n8		
			G.E.	n1		
QPSO	1/0	n1	PV	pv1	9244700	5230.68
			PCH	n8		
			G.E.	n1		

De los resultados obtenidos se puede hacer las siguiente observaciones:

- ❖ Todos los solver lograron llegar a una solución, satisfaciendo las restricciones que se plantearon en el modelo. Debido a la variedad de respuestas se puede observar que todos los solver llegaron al menos a un mínimo local y es la etapa de comparación la que permitirá seleccionar mejor la solución.
- ❖ Los resultados obtenidos por los solvers BARON, LINDO y BONMIN llegaron a un costo similares y menores a los obtenidos por AG y QPSO.
- ❖ Los dos resultados de menor valor BONMIN y LINDO presentan similitudes en la ubicación de las fuentes de energía y el conductor; la diferencia radica en la ubicación de la unidad de almacenamiento.

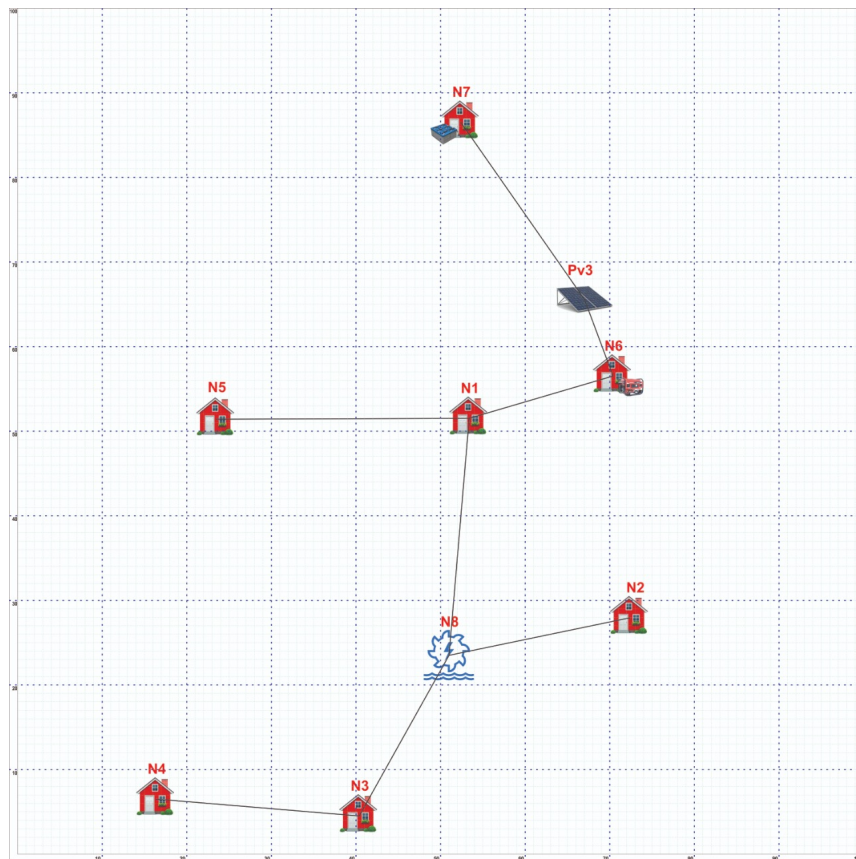
Del proceso de comparación mencionado en el capítulo 4 se obtuvo que la solución fue la que arrojó el solver BOMNIN con el menor valor de costo en la función objetivo

y se presencia en la siguiente tabla:

Tabla 4.10: Solución de la localización y dimensionamiento de la micro-red

SOLUCIÓN					
Conductor (AWG)	Ubicación del almacenador	Ubicación del generador		F.Ob. [\$COP]	CPU [s]
2	n7	PV	pv3	8271350	1286.41
		PCH	n8		
		G.E.	n6		

En la figura 4.10 se presenta localización y dimensionamiento de la micro-red que resultado del proceso de comparación.



## 4.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para la solución obtenida se procedió hacer una variación en perfil de máxima potencia del generador fotovoltaico, para analizar la robustez de la solución obtenida. El nuevo perfil de potencia de acuerdo al día con el promedio más bajo de radiación solar es el que se presenta a continuación:

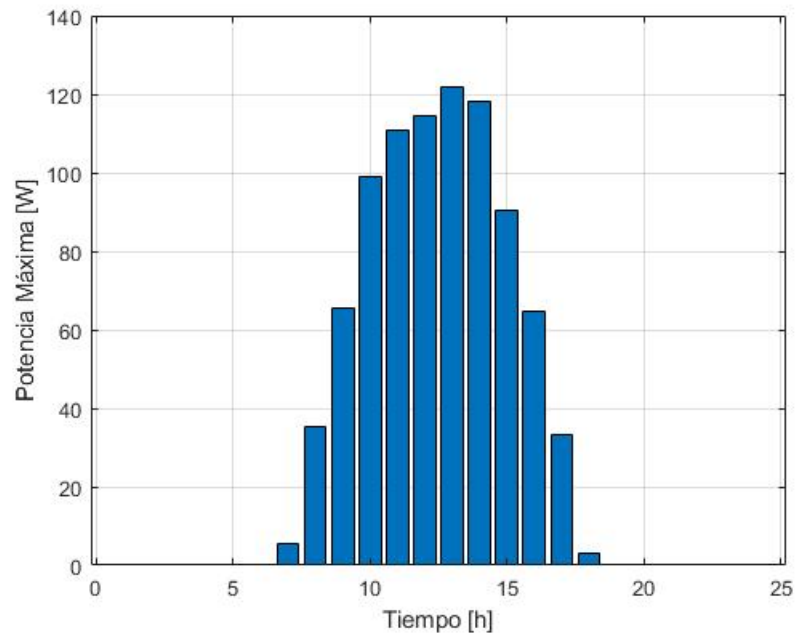


Figura 4.6: Potencia máxima con mínimo promedio de radiación solar

Al hacer la variación en el perfil de generación, la solución obtenida para la localización y dimensionamiento de la micro-red es la misma que se observa en el capítulo anterior.

Ya que se comprobó que la respuesta de la localización y el dimensionamiento del sistema se mantenían sin ningún cambio, se procede a hacer un análisis de la variación en tensión. Para ello se compararon las tensiones en el nodo donde se encuentra instalado el sistema fotovoltaico y los dos nodos más cercanos a este. Estas tensiones se pueden observar en la figura 4.7.

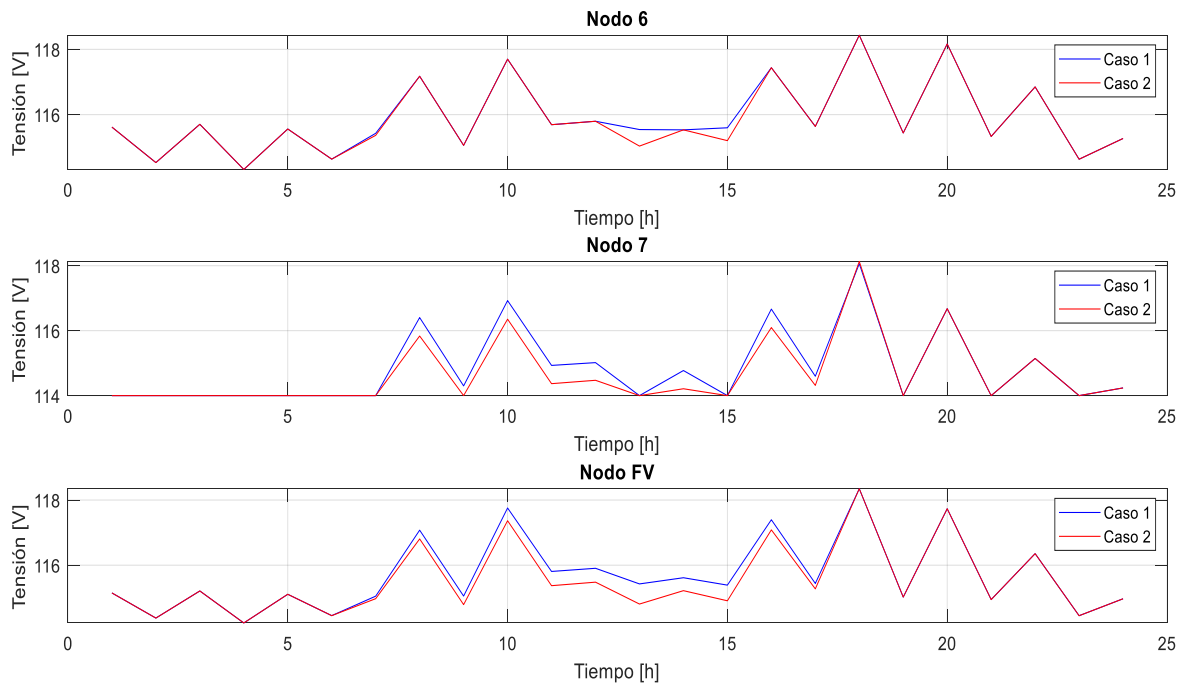


Figura 4.7: Perfiles de tensión

- **Caso 1.** Perfil de tensión sin variación
- **Caso 2.** Perfil de tensión con variación

De esta figura se puede decir que en todos los nodos cercanos al generador fotovoltaico presentaron una disminución en la magnitud de tensión, debido a la reducción del perfil de generación de potencia por parte del sistema fotovoltaico. Además Esta variación en el perfil se ve altamente reflejado en las horas pico del generador fotovoltaico.

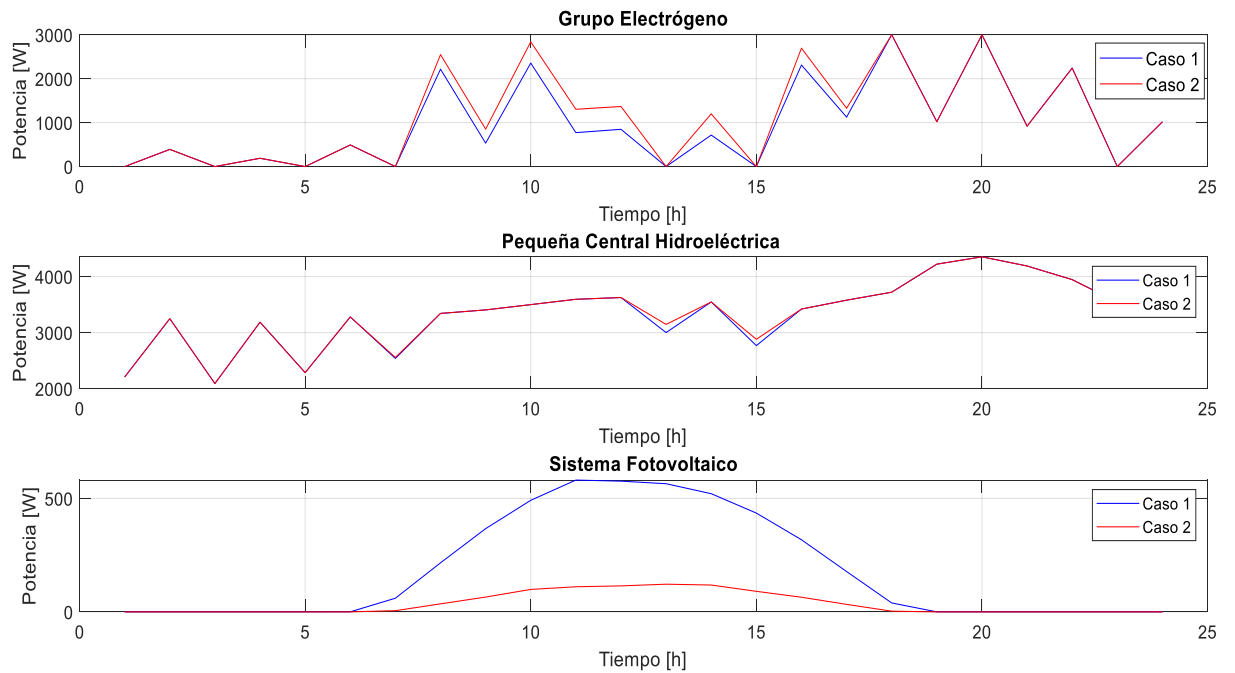


Figura 4.8: Perfiles de potencia generada

- **Caso 1.** Perfil de potencia generada sin variación
- **Caso 2.** Perfil de potencia generada con variación

Siguiendo con el análisis, se decidió comparar los perfiles de cada fuente de generación, los cuales se observan en la figura 4.8. estas gráficas se reflejan la disminución de la potencia fotovoltaica y como el generador diésel tiene que aumentar su generación para suplir toda la demanda, el cual está más cercano a los nodos afectados por la ausencia de generación.

## **Capítulo 5**

# **CONCLUSIONES**

En este trabajo se presentó una función que integra los costos de: operación de los generadores, pérdidas de potencia y inversión del sistema de distribución. Sujeta a restricciones como lo son el balance, la cantidad de fuentes de energía y los límites de: tensión, flujos de potencia en la línea y potencia generada. La cual al pasar por un proceso de minimización permite encontrar la mejor posición de los generadores y alanceadores, la topología radial de la red de distribución que mejor se comporta y el conductor más económico posible para que la red cumpla con los criterios técnicos.

La adecuada utilización de herramientas de optimización permite disminuir los tiempos de computo, también son esenciales a la hora de abordar problemas de gran complejidad.

Este tipo de modelos no lineales enteros mixtos son intrínsecamente no convexos lo que dificulta la obtención de un mínimo global. Es por esto que la comparación entre los resultados de diferentes técnicas de optimización permiten aumentar la probabilidad de encontrar una solución óptima.

A pesar de la variación del perfil de generación de la fuente de energía fotovoltaica, la solución del sistema de distribución y la localización de los generadores se mantuvieron, permitiendo deducir que la solución obtenida es robusta.

Se destaca que la ausencia de potencia por parte del sistema fotovoltaico sea suplido por el generador diésel. Esto debido a los requerimientos técnicos, como lo son límites de tensión y los flujos en las líneas, ya que el generador diésel es la fuente de energía que se encuentra más cercana a los nodos afectados por la ausencia del generador fotovoltaico.

## **Bibliografía**

- [1] ACKERMANN, T., ANDERSSON, G., AND SÖDER, L. Distributed generation: a definition1. *Electric power systems research* 57, 3 (2001), 195–204.
- [2] ANTONIO, C. S., DAVID, B. D., EDUARDO, C. F., AND ALONSO, C. G. M. *Generación distribuida, autoconsumo y redes inteligentes*. Editorial UNED, 2015.
- [3] ARAUJO, L., AND CERVIGÓN, C. *Algoritmos evolutivos: un enfoque práctico*. Ra-Ma, 2009.
- [4] BANCO MUNDIAL. Acceso a la electricidad (% de población). [En línea]. (Recuperado en 29 Agosto 2018). Disponible en <http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCS.ZS>.
- [5] BUSSIECK, M. R., AND PRUESSNER, A. Mixed-integer nonlinear programming. *SIAG/OPT Newsletter: Views & News* 14, 1 (2003), 19–22.
- [6] CASTRO, N. Y. G., GOMEZ, C. A. C., NAVA, E. A. M., AND MARTINEZ, F. A. P. Estrategias de control de calidad de energía en microrredes rurales. *Revista UIS Ingenierías* 16, 2 (2017), 93–104.
- [7] CIGRE, W. 37-23: Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system-final report. *Electra, September* (1998).
- [8] COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1715 (13, mayo, 2014). Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Diario Oficial. Bogotá, D.C., no.49150, 2014.

- [9] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS (CREG). Resolución 015-2018. Por la cual se establece la metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional, 2018.
- [10] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS (CREG). Resolución 030-2018. Por la cual se regula las actividades de autogeneración a a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional, 2018.
- [11] COMPUTATIONAL INFRASTRUCTURE FOR OPERATIONS RESEARCH (COIN-OR). Basic Open-source Nonlinear Mixed INteger programming. [En línea]. (Recuperado en 03 Octubre 2018). Disponible en <https://www.coin-or.org/Bonmin/index.html>.
- [12] DONDI, P., BAYOUMI, D., HAEDERLI, C., JULIAN, D., AND SUTER, M. Network integration of distributed power generation. *Journal of power sources* 106, 1-2 (2002), 1–9.
- [13] ECHEVERRI, M. G., RENDÓN, R. A. G., AND ISAZA, R. A. H. Planeamiento de sistemas de distribución de energía eléctrica usando branch and bound. *Ingeniería* 10, 2 (2005), 44–50.
- [14] ESSA. Norma Para el Cálculo y Diseño de Sistemas de Distribución - ESSA, 2004.
- [15] FUERTES, L. A. C. *Operación eficiente de almacenadores de energía en micro-redes*. PhD thesis, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingenierías Eléctrica, Electrónica, Física y Ciencias de la Computación. Ingeniería Eléctrica., 2016.
- [16] GAMS DEVELOPMENT CORPORATION. [En línea]. (Recuperado en 03 Octubre 2018). Disponible en <https://www.gams.com/>.
- [17] GILAT, A. *Matlab: Una introducción con ejemplos prácticos*. Reverté, 2006.
- [18] GONZÁLEZ-LONGATT, F. M. Tecnologías de generación distribuida: Costos y eficiencia. *System* 70 (2004), 70.
- [19] HOLLAND, J. *Adaptation in natural and artificial systems*, ann arbor: University of michigan press, 1975, 1992.

- [20] LEVRON, Y., GUERRERO, J. M., AND BECK, Y. Optimal power flow in microgrids with energy storage. *IEEE Transactions on Power Systems* 28, 3 (2013), 3226–3234.
- [21] LEZAMA, J. M. L. Ubicación óptima de generación distribuida en sistemas de distribución usando un modelo de programación no lineal entero mixto. *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento* 15, 30 (2011), 100–110.
- [22] MARNAY, C., CHATZIVASILEIADIS, S., ABBEY, C., IRAVANI, R., JOOS, G., LOMBARDI, P., MANCARELLA, P., AND VON APPEN, J. Microgrid evolution roadmap. In *Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015 International Symposium on* (2015), IEEE, pp. 139–144.
- [23] MENG, L., SANSEVERINO, E. R., LUNA, A., DRAGICEVIC, T., VASQUEZ, J. C., AND GUERRERO, J. M. Microgrid supervisory controllers and energy management systems: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 (2016), 1263–1273.
- [24] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA MME. Decreto 1623 Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política para la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional y en las Zonas No Interconectadas , 2015.
- [25] PRIDDLE, R. Distributed generation in liberalised electricity markets. *Internationale Energiebehörde. Paris* (2002).
- [26] RODRIGUEZ, R. O. Planificación energética de micro-redes en zonas no interconectadas con condiciones de demanda dispersa. Master’s thesis, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica, 2018.
- [27] SAHINIDIS, N. Baron user manual v. 15.6. 5. *The Optimization Firm* (2015).
- [28] TAZUKE, K., MURAMOTO, N., MATSUI, N., AND ISOKAWA, T. An application of quantum-inspired particle swarm optimization to function optimization problems. In *Neural Networks (IJCNN), The 2013 International Joint Conference on* (2013), IEEE, pp. 1–6.

- [29] TECNALIA, L. Guía básica de la generación distribuida. *Fund. la Energ. la Comunidad Madrid* (2007), 64.
- [30] TON, D. T., AND SMITH, M. A. The us department of energy's microgrid initiative. *The Electricity Journal* 25, 8 (2012), 84–94.
- [31] UNITED NATIONS. *UN Chronicle*, vol. 4. 2015.