

“Tema”

**ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE GENERACIÓN
FOTOVOLTAICA EN UNA MICRORRED GEOREFERENCIADA UTILIZANDO
GENERACIÓN DE COLUMNAS**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE GENERACIÓN
FOTOVOLTAICA EN UNA MICRORRED GEOREFERENCIADA UTILIZANDO
GENERACIÓN DE COLUMNAS**

**AUTOR:
SANTIAGO ALEJANDRO VARGAS GÁLVEZ**

**TUTOR:
WILSON DAVID PAVÓN VALLEJOS**

Quito, marzo de 2020

Santiago Alejandro Vargas Gálvez

ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA EN UNA MICRORED GEOREFERENCIADA UTILIZANDO GENERACIÓN DE COLUMNAS

Universidad Politécnica Salesiana, Quito - Ecuador 2020
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto:



Santiago Alejandro Vargas Gálvez (Y'1994). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Salesiano Don Bosco en la ciudad de Quito Ecuador obteniendo el título de bachiller técnico en electricidad y electrónica. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la óptima ubicación de generación distribuida basado en el método de generación de columnas.

svargasgl@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Wilson David Pavón Vallejos (Y'1989). Actualmente es docente a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. Obtuvo su título de tercer nivel en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE como Ingeniero Electrónico en Automatización y Control. Obtuvo su título de cuarto nivel en la Universidad de Newcastle upon Tyne como Magister en Automatización y Control. wpavon@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

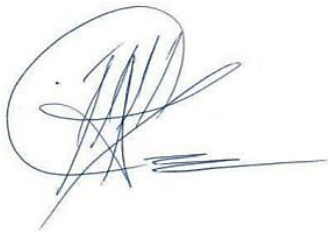
Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
©2020 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Wilson David Pavón Vallejos declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA EN UNA MICRORED GEOREFERENCIADA UTILIZANDO GENERACIÓN DE COLUMNAS” realizado por Santiago Alejandro Vargas Gálvez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., marzo de 2020

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized initial 'W' followed by several vertical strokes and a horizontal line extending to the right.

Wilson David Pavón Vallejos
C.C.: 1719224311

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Santiago Alejandro Vargas Gálvez, con documento de identificación N° 1721153888, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: “ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA EN UNA MICRORED GEOREFERENCIADA UTILIZANDO GENERACIÓN DE COLUMNAS”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado por la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., marzo de 2020



Santiago Alejandro Vargas Gálvez
C.C.: 1721153888

ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	1
Abstract.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Energías renovables no convencionales para generación distribuida.....	3
2.1.1. Generación eólica.....	3
2.1.2. Paneles fotovoltaicos.....	4
2.2. Generación distribuida en el sistema de distribución.....	4
2.2.1. Generación distribuida mediante generación fotovoltaica.....	4
2.2.2. Integración de generación distribuida.....	4
2.2.3. Impacto de la generación distribuida en la red de distribución.....	5
2.3. Optimización de la generación distribuida en el sistema de distribución.....	5
2.3.1. Descomposición de Dantzig Wolfe.....	6
2.3.2. Optimización basada en generación de columnas.....	7
2.3.3. Ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida.....	7
3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	7
3.1. Generación del escenario.....	7
3.2. Modelamiento del sistema de distribución generado.....	8
3.3. Optimización del sistema de distribución generado.....	9
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	10
4.1. Análisis del escenario generado.....	11
4.2. Análisis de ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida.....	14
5. CONCLUSIONES.....	17
5.1. Investigaciones futuras	
6. REFERENCIAS.....	18
7. ESTADO DEL ARTE.....	20

Índice de figuras

Figura 1 Microred de distribución con implementación de GD.....	3
Figura 2 Obtención de datos de consumo para una hora.....	9
Figura 3 Proceso de generación aleatoria de un SDE	9
Figura 4 Pseudocódigo del algoritmo de solución	10
<i>Figura 5 Escenario 1 generado aleatoriamente</i>	<i>14</i>
<i>Figura 6 Escenario 2 generado aleatoriamente</i> <i>Figura 7 Escenario 3 generado aleatoriamente</i>	14
Figura 8 Demanda ajustada para los escenarios generados.....	18
Figura 9 Algoritmo de cálculo del factor del uso del sol.....	22
Figura 10 Despacho de GD-PF	25
[Figura 11 Abastecimiento de la demanda con la inclusión de generación FV en el escenario 1	27
Figura 12 Abastecimiento de la demanda con la inclusión de generación FV en el escenario 2	28
Figura 13 Abastecimiento de la demanda con la inclusión de generación FV en el escenario 3	29
Figura 14 Tiempo empleado por el optimizador para hallar la solución.....	30
Figura 15 Costo óptimo de operación del SDE.....	30

Índice de tablas

Tabla 1 Tecnologías empleadas en GD.....	4
Tabla 2 Datos técnicos de GD comúnmente empleados	5
Tabla 3 Modelo de optimo dimensionamiento y ubicación de generación FV	11
Tabla 4 Modelo de optimización de costo de operación de un SDE con GD-PF.....	11
Tabla 5 Variables de la función objetivo.....	11
Tabla 6 Variables de la restricción de la potencia modificada de la generación FV.....	12
Tabla 7 Variables de la restricción de abastecimiento de la demanda en el tiempo t	12
Tabla 8 Variables de la restricción de balance de potencia en cada nodo i.....	12
Tabla 9 Variables de las restricciones de voltajes en cada nodo i.....	12
Tabla 10 Limites de longitud y latitud de zona de estudio.....	13
Tabla 11 Irradiancia promedio según inclinación de la unidad de generación de enero a marzo	13
Tabla 12 Irradiancia promedio según inclinación de la unidad de generación de abril a diciembre	13
Tabla 13 Parámetros iniciales para ingresar al optimizador.....	14
Tabla 14 Tabla de demanda escenario 1 en periodo de 1 hora.....	15
Tabla 15 Tabla de demanda escenario 2 en periodo de 1 hora.....	15
Tabla 16 Tabla de demanda escenario 3 en periodo de 1 hora.....	16
Tabla 17 Histórico de demanda y demanda ajustada para el escenario 1	16
Tabla 18 Histórico de demanda y demanda ajustada para el escenario 2	17
Tabla 19 Histórico de demanda y demanda ajustada para el escenario 3	17
Tabla 20 Datos de líneas del SDE 1 generado	18
Tabla 21 Datos de líneas del SDE 2 generado	19
Tabla 22 Datos de líneas del SDE 3 generado	19
Tabla 23 Interconexión de nodos i y j para cada escenario generado	20

Tabla 24 Potencias nominales de GD-PF.....	21
Tabla 25 Despacho de GD-PF en escenario 1.....	21
Tabla 26 Despacho de GD-PF en escenario 2.....	21
Tabla 27 Despacho de GD-PF en escenario 3.....	21
<i>Tabla 28 Factor del uso del sol G2 a G6.....</i>	<i>22</i>
Tabla 29 Factor del uso del sol G7 a G11.....	23
<i>Tabla 30 Factor del uso del sol G12 a G16.....</i>	<i>23</i>
Tabla 31 Factor del uso del sol G17 a G21.....	24
Tabla 32 Factor del uso del sol G22 a G26.....	24
Tabla 33 Factor del uso del sol G27 a G30.....	25
Tabla 34 Abastecimiento de la demanda para cada escenario generado.....	26

ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA EN UNA MICRORRED GEOREFERENCIADA UTILIZANDO GENERACIÓN DE COLUMNAS

Resumen

Dentro de los Sistemas de Distribución Eléctrica (SDE), los consumidores generan la demanda energética, lo que es tema principal de discusión, puesto que es necesario satisfacer la misma. A partir de este punto, es importante considerar que el hecho de entregar energía desde los puntos de generación centralizada hasta las cargas supone una gran inversión y gasto, si se pone sobre la mesa las siguientes consideraciones: pérdidas de energía, costos de operación, niveles de voltaje, etc.

La Generación Distribuida (GD), usando energías renovables no convencionales (ERNC), abre un espacio como posible solución a los problemas mencionados, dado que la GD se ubica en puntos estratégicos y cercanos a las cargas y cuentan con la capacidad de satisfacer la demanda requerida en dicho nodo, como también entregar energía al SDE, de ser necesario; por lo que se logra minimizar los problemas técnicos, económicos y operativos que puedan existir.

En este documento se expone la óptima ubicación y dimensionamiento de las unidades de GD con tecnología fotovoltaica que serán introducidas al SDE por medio de un algoritmo, que permita minimizar los costos de operación, basado en el método de generación de columnas que será implementado en GAMS; además de generar una micro red sin enrutamiento, que represente un escenario, lo más real

posible, a partir de la georreferenciación con ayuda de la teoría de grafos que se implementará en MATLAB.

Abstract

Within the Electricity Distribution Systems (EDS), consumers have the energy demand, which is the main topic of discussion, which is necessary to satisfy it. From this point on, it is important to consider that the fact of delivering energy from the centralized generation points to the loads implies a great investment and expense, if the following considerations are put on the table: energy losses, operating costs, levels of voltage, etc.

Distributed Generation (DG), using non-standard renewable energy (NSRE), opens a space as a possible solution to specific problems, since the GD is located at strategic points and close to loads and has the capacity to meet demand required in said node, as well as delivering power to the EDS, if necessary; Therefore, the technical, economic and operational problems that may exist are minimized.

This document will present the optimal location and dimensioning of the DG units with photovoltaic technology that will be introduced to the EDS by means of an algorithm, which will allow to minimize operating costs, based on the method of generating columns that will be implemented in GAMS ; In addition to generating a micro network without routing, which represents a scenario, as real as possible, from georeferencing

with the help of graph theory to be implemented in MATLAB.

Keywords: *Distributed generation, micro grid, georeferencing, column generation, optimization, operational costs, photovoltaic panels*

Palabras claves: *Generación distribuida, micro red, georreferenciación, generación de columnas, optimización, costos de operación y paneles fotovoltaicos.*

1. Introducción.

Los sistemas eléctricos han ido evolucionando su tecnología, debido al gran incremento de la demanda energética de los consumidores, lo que implica que el servicio debe tener un alto nivel de confiabilidad y calidad. Debido a este incremento y la necesidad de proveer un sistema eficiente y eficaz se ha puesto en marcha el uso de la GD [1].

La introducción de unidades de GD en el SDE parte desde la necesidad de obtener sistemas eléctricos flexibles, económicos y un ahorro significativo de la energía que será entregada[2]. La inmersión de GD tiene impacto sobre el SDE, el cual depende, estrictamente, de la tecnología que se emplee, puesto que se generan consideraciones técnicas y ambientales[3]. Con el uso de GD, generalmente, se toma a consideración dos puntos importantes: ubicación y dimensionamiento, que resultan ser variables de un problema combinatorio complejo de optimización[4]. Cabe señalar que una instalación de unidades de generación de forma no óptima conlleva un incremento sustancial de pérdidas de energía y una reducción considerable en los parámetros de medición de confiabilidad [5], ya que la ubicación de los generadores está

directamente relacionada con la estabilidad que posee el sistema en un estado estable. [6]

Como parte de las tecnologías empleadas dentro de la GD se encuentra las ERNC, que, por su importancia, en este estudio se presta mayor atención a la energía solar y a su adaptación a la generación distribuida, mediante paneles fotovoltaicos (GD-PF). Dentro de la GD-PF se clasifica a las unidades generadoras en dos escalas de niveles: media escala y pequeña escala[7] que serán utilizadas dentro del SDE, acorde a las regulaciones impuestas por el ente encargado.

Hay consideraciones a tener en cuenta para el uso de unidades fotovoltaicas, como parte de la GD, es la irradiación que se tiene en el área donde se implementará el generador [6]; así también, la viabilidad de ubicar los paneles fotovoltaicos a lo largo de la red para proveer la energía requerida a cada consumidor por cada nodo que tenga el sistema. [2]

El problema general radica en encontrar y dimensionar, de forma óptima, la ubicación y el tamaño de los paneles fotovoltaicos a lo largo de una micro red, por lo que en [8] se plantea la metodología conocida como generación de columnas, que es un método iterativo que busca encontrar la solución a un problema de “forma dividida” reduciendo así el tiempo de solución y el número de iteraciones.

La metodología de generación de columnas será adaptada a un escenario previamente generado con la herramienta de la georreferenciación con la ayuda del software online Open Street Maps (OSM), que facilita la ubicación en coordenadas reales de la locación sobre

la cual se quiere generar el escenario donde se representará la micro red; así como el uso del software MATLAB para implementar la teoría de grafos que permita encontrar los nodos del sistema y contabilizar los usuarios conectados a ese punto.

Es importante señalar que en el escenario generado en MATLAB no se utilizó enrutamiento de vías, debido a que no es parte de la presente investigación, con lo que sería posible obtener una distancia real entre los nodos del sistema de forma que se represente un escenario real. Todos los valores son obtenidos en función de la distancia, poseen un valor aproximado calculado por los algoritmos de clusterización.

Al problema de optimización, en [3], se plantea un modelo matemático de programación no lineal entera mixta que se basa en los costos de operación del SDE y en el flujo óptimo de potencia (FOP) para minimizar la relación del costo en cada nodo, para asegurar que la inclusión de los generadores distribuidos sea de forma óptima y el dimensionamiento sea correcto.

Para la comprensión del propósito de esta investigación, en la figura 1 se muestra una micro red, en la cual se integran unidades de generación distribuida como son los paneles fotovoltaicos.

Figura 1 Microred de distribución con implementación de GD



2. Marco Teórico

Dentro de la sección 2 se estudió en detalle todos los aspectos teóricos para el desarrollo de la presente investigación.

2.1 Energías renovables no convencionales para generación distribuida.

La GD es una forma de producción de energía, es fundamental dentro del sistema eléctrico. Las unidades que se acoplan al sistema son de tamaño

pequeño y compactas, por lo que su potencia nominal baja de forma proporcional. Usualmente, los generadores distribuidos poseen potencias nominales que fluctúan entre los kW hasta los MW a diferencia de la generación tradicional (centralizada), cuya potencia sobrepasa los 100MW. [9]

A continuación, en la tabla 1, se presentan las tecnologías comúnmente empleadas en GD, que se subdividen en dos grupos: convencionales y no convencionales [10].

Tabla 1 Tecnologías empleadas en GD

<i>Tecnologías convencionales</i>	<i>Tecnologías no convencionales</i>
Turbina de ciclo combinado	Micro hidro
Motor de combustión interna	Turbina eólica
Turbina de combustión	Arreglos fotovoltaicos
Micro turbinas	Biomasa
	Geotérmico
	Energía oceánica

2.1.1 Generación eólica.

Este tipo de generación se basa en el aprovechamiento de la energía del viento para la producción de energía eléctrica [11]. En años anteriores, cuando este tipo de tecnología hacía sus primeras apariciones en el ámbito eléctrico, el costo de los equipos era alto, lo que era un problema para su aplicación. Actualmente existen más de 30 mil unidades eólicas en operación alrededor de todo el mundo, dado a la disminución de costo de implementación de esta tecnología en las últimas dos décadas [12], debido a la serie de avances tecnológicos que se han dado con la

construcción de turbinas eficientes y económicas.

2.1.2 Paneles fotovoltaicos.

Los paneles fotovoltaicos aprovechan la energía de la luz solar para convertirla en energía eléctrica de forma directa, por medio del efecto fotoeléctrico, que se produce en cada una de las celdas fotovoltaicas debido a sus materiales semiconductores, que reaccionan a la energía solar. [13] Este tipo de tecnología no ha sido empleada a plenitud en países subdesarrollados por el alto costo de instalación y operación que posee actualmente.

2.2 Generación distribuida en el sistema de distribución eléctrica.

Dentro de la literatura existente, se define a la generación distribuida como: Generación de energía eléctrica ubicada dentro de la misma red de distribución [14]. Hoy en día es uno de los temas que más relevancia tiene y tendrá en un futuro en del mercado eléctrico a nivel mundial.

La penetración de GD dentro de la red de distribución se da a partir del incremento sustancial de la demanda energética a nivel mundial, lo que conlleva a elevar el nivel de calidad de energía eléctrica para los usuarios y a repotenciar las redes de distribución de energía [15] con el uso de diferentes formas de producción en función de la tecnología a emplear y los beneficios que esta pueda incurrir.

2.2.1 Generación distribuida mediante generación fotovoltaica.

La GD-PF es un tipo de tecnología que ha ido en un rápido crecimiento debido a su integración a los SDE a nivel mundial, gracias a los beneficios económicos,

técnicos y operativos que se obtienen con su uso. Una de las consideraciones importantes, al momento de implementar este tipo de tecnología, es la condición natural de la locación para explotar los recursos solares[7]. Anteriormente se mencionó, que las unidades de generación son clasificadas según a su capacidad de generar energía eléctrica.

El uso de GD-PF implica beneficios importantes para el sistema, según la literatura, existen algunos factores limitantes cuando se quiere instalar este tipo de tecnología y son: voltajes elevados en los nodos de carga, la existencia de armónicos, uso de inversores, fallas a tierra, corrientes de fuga, contribución de la GD-PF en los corto circuitos, valores de potencia y capacidad, entre muchos más[16] [17]. Es importante realizar un estudio de forma que se evalué la integración y penetración de GD-PF al SDE.

2.2.2 Integración de generación distribuida.

La integración de la GD, dentro de los sistemas de distribución, pasa por un tema de mercado eléctrico y ambiental [1]. Toda GD debe poseer tres características: conexión cercana a la carga, generación a escala (pequeña, mediana o grande) y la conexión a la red de distribución (no indispensable). [18]

Debido a las exigencias que se requieren a nivel de seguridad y confiabilidad, es necesaria la integración de unidades de generación distribuida, considerando algunos aspectos como: capacidad disponible, eficiencia y costo[19]. En la tabla 2 se presenta un resumen amplio que muestra las características de las tecnologías empleadas en la generación distribuida para cumplir con los

requerimientos técnicos que exige la red. [20]

Tabla 2 Datos técnicos de GD comúnmente empleados

	Capacidad [MW]	Eficiencia [%]	Costo de O&M[USD/kWh]
Turbina a gas	0,5-5	35	0.01
Micro turbina	0,5-25	29-42	0.005-0.0065
Fotovoltaico	0,001-1	6-19	0.001-0,004
Eólico	0,01-1	25	0.01
Celda de combustible	0,2-2	10-57	0.0017

2.2.3 Impacto de la generación distribuida en la red de distribución.

Los impactos sobre la red, al momento de integrar GD, se pueden clasificar en positivos y negativos, los cuales están ligados de forma directa a la ubicación que tengan las unidades de generación dentro del SDE[21].

Los impactos positivos son aquellos que funcionan como un apoyo al sistema de forma que mejoran los perfiles de tensión, reducen las pérdidas de energía y descongestionan las líneas; mientras que los impactos negativos afectan a cada uno de estos tres aspectos[18].

El impacto que tiene la implementación de GD es a nivel técnico y a nivel ambiental, ya que las tecnologías usadas usualmente en GD se asocian con una producción de energías limpias[11] es decir a la utilización de las ERNC es de las menos invasivas y contaminantes dentro de todas las formas de generación existentes hasta la actualidad.

Anteriormente se mencionó las limitantes que se generarán con la utilización de GD-PF dentro de la red de distribución. Según el estudio y modelo que se desee adaptar, cada uno de estas limitantes dará paso a una de las restricciones del modelo de optimización. Se tomará en cuenta aspectos técnicos y económicos.

El uso de la energía solar permite soluciones a nivel técnico y de operación del SDE, debido a la reducción del congestionamiento de líneas a nivel nacional y de la cercanía a los nodos de conexión del sistema[22] por este motivo tiene una ligera ventaja dentro de las muchas tecnologías empleadas para la producción de energía.

2.3 Optimización de la generación distribuida en el sistema de distribución.

Es importante conocer los escenarios sobre los cuales se implementará la GD, lo mismos deben poseer todas las combinaciones posibles entre la ubicación de las unidades, el tamaño de los generadores, la tecnología que quiere emplear y el número de unidades de

generación distribuida, que según el caso de estudio, puede ser simple o múltiple[23][24].

2.3.1 Descomposición de Dantzig Wolfe.

El algoritmo de Dantzig Wolfe (DW) es comúnmente utilizado para la resolución de problemas de programación lineal que tengan las siguientes características: gran tamaño, restricciones acopladas y una estructura de bloques[25]. En [26]se define a este método como un conjunto de restricciones que comprenden todas las variables del problema y otro grupo de restricciones que tienen incidencia sobre los subconjuntos disjuntos de variables.

Una de las aplicaciones de este método, que se empleará en este trabajo, es el modelo de descomposición para los SDE, el cual logra predecir el modelo económico sobre el cual va a funcionar el subsistema dinámicamente desacoplado. Se debe superar los inconvenientes en: el control óptimo en cada tiempo de muestreo, el cual es un problema lineal de espacio de estado que posee límites de entrada, tasa de entrada y flexibilidad; bajo estas tres consideraciones se asume que la función objetivo es el costo de operación de cada uno de los subsistemas y el costo que se genera al no cumplir con cada una de las restricciones de salida [27].

En [8] se indica que la descomposición de DW se basa en el método SIMPLEX aplicado para programación lineal, en donde se ejecutan iteraciones que arrojan como resultado, un ajuste cada vez más alto al valor requerido. Para ajustar el valor se crea columnas adicionales por cada nueva iteración, lo que da paso al proceso de optimización de generación de columnas.

A continuación, se explica de forma más detallada el método DW en donde su forma estándar viene expresada por (1), (2) y (3)

$$\text{Min } c^T x \quad (1)$$

$$\text{s. a : } Ax \leq b$$

$$0 \leq x$$

Donde: $c \in \mathbb{R}^i, b \in \mathbb{R}^j, A \in \mathbb{R}^{ixj}$ y tanto (2) como (3) debe tomarse como componentes. Cada uno de los índices A, b y c tienen estructura de matrices de orden m x n. En [28] se presenta la diferencia más notable entre los métodos DW y SIMPLEX: la matriz principal A se trastorna en un problema maestro (PM) y una serie de subproblemas (SP).

El PM corresponde a la matriz principal que contiene la mayor cantidad de variables existentes en las restricciones y los SP son un conjunto de matrices de forma reducida que contienen un sistema de ecuaciones, cuya característica principal es que debe tener el mismo número de ecuaciones y de variables de forma que se pueda obtener una solución factible para el PM [29].

La forma estándar de la descomposición DW es la función objetivo expresada en (1), sujeta al conjunto de todas las restricciones que intervienen en el problema. A partir de esta aclaración es posible definir el método DW en forma canónica tal como se expresa en el siguiente modelo [30]:

$$\text{min } Z = c^1 x^1 + c^2 x^2 + \dots + c^N x^N \quad (2)$$

$$\text{s. a: } L_1 x^1 + L_2 x^2 + \dots + L_N x^N \leq b^0$$

$$A_1 x^1 \leq b^1$$

$$A_2 x^2 \leq b^2$$

$$\vdots \quad \vdots$$

$$A_N x^N \leq b^N$$

$$x^1, x^2 \dots x^N \geq 0$$

Donde:

N: número de SP

L_K : sub matrices del PM que dependen de N

c^K : coeficientes de la función Z

b^K : delimitadores de las restricciones del problema.

2.3.2 Optimización basada en generación de columnas.

La descomposición de DW se divide en dos diferentes fases. La primera consiste en un problema con algunas filas que se transforma en un PM con pocas filas y un número mayor de columnas; la segunda, se aplica a otros problemas que forman parte del problema general, además del PM los cuales surgen a partir de una variedad de situaciones que usualmente no pueden ser resueltas, sino con técnicas especiales y es por eso que el número de columnas que generaran es bastante amplio[31].

En [32] se explica en forma estándar y el modelo de optimización, basado en generación de columnas para resolver un problema de programación lineal y es el siguiente:

$$\begin{aligned}
Z &= \min \sum_{j \in J} c_j \lambda_j & (3) \\
\text{s. a: } & \sum_{j \in J} a_j \lambda_j \geq b \\
& \lambda_j \geq 0, \quad j \in J
\end{aligned}$$

Donde: λ_j corresponde a las futuras columnas que se van a ingresar para iteración y resolver el problema de forma óptima.

2.3.3 Ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida.

Para los sistemas de distribución y para la inmersión de GD es necesario considerar algunos aspectos para obtener una red eficiente. En [5] se consideran los beneficios técnicos, económicos y ambientales que tiene el uso GD, así mismo muestra los posibles impactos que se pueden generar, como: pérdida de potencia, perfil de voltaje y calidad de energía.

Como se mencionó al inicio de este documento la ubicación y el dimensionamiento de las unidades de GD, son variables de un problema combinatorio complejo de optimización[4]. En [5] se señala cuál es la importancia de estos dos aspectos, ya que la ubicación de forma no optima desencadena una serie de problemas sobre los SDE, tales como: aumento de pérdidas y disminución de los niveles de confiabilidad puesto que la ubicación y el dimensionamiento están ligados de forma directa a la estabilidad del SDE en estado estable[6].

Al tratarse de un sistema de generación fotovoltaico, el análisis de la irradiancia se vuelve fundamental para resolver el problema. La irradiancia es la cantidad

de watos que incide en la zona de estudio por cada metro cuadrado. Estos valores se los obtiene a partir de un histórico de datos obtenido por los diferentes medidores que existen a nivel global; con lo que podemos realizar un estudio por día o por año.

La mayor limitante en la generación fotovoltaica es el sol, ya que, en promedio diario, el globo terráqueo obtiene doce horas de sol al día, con lo cual se puede deducir que los valores de irradiancia obtenidos corresponden a la mitad del periodo de tiempo de duración, es decir, doce horas.

3. Formulación del problema.

En la sección 3 se resuelven los problemas dentro de la generación del escenario, modelamiento y optimización del sistema de distribución generado.

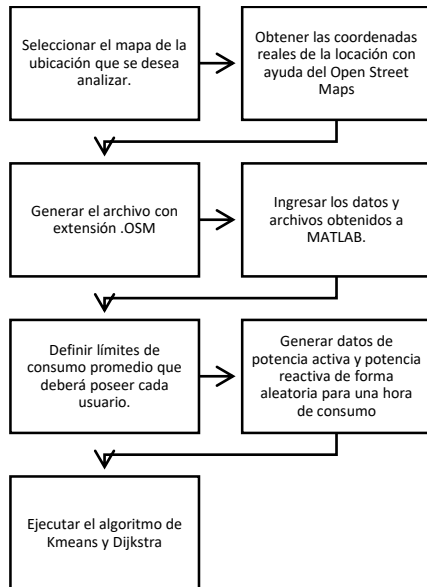
3.1 Generación del escenario.

La generación del escenario se basa en dos aspectos fundamentales. El primero es la obtención de datos reales en cuanto a la ubicación de los usuarios, por medio del uso de Open Street Maps y el algoritmo kmeans; el segundo, es proponer datos de consumo en una hora, los mismos que serán generados de forma aleatoria, en función de los parámetros establecidos de máximos y mínimos en base al consumo promedio de los usuarios residenciales.

La obtención de datos reales, en cuanto al conteo de número de usuarios, se da partir del uso de la georreferenciación como parte importante en esta sección, la misma que se encargará de hacer un conteo del número de usuarios que consten dentro del mapa que se desee analizar, usando el algoritmo de Kmeans para establecer el número total de usuarios.

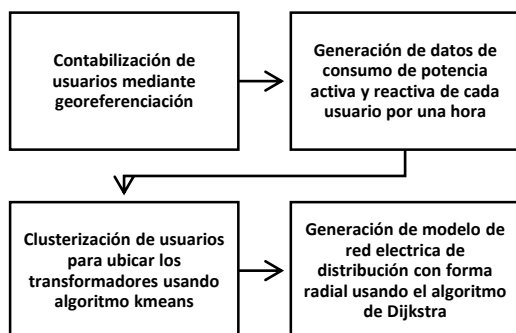
La obtención de los datos de usuarios y consumo sigue una cierta cronología que se presenta a continuación:

Figura 2 Obtención de datos de consumo para una hora



Una vez que se haya exportado el mapa al MATLAB, se usará el algoritmo de kmeans para generar clústers. Posterior a la clusterización de usuarios se necesita generar un modelo de red de distribución, para tal necesidad se empleó el algoritmo de Dijkstra para generar un punto de conexión optima entre los usuarios y el nodo de carga, lo cual para nuestro caso de estudio será un transformador. A continuación, se presenta un orden a seguir para conseguir la generación del escenario.

Figura 3 Proceso de generación aleatoria de un SDE



Al ser un sistema fotovoltaico, como se expuso en la sección 2.3.3 la gran limitante es el valor de la irradiancia que se tiene en promedio al día, ya que solo se cuenta con una probabilidad de generación del 50%. Por lo que más adelante se mostrarán los valores de irradiancia promedio para la zona de estudio.

3.2 Modelamiento del sistema de distribución generado.

Para encontrar el lugar idóneo y el dimensionamiento de las unidades de generación fotovoltaica, es necesario optimizar el costo de operación del sistema de distribución tomando en cuenta la implementación de generación fotovoltaica con las restricciones operativas que esto significa. Para el modelamiento se consideró lo siguiente: demanda total del sistema en una hora, despacho de unidades fotovoltaicas para un periodo de 24 horas, factor de uso del sol, que depende directamente de la irradiancia promedio y flujo óptimo de potencia.

Para implementar un sistema fotovoltaico dentro de la red de distribución eléctrica la irradiancia existente en la zona de estudio es un eje fundamental, por lo que se empleó el software online NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (NASA POWER) para la obtención de los datos de irradiancia promedio por año. Desde la tabla 27 hasta la tabla 32 se muestra el factor de uso del sol para cada uno de los posibles generadores, el cual es una probabilidad de que el generador fotovoltaico pueda generar dicho porcentaje de potencia debido a la cantidad de irradiancia promedio que se tiene en la zona.

La demanda total del sistema se considera como la demanda máxima que tendrá el sistema dentro de un periodo de 24 horas, por lo que se realizó una extrapolación de datos del histórico de un año de consumo de la zona estudiada para poder obtener la curva de demanda para el escenario generado,

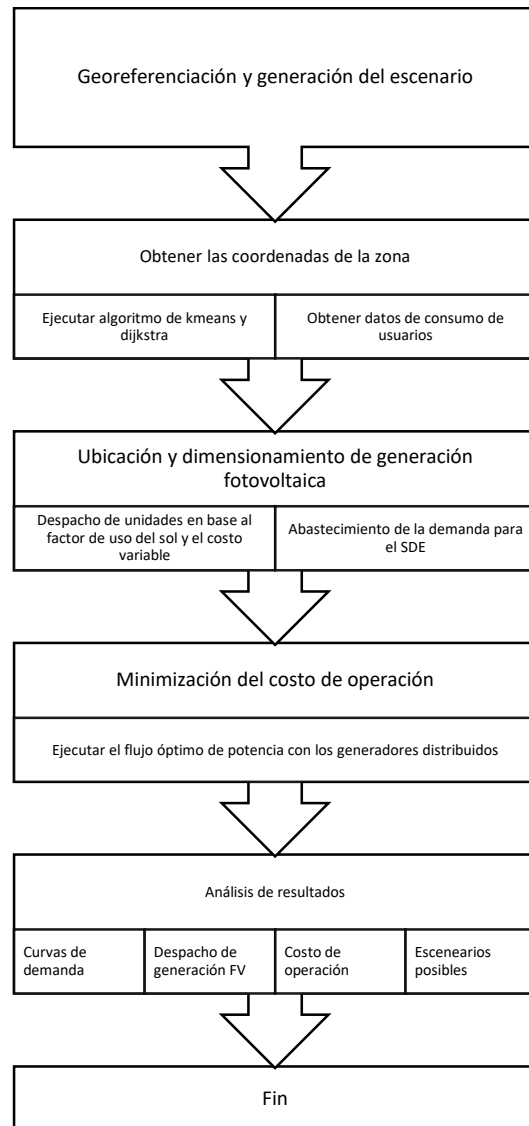
Una vez obtenidos los valores de factor de uso y demanda en el periodo de 24 horas es posible realizar la optimización del sistema en dos etapas, la primera es el cálculo del despacho de las unidades de generación fotovoltaica en base al costo variable de cada uno de los posibles generadores y la siguiente es la minimización del costo de operación del SDE mediante un flujo óptimo de potencia.

La función objetivo para poder realizar el despacho de las unidades fotovoltaicas con base al costo variable está sujeta a una serie de restricciones tales como: límites de operación para la generación distribuida que se vaya a emplear, el abastecimiento de la demanda para cada periodo de tiempo por parte de los generadores despachados y el factor de uso del sol que tendrá cada uno de los posibles generadores en base a la irradiancia promedio.

De la misma forma la función objetivo para minimizar el costo de operación del sistema una vez implementados los generadores fotovoltaicos como parte de la generación distribuida está sujeta a las siguientes restricciones: balance de potencia activa y reactiva, flujo de potencia en cada línea, límites de generación máxima y mínima de los generadores ubicados en base a la característica de cada generador y límites permitidos de voltaje y ángulos en cada nodo del sistema.

A continuación, se presenta el pseudocódigo del algoritmo de solución para la optimización del modelo presente en la tabla 3. En donde dividimos la solución del problema en tres etapas. La primera es la georreferencia de la locación y la generación del escenario que simule el SDE; la segunda, introduce en forma manual todos los datos generados de consumo al optimizador para obtener los resultados de la ubicación de los generadores fotovoltaicos y por último la minimización del costo de operación.

Figura 4 Pseudocódigo del algoritmo de solución



3.3 Optimización del sistema de distribución generado.

Una vez establecido el modelo bajo el cual se va a minimizar los costos de operación del sistema de distribución, se presentan las ecuaciones que harán parte de este. El modelo es un problema de programación lineal, pero se realizó una serie de cambios para que la optimización se realice bajo el criterio de generación de columnas en donde se tiene que establecer un problema maestro y un conjunto de subproblemas para resolver el modelo. A continuación, se puede observar las ecuaciones que harán parte de la optimización:

Tabla 3 Modelo de optimo dimensionamiento y ubicación de generación FV

Función objetivo
$CT = \sum_{t=1}^{24} C1_{fv,t} * C2_{red,t}$
Restricción de despacho en base al factor de uso del sol
$Pm_{fv,t} = P_{fv,t} * FU_{fv,t}$
Restricción de abastecimiento de la demanda
$\sum_{t=1}^{24} Pm_{fv,t} + \sum_{t=1}^{24} P_{red,t}$
Costos de operación de generación fotovoltaica y de red
$C1_{fv,t} = Pm_{fv,t} * Cv$
$C2_{red,t} = P_{red,t} * Cv$

Tabla 4 Modelo de optimización de costo de operación de un SDE con GD-PF

Función objetivo
$Co = \sum_{i=1}^n Pg_i * CV_i$
Restricciones de balance de potencia activa y reactiva
$\sum Pin_i - \sum Pout_i = \sum_{k=1}^n V_i * V_k * (g_{ik} * cos\theta_{ik} + b_{ik} * sin\theta_{ik})$
$\sum Qin_i - \sum Qout_i = \sum_{k=1}^n V_i * V_k * (g_{ik} * cos\theta_{ik} + b_{ik} * sin\theta_{ik})$
Restricción de niveles máximos y mínimos de voltaje en nodos
$Vmin_i \leq V_i \leq Vmax_i$

A continuación, se detalla cada uno de los elementos que intervienen en las ecuaciones presentadas en las tablas anteriores.

Función objetivo

En la tabla 3 y 4 la ecuación permite minimizar los costos de operación para el sistema generado, en base a la potencia de generación fotovoltaica, donde:

Tabla 5 Variables de la función objetivo

CT: Costo total de despacho de unidades de generación fotovoltaica inmersas en la red
C1 _{fv,t} : Costo de generación de la unidad fotovoltaica por hora
C2 _{red} : Costo de generación de red por hora
Co: Costo de operación del sistema generado
Pg _i : Potencia del generador para el nodo
CV _i : Costo variable del generador para el nodo i
n: Número total de generadores empleados

Restricción de despacho en base al factor de uso del sol

En la ecuación se indica que la potencia de despacho que deberá tener la unidad fotovoltaica dependerá directamente del factor de uso del sol en base a la irradiancia en la zona de estudio.

Tabla 6 Variables de la restricción de la potencia modificada de la generación FV

$P_{m_{fv,t}}$: Potencia de despacho modificada por generador FV en el tiempo t
$P_{fv,t}$: Potencia de despacho por cada generador FV en el tiempo t
$FU_{fv,t}$: Factor de uso del sol por cada generador FV en el tiempo t

Restricción de abastecimiento de la demanda

En la ecuación se indica que la suma de la potencia modificada de los generadores FV y la potencia de la red en el tiempo t debe satisfacer la demanda que tenga el sistema de distribución el mismo periodo de tiempo.

Tabla 7 Variables de la restricción de abastecimiento de la demanda en el tiempo t

$P_{m_{fv,t}}$: Potencia de despacho modificada por generador FV en el tiempo t
$P_{red,t}$: Potencia de red en el tiempo t

Restricciones de balance de potencia

En las ecuaciones se indica que la potencia activa y reactiva que se inyecta sobre el nodo i es igual a la que se consume en dicho nodo. Donde:

Tabla 8 Variables de la restricción de balance de potencia en cada nodo i

P_{in_i} : Potencia activa inyectada en el nodo i
P_{out_i} : Potencia activa consumida en el nodo i
Q_{in_i} : Potencia reactiva inyectada en el nodo i
Q_{out_i} : Potencia reactiva consumida en el nodo i
$ V_i $: Voltaje en el nodo i
$ V_k $: Voltaje en el nodo k
g_{ik} : elemento en la posición ik de la matriz de conductancia mutua
P_{in_i} : Potencia activa inyectada en el nodo i
P_{out_i} : Potencia activa consumida en el nodo i

Restricción de niveles máximos y mínimos de voltaje

En la ecuación se indica que valor de voltaje en cada nodo no puede superar los valores máximos y mínimos establecidos por las regulaciones para redes de distribución. Donde:

Tabla 9 Variables de las restricciones de voltajes en cada nodo i

V_{max_i} : Voltaje máximo permitido en el nodo i
V_{min_i} : Voltaje mínimo permitido en el nodo i

4. Análisis de resultados

Una vez propuesto el modelo a emplear y la metodología bajo la cual se resolverá el problema, se obtendrá un resultado, el cual es un escenario distinto para cada ejecución del código ya que el proceso de generar el escenario resulta de una serie de valores aleatorios siguiendo ciertas restricciones matemáticas en base a la literatura para obtener valores coherentes. Se han analizado tres

posibles escenarios para comprobar que el resultado para todos sea similar al resultado obtenido en el simulador.

4.2 Análisis del escenario generado.

Primero es necesario obtener las coordenadas específicas de la zona donde va a realizar el estudio, por lo que con la ayuda del Open Street Maps es posible realizar la georreferenciación del sitio, obteniendo como datos de longitud y latitud los siguientes valores:

Tabla 10 Límites de longitud y latitud de zona de estudio

Longitud	Latitud
-54.595	-25.527
-54.589	-25.5235

Con los datos de longitud y latitud es posible obtener los datos de irradiación promedio mediante el NASA POWER, en la siguiente tabla se muestra los datos obtenidos de la irradiación promedio de forma anual para un periodo desde enero de 1984 hasta diciembre de 2013.

Tabla 11 Irradiación promedio según inclinación de la unidad de generación de enero a marzo

Ángulo	Enero	Febrero	Marzo
Máximo			
0	7.49	6.74	5.96
10	7.32	6.78	6.19
25	6.74	6.53	6.26
40	5.88	5.94	5.98
90	1.79	2.2	3
Mínimo			
0	4.88	4.42	4.08
10	4.81	4.43	4.18
25	4.52	4.27	4.17
40	4.06	3.93	3.97
90	1.74	1.82	2.14

Tabla 12 Irradiación promedio según inclinación de la unidad de generación de abril a diciembre

Ángulo	Abril	Mayo	Junio
Máximo			
0	4.87	3.94	3.31
10	5.3	4.47	4.47
25	5.68	5.04	5.04
40	5.75	5.31	5.31
90	3.74	4.02	4.02
Mínimo			
0	3.43	2.59	2.59
10	3.63	2.82	2.53
25	3.79	3.04	2.78
40	3.76	3.11	2.89
90	2.41	2.24	2.2
Ángulo	Julio	Agosto	Septiembre
Máximo			
0	3.85	4.55	5.42
10	4.44	5.05	5.72
25	5.11	5.56	5.91
40	5.47	5.75	5.77
90	4.33	4.06	3.23
Mínimo			
0	2.01	3.28	3.93
10	2.17	3.54	4.09
25	2.32	3.77	4.15
40	2.37	3.81	4.01
90	1.72	2.62	2.31
Ángulo	Octubre	Noviembre	Diciembre
Máximo			
0	7.14	7.03	5.55
10	7.02	6.84	5.78
25	6.54	6.27	5.86
40	5.77	5.46	5.63
90	1.86	1.8	3.02
Mínimo			
0	5.06	5.6	3.81
10	5	5.48	3.9
25	4.72	5.09	3.89
40	4.25	4.51	3.7
90	1.78	1.79	2.05

El escenario que se genera toma en cuenta lo siguiente: número de usuarios totales, distancia entre cada usuario y número de usuarios conectados al transformador. Estos aspectos sirven para que el algoritmo Kmeans y Dijkstra cumplan con su objetivo, que es el de clusterizar a todos los usuarios y crear una red de interconexión entre cada uno de los nodos para simular el SDE con una configuración radial. A continuación, se muestran los escenarios que serán el caso de estudio.

Figura 5 Escenario 1 generado aleatoriamente

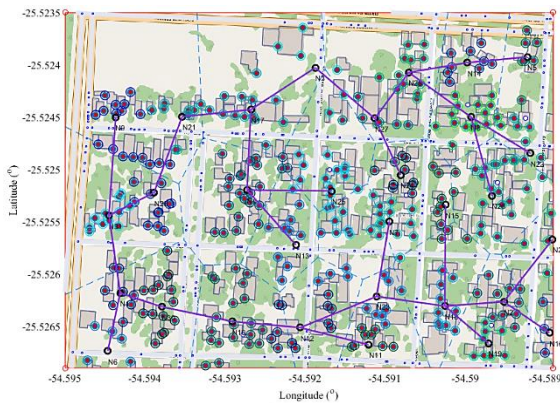


Figura 6 Escenario 2 generado aleatoriamente

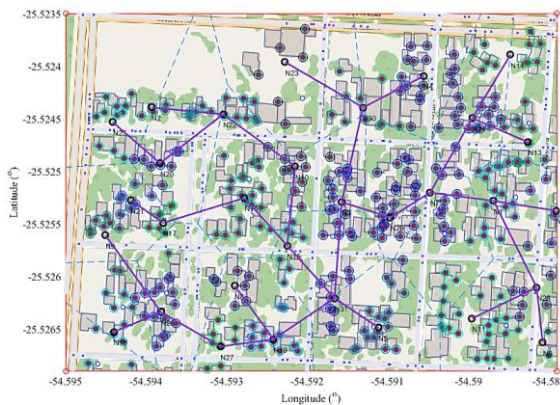
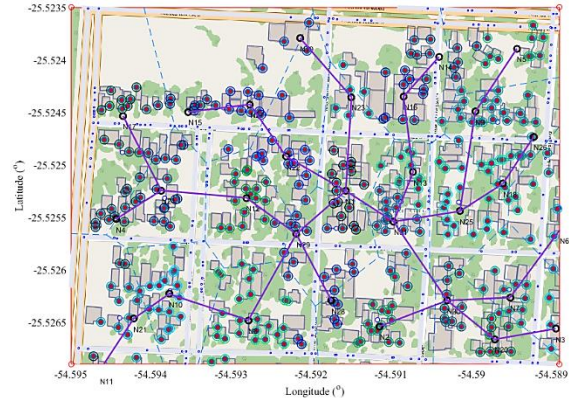


Figura 7 Escenario 3 generado aleatoriamente

aleatoriamente



Para los tres casos generados se observa que el número de nodos generados es de 31, ya que en el algoritmo de Dijkstra se han establecido valores específicos para distancia con 110m y número de usuarios con 19 para cada nodo o transformador de la posible red de distribución.

Cada uno de los nodos se encuentran conectados entre sí, dando lugar a una red de forma radial, por lo cual se simula un SDE acorde a los parámetros generales que deben tener los mismos. En cuanto a los valores, generados de forma aleatoria, se toma en cuenta lo siguiente:

Tabla 13 Parámetros iniciales para ingresar al optimizador

Interconexión de los nodos i y j

Esto nos brinda la posibilidad de conocer cómo están conectados los nodos i y j para obtener los datos de la matriz Y de barra.

Distancia de la línea de conexión entre el nodo i y el nodo j

La distancia es utilizada para conocer la impedancia de la línea empleada en ese tramo, dato fundamental para calcular el FOP

Potencia activa en cada nodo i

Es un valor calculado de forma aleatoria para poder establecer el FOP

Potencia reactiva en cada nodo i

Es un valor calculado de forma aleatoria para poder establecer el FOP

Los datos generados de forma aleatoria corresponden a datos de consumo de un periodo de 1 hora. Tal y como se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 14 Tabla de demanda escenario 1 en periodo de 1 hora

	Bus	Pc[kW]	Qc[kVAR]
B1	31	0	0
B2	1	32,06	12,51
B3	2	41,41	15,92
B4	3	25,59	9,63
B5	4	103,26	39,48
B6	5	32,55	12,16
B7	6	29,08	11,35
B8	7	74,73	27,54
B9	8	88,14	34,31
B10	9	64,68	24,80
B11	10	115,35	46,60
B12	11	51,24	19,31
B13	12	75,09	27,88
B14	13	72,10	29,39
B15	14	56,06	21,94
B16	15	69,82	27,05
B17	16	39,15	14,20
B18	17	80,37	29,35
B19	18	68,23	26,86
B20	19	55,86	20,22
B21	20	114,73	43,17
B22	21	81,08	32,19
B23	22	104,64	38,95
B24	23	76,92	29,93
B25	24	78,08	30,62
B26	25	168,38	63,36
B27	26	114,10	44,97
B28	27	58,46	23,11
B29	28	101,61	40,90
B30	29	86,72	33,42
B31	30	141,23	54,88
Total		2300,71	885,98

Tabla 15 Tabla de demanda escenario 2 en periodo de 1 hora

	Bus	Pc[kW]	Qc[kVAR]
B1	31	0	0
B2	1	60,25	24,47
B3	2	20,74	8,76
B4	3	74,08	26,43
B5	4	72,62	26,84
B6	5	79,34	31,69
B7	6	34,20	11,78
B8	7	89,60	36,37
B9	8	36,71	14,26
B10	9	48,44	18,15
B11	10	60,54	24,77
B12	11	123,88	47,16
B13	12	52,97	19,94
B14	13	77,84	31,82
B15	14	67,97	28,01
B16	15	51,06	21,09
B17	16	123,76	46,78
B18	17	53,84	20,76
B19	18	75,57	30,11
B20	19	91,11	35,00
B21	20	57,11	23,52
B22	21	51,27	22,63
B23	22	112,87	42,13
B24	23	38,48	15,07
B25	24	125,43	46,85
B26	25	80,18	31,33
B27	26	131,42	49,33
B28	27	75,12	26,92
B29	28	76,80	29,50
B30	29	146,74	56,75
B31	30	88,21	37,37
Total		2278,16	885,59

Tabla 16 Tabla de demanda escenario 3 en periodo de 1 hora

	Bus	Pc[kW]	Qc[kVAR]
B1	31	0	0
B2	1	68,70	27,34
B3	2	62,82	24,30
B4	3	25,52	9,19
B5	4	58,89	23,26
B6	5	46,61	18,72
B7	6	53,16	19,49
B8	7	49,97	20,40
B9	8	139,92	54,18
B10	9	85,02	32,08
B11	10	71,34	27,95
B12	11	11,29	4,59
B13	12	93,35	36,31
B14	13	78,31	29,94
B15	14	68,15	26,57
B16	15	69,73	27,44
B17	16	64,87	26,03
B18	17	87,12	32,28
B19	18	95,70	37,66
B20	19	20,85	8,38
B21	20	57,00	22,41
B22	21	95,17	37,78
B23	22	90,47	36,05
B24	23	46,37	17,21
B25	24	118,04	44,81
B26	25	88,05	35,32
B27	26	105,82	42,20
B28	27	91,50	34,60
B29	28	93,98	33,68
B30	29	87,18	34,38
B31	30	96,67	39,04
Total		2221,58	863,58

Para cumplir con los propósitos de este documento es necesario obtener datos de consumo en un periodo mayor. Es por este motivo que se realizó una extrapolación de datos en base a un histórico de consumo promedio de la zona en un periodo de 24h, con la suposición de que el dato generado de

forma aleatoria corresponde a la demanda máxima en dicho periodo. En las siguientes tablas se muestra el histórico de demanda con su extrapolación de datos con la demanda máxima obtenida de forma aleatoria:

Tabla 17 Histórico de demanda y demanda ajustada para el escenario 1

Hora	D1 [kW]	%D1	D2 [MW]
h1	2583.225	70.416%	1.619576
h2	2434.065	66.350%	1.526059
h3	2347.835	64.000%	1.471996
h4	2335.445	63.662%	1.46422
h5	2357.565	64.265%	1.478097
h6	2484.745	67.732%	1.557833
h7	2603.315	70.964%	1.632172
h8	2598.255	70.826%	1.629
h9	2806.03	76.490%	1.759266
h10	3050.13	83.144%	1.912307
h11	3189.25	86.936%	1.999529
h12	3281.235	89.444%	2.057200
h13	3288.375	89.638%	2.061677
h14	3226.97	87.964%	2.023178
h15	3288.585	89.644%	2.061808
h16	3318.2	90.451%	2.080376
h17	3314.885	90.361%	2.078297
h18	3215.955	87.664%	2.016272
h19	3441.915	93.823%	2.15794
h20	3668.5	100.000%	2.3
h21	3586.62	97.768%	2.24866
h22	3380.395	92.147%	2.11936
h23	3140.605	85.610%	1.96903
h24	2881.985	78.560%	1.80688

Tabla 18 Histórico de demanda y demanda ajustada para el escenario 2

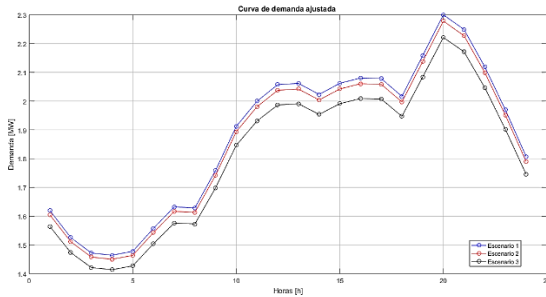
Hora	D1 [kW]	%D1	D2 [kW]
h1	2583.225	70.416%	1.60409
h2	2434.065	66.350%	1.51146
h3	2347.835	64.000%	1.45792
h4	2335.445	63.662%	1.45022
h5	2357.565	64.265%	1.46396
h6	2484.745	67.732%	1.54293
h7	2603.315	70.964%	1.61656
h8	2598.255	70.826%	1.61342
h9	2806.03	76.490%	1.74244
h10	3050.13	83.144%	1.89402
h11	3189.25	86.936%	1.98040
h12	3281.235	89.444%	2.03752
h13	3288.375	89.638%	2.04196
h14	3226.97	87.964%	2.00383
h15	3288.585	89.644%	2.04209
h16	3318.2	90.451%	2.06048
h17	3314.885	90.361%	2.05842
h18	3215.955	87.664%	1.99699
h19	3441.915	93.823%	2.13730
h20	3668.5	100.000%	2.27800
h21	3586.62	97.768%	2.22716
h22	3380.395	92.147%	2.09910
h23	3140.605	85.610%	1.95020
h24	2881.985	78.560%	1.78960

Tabla 19 Histórico de demanda y demanda ajustada para el escenario 3

Hora	D1 [kW]	%D1	D2 [kW]
h1	2583.225	70.416%	1.563948
h2	2434.065	66.350%	1.473643
h3	2347.835	64.000%	1.421437
h4	2335.445	63.662%	1.413936
h5	2357.565	64.265%	1.427328
h6	2484.745	67.732%	1.504326
h7	2603.315	70.964%	1.576111
h8	2598.255	70.826%	1.573047
h9	2806.03	76.490%	1.698839
h10	3050.13	83.144%	1.846624
h11	3189.25	86.936%	1.930850
h12	3281.235	89.444%	1.986540
h13	3288.375	89.638%	1.990863
h14	3226.97	87.964%	1.953687
h15	3288.585	89.644%	1.990990
h16	3318.2	90.451%	2.008920
h17	3314.885	90.361%	2.006913
h18	3215.955	87.664%	1.947018
h19	3441.915	93.823%	2.083820
h20	3668.5	100.000%	2.221000
h21	3586.62	97.768%	2.171428
h22	3380.395	92.147%	2.046574
h23	3140.605	85.610%	1.901399
h24	2881.985	78.560%	1.744825

Como resultado de la extrapolación de datos a partir de la demanda máxima y el histórico de consumo en el periodo de 24 horas, la hora 20 es la que tiene la mayor demanda. A partir de la tabla 15, 16 y 17 es posible generar la curva de demanda del modelo generado para el periodo de tiempo establecido, tal y como se muestra en la siguiente figura:

Figura 8 Demanda ajustada para los escenarios generados



Una vez conseguidos los datos iniciales de la red, se necesita conocer las características técnicas que tiene la misma, es decir, datos de líneas y datos de conexión. De igual forma es necesario conocer el factor de uso del sol que tendrán cada uno de los distintos posibles generadores fotovoltaicos para establecer la potencia se requiere para satisfacer la demanda.

Se realizó un despacho económico de los generadores fotovoltaicos en función a los precios variables de los mismos, con el fin de conocer cuáles son las unidades de generación que potencia deben tener para que sea una inmersión de GD de forma óptima. A continuación, en las tablas siguientes se muestran los datos de impedancia y distancia de las líneas para el cálculo del FOP.

Tabla 20 Datos de líneas del SDE 1 generado

LINEA	RL[ohm]	XL[ohm]	Dist[m]
L1	0,0358	0,01207	83,85
L2	0,0316	0,01066	74,046
L3	0,0394	0,01329	92,275
L4	0,0366	0,01233	85,646
L5	0,0322	0,01086	75,417
L6	0,0271	0,00915	63,514
L7	0,0346	0,01168	81,09
L8	0,0390	0,01314	91,22
L9	0,0446	0,01505	104,55
L10	0,0382	0,01289	89,541
L11	0,0374	0,01261	87,589
L12	0,0366	0,01234	85,711
L13	0,0361	0,01218	84,615
L14	0,0317	0,0107	74,303
L15	0,0460	0,01551	107,71
L16	0,0282	0,00951	66,07
L17	0,0370	0,01246	86,541
L18	0,0368	0,01243	86,286
L19	0,0289	0,00975	67,701
L20	0,0262	0,00884	61,419
L21	0,0376	0,0127	88,164
L22	0,0359	0,01212	84,162
L23	0,0432	0,01457	101,19
L24	0,0291	0,00981	68,156
L25	0,0454	0,0153	106,23
L26	0,0376	0,01267	87,964
L27	0,0393	0,01327	92,152
L28	0,0277	0,00934	64,845
L29	0,0384	0,01296	90,006
L30	0,0231	0,0078	54,159

Tabla 21 Datos de líneas del SDE 2 generado

LINEA	RL[ohm]	XL[ohm]	Dist[m]
L1	0,0292	0,00986	68,447
L2	0,0323	0,01089	75,597
L3	0,0351	0,01185	82,277
L4	0,0444	0,01498	104,05
L5	0,0329	0,01108	76,957
L6	0,0440	0,01484	103,06
L7	0,0469	0,0158	109,72
L8	0,0333	0,01123	78,009
L9	0,0425	0,01434	99,58
L10	0,0415	0,01399	97,132
L11	0,0440	0,01484	103,05
L12	0,0351	0,01184	82,215
L13	0,0396	0,01335	92,705
L14	0,0438	0,01478	102,62
L15	0,0426	0,01436	99,689
L16	0,0360	0,01215	84,381
L17	0,0287	0,00967	67,132
L18	0,0269	0,00909	63,1
L19	0,0303	0,0102	70,852
L20	0,0311	0,01048	72,779
L21	0,0456	0,01537	106,75
L22	0,0367	0,01238	85,939
L23	0,0335	0,0113	78,474
L24	0,0302	0,01018	70,699
L25	0,0327	0,01103	76,598
L26	0,0429	0,01445	100,35
L27	0,0363	0,01225	85,074
L28	0,0378	0,01276	88,6
L29	0,0318	0,01074	74,55
L30	0,0349	0,01178	81,776

Tabla 22 Datos de líneas del SDE 3 generado

LINEA	RL[ohm]	XL[ohm]	Dist[m]
L1	0,0292	0,00985	68,375
L2	0,0380	0,0128	88,904
L3	0,0329	0,0111	77,11
L4	0,0275	0,00927	64,387
L5	0,0363	0,01223	84,912
L6	0,0406	0,01368	94,987
L7	0,0337	0,01136	78,876
L8	0,0467	0,01575	109,41
L9	0,0458	0,01546	107,33
L10	0,0441	0,01487	103,25
L11	0,0297	0,01001	69,495
L12	0,0313	0,01056	73,347
L13	0,0247	0,00834	57,916
L14	0,0262	0,00882	61,258
L15	0,0333	0,01122	77,924
L16	0,0346	0,01168	81,145
L17	0,0396	0,01334	92,624
L18	0,0263	0,00887	61,591
L19	0,0384	0,01294	89,848
L20	0,0310	0,01045	72,578
L21	0,0221	0,00745	51,763
L22	0,0355	0,01196	83,025
L23	0,0426	0,01436	99,69
L24	0,0456	0,01538	106,83
L25	0,0358	0,01206	83,731
L26	0,0267	0,009	62,469
L27	0,0305	0,01028	71,393
L28	0,0355	0,01197	83,127
L29	0,0329	0,01108	76,968
L30	0,0458	0,01543	107,16

Para el estudio del SDE generado se consideró el uso de un cable ASCR 2/0 para el cálculo de la impedancia de cada una de las líneas que hacen parte del SDE. A continuación, se muestra la tabla con las conexiones entre nodos del sistema:

Tabla 23 Interconexión de nodos i y j para cada escenario generado

LINEA	E1		E2		E3	
	Bi	Bj	Bi	Bj	Bi	Bj
L1	1	31	1	7	1	31
L2	2	18	2	22	2	30
L3	3	17	3	31	3	20
L4	4	17	4	30	4	24
L5	5	14	5	31	5	9
L6	6	1	6	28	6	7
L7	7	23	7	29	7	30
L8	8	28	8	19	8	29
L9	9	31	9	26	9	25
L10	10	30	10	15	10	8
L11	11	12	11	28	11	21
L12	12	10	12	1	12	29
L13	13	4	13	24	13	31
L14	14	28	14	24	14	16
L15	15	18	15	31	15	27
L16	16	2	16	15	16	13
L17	17	21	17	16	17	24
L18	18	23	18	26	18	25
L19	19	18	19	31	19	23
L20	20	31	20	22	20	30
L21	21	20	21	17	21	10
L22	22	8	22	10	22	1
L23	23	12	23	30	23	1
L24	24	27	24	7	24	12
L25	25	4	25	20	25	31
L26	26	8	26	27	26	18
L27	27	3	27	19	27	22
L28	28	27	28	1	28	29
L29	29	2	29	3	29	1
L30	30	1	30	3	30	31

Para cada uno de los escenarios generados, las condiciones iniciales del sistema son los siguientes: 10MVA y 12.66kV para la potencia nominal y voltaje nominal, respectivamente. En este caso de estudio cada escenario que ha sido generado tiene como barra slack al bus 31, que es donde inicia el ramal primario para todo el SDE, por lo que

posterior a la optimización del modelo de barras se obtendrá el nodo en la cual se va a ubicar la GD, así como la dimensión de la unidad de generación fotovoltaica a ser instalada.

4.2 Análisis de ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida.

El principal objetivo de este trabajo es encontrar la ubicación y dimensionar el tamaño de la generación fotovoltaica de forma óptima para ser instalada en un SDE basándose en el siguiente aspecto: la optimización del costo de operación que deberá tener el sistema, restringido por aspectos técnicos, económicos y de irradiación solar. A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la optimización de los modelos matemáticos que se explicaron en la sección 3.3 de este documento.

Al realizar la primera parte de la optimización, es decir, la optimización del problema maestro, el optimizador arroja los resultados sobre cuales generadores se deben despachar para minimizar el costo de operación del SDE. El despacho de una unidad de generación fotovoltaica se hizo en función de dos aspectos fundamentales: la potencia máxima que puede entregar una unidad fotovoltaica y el costo variable de dicho generador. En la siguiente tabla se muestra los datos de los posibles generadores a ser instalados:

Tabla 24 Potencias nominales de GD-PF

	BUS	Pmax[kW]	CV [ctvs/kWh]
G1	31	5000	9
G2	1	128	3
G3	2	257	2.5
G4	3	224	5
G5	4	250	3
G6	5	195	2.5
G7	6	115	5
G8	7	147	3
G9	8	244	2.5
G10	9	101	5
G11	10	212	3
G12	11	219	2.5
G13	12	149	5
G14	13	245	3
G15	14	103	2.5
G16	15	125	5
G17	16	175	3
G18	17	230	2.5
G19	18	105	5
G20	19	228	3
G21	20	214	2.5
G22	21	148	5
G23	22	278	3
G24	23	281	2.5
G25	24	220	5
G26	25	218	3
G27	26	228	2.5
G28	27	248	5
G29	28	244	3
G30	29	130	2.5
G31	30	161	5

El optimizador arroja los resultados, que demuestran que se cumple los balances de potencia, al momento de realizar el FOP. También se observa que se han despachado algunas unidades de generación fotovoltaica, que el optimizador ha considerado necesario para poder minimizar el costo de operación del sistema, es así que se han activado en cada caso 5 unidades de

generación obteniendo como resultado la ubicación de la generación distribuida. De igual forma hace el despacho de cada una de estas unidades de generación para el periodo de 24 horas, con lo cual se cumple con el dimensionamiento de las unidades de generación de forma óptima. En las siguientes tablas se muestran los generadores que se activaron y la cantidad de potencia que despacha para cumplir las restricciones del modelo económico.

Tabla 25 Despacho de GD-PF en escenario 1

Generador	Pgen[MW]
G1	39.72
G3	1.40
G6	0.69
G9	1.34
G21	0.54
G27	1.34

Tabla 26 Despacho de GD-PF en escenario 2

Generador	Pgen[MW]
G1	40.08
G3	0.52
G9	1.35
G12	1.25
G21	0.54
G30	0.87

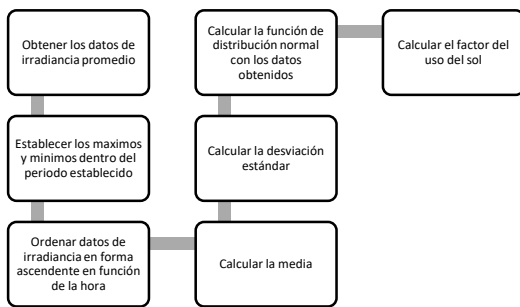
Tabla 27 Despacho de GD-PF en escenario 3

Generador	Pgen[kW]
G1	38.39
G2	0.88
G12	0.66
G21	1.27
G24	0.90
G27	1.38

Una vez obtenidos los resultados que arroja el optimizador es posible realizar el análisis si es posible satisfacer toda la demanda con la utilización de la generación fotovoltaica, ya que esta depende directamente de la irradiancia que se tenga sobre una determinada área.

Desde la tabla 27 a la tabla 32 se muestran los datos correspondientes al factor del uso del sol, el cuál fue calculado tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 9 Algoritmo de cálculo del factor del uso del sol



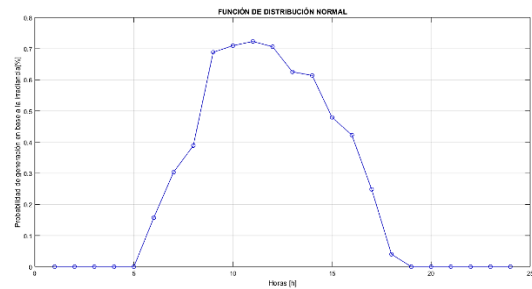
Siguiendo los pasos del algoritmo de solución, es posible obtener el factor del uso del sol con la siguiente ecuación:

$$FU_{fv} = F(x) * I \quad (4)$$

Donde: F(x) corresponde al valor de la función de distribución normal e I corresponde al valor de la irradiancia, ambos en el mismo periodo de tiempo. En las siguientes tablas se muestran los valores obtenidos al emplear la ecuación 4 para obtener el factor de uso del sol para cada uno de los posibles generadores en el periodo de 12 horas.

A partir de la tabla 11 que contiene los datos de irradiancia promedio de la zona

establecida, es posible obtener la función de distribución normal, tal y como se muestra en la figura 10.



Una vez establecida la función de distribución normal, en las siguientes tablas se muestra el calculo del factor del uso del sol para cada uno de los posibles generadores

Tabla 28 Factor del uso del sol G2 a G6

Hora	G2	G3	G4	G5	G6
h1	0	0	0	0	0
h2	0	0	0	0	0
h3	0	0	0	0	0
h4	0	0	0	0	0
h5	0	0	0	0	0
h6	0.010	0.011	0.011	0.0087	0.0102
h7	0.080	0.082	0.085	0.085	0.084
h8	0.100	0.104	0.106	0.011	0.0102
h9	0.200	0.208	0.214	0.202	0.2
h10	0.400	0.416	0.424	0.409	0.412
h11	0.700	0.721	0.735	0.712	0.715
h12	1.000	0.840	0.857	0.93	0.878
h13	0.800	1.000	1.000	0.846	0.8
h14	0.700	0.714	0.743	0.742	0.709
h15	0.500	0.525	0.546	0.515	0.542
h16	0.080	0.082	0.084	0.0829	0.0815
h17	0.050	0.052	0.054	0.0525	0.0507
h18	0.040	0.041	0.042	0.0423	0.04
h19	0	0	0	0	0
h20	0	0	0	0	0
h21	0	0	0	0	0
h22	0	0	0	0	0
h23	0	0	0	0	0
h24	0	0	0	0	0

Tabla 29 Factor del uso del sol G7 a G11

Hora	G7	G8	G9	G10	G11
h1	0	0	0	0	0
h2	0	0	0	0	0
h3	0	0	0	0	0
h4	0	0	0	0	0
h5	0	0	0	0	0
h6	0.008	0.011	0.0106	0.008	0.0117
h7	0.085	0.081	0.089	0.09	0.08
h8	0.01	0.010	0.01	0.0103	0.01
h9	0.21	0.202	0.214	0.211	0.208
h10	0.426	0.409	0.408	0.423	0.412
h11	0.73	0.724	0.727	0.714	0.706
h12	0.988	0.884	0.929	0.954	0.953
h13	0.811	0.851	0.843	0.884	0.973
h14	0.709	0.71	0.734	0.72	0.731
h15	0.504	0.542	0.512	0.542	0.504
h16	0.084	0.08	0.0829	0.0837	0.0837
h17	0.053	0.050	0.0544	0.0519	0.0529
h18	0.041	0.041	0.0407	0.041	0.0424
h19	0	0	0	0	0
h20	0	0	0	0	0
h21	0	0	0	0	0
h22	0	0	0	0	0
h23	0	0	0	0	0
h24	0	0	0	0	0

Tabla 30 Factor del uso del sol G12 a G16

Hora	G12	G13	G14	G15	G16
h1	0	0	0	0	0
h2	0	0	0	0	0
h3	0	0	0	0	0
h4	0	0	0	0	0
h5	0	0	0	0	0
h6	0.011	0.009	0.010	0.010	0.0108
h7	0.088	0.08	0.085	0.09	0.089
h8	0.01	0.010	0.01	0.011	0.011
h9	0.201	0.213	0.211	0.202	0.204
h10	0.418	0.416	0.421	0.424	0.421
h11	0.709	0.725	0.7	0.702	0.701
h12	0.892	0.934	0.906	0.986	0.998
h13	0.873	0.948	0.911	0.925	0.847
h14	0.725	0.723	0.746	0.704	0.73
h15	0.515	0.542	0.506	0.543	0.521
h16	0.084	0.080	0.083	0.080	0.0839
h17	0.050	0.052	0.054	0.053	0.0519
h18	0.041	0.041	0.040	0.041	0.0419
h19	0	0	0	0	0
h20	0	0	0	0	0
h21	0	0	0	0	0
h22	0	0	0	0	0
h23	0	0	0	0	0
h24	0	0	0	0	0

Tabla 31 Factor del uso del sol G17 a G21

Hora	G17	G18	G19	G20	G21
h1	0	0	0	0	0
h2	0	0	0	0	0
h3	0	0	0	0	0
h4	0	0	0	0	0
h5	0	0	0	0	0
h6	0.008	0.011	0.010	0.011	0.0112
h7	0.088	0.084	0.083	0.088	0.087
h8	0.010	0.010	0.010	0.010	0.0105
h9	0.204	0.211	0.215	0.208	0.207
h10	0.407	0.414	0.415	0.405	0.404
h11	0.727	0.716	0.727	0.726	0.711
h12	0.844	0.951	0.875	0.961	0.874
h13	0.807	0.959	0.982	0.942	0.824
h14	0.737	0.737	0.745	0.744	0.71
h15	0.503	0.525	0.529	0.519	0.524
h16	0.084	0.084	0.083	0.082	0.0842
h17	0.050	0.051	0.052	0.051	0.0536
h18	0.041	0.040	0.040	0.041	0.0423
h19	0	0	0	0	0
h20	0	0	0	0	0
h21	0	0	0	0	0
h22	0	0	0	0	0
h23	0	0	0	0	0
h24	0	0	0	0	0

Tabla 32 Factor del uso del sol G22 a G26

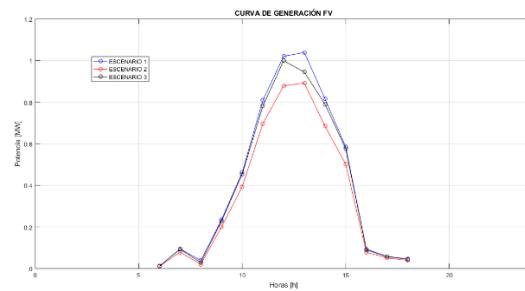
Hora	G22	G23	G24	G25	G26
h1	0	0	0	0	0
h2	0	0	0	0	0
h3	0	0	0	0	0
h4	0	0	0	0	0
h5	0	0	0	0	0
h6	0.0118	0.0084	0.011	0.01	0.009
h7	0.087	0.083	0.086	0.082	0.083
h8	0.0101	0.0105	0.011	0.010	0.01
h9	0.2	0.204	0.215	0.205	0.21
h10	0.415	0.412	0.426	0.407	0.415
h11	0.728	0.706	0.722	0.703	0.724
h12	0.989	0.984	0.971	0.885	0.946
h13	0.952	0.808	0.929	0.957	0.842
h14	0.712	0.703	0.715	0.732	0.73
h15	0.534	0.542	0.533	0.519	0.516
h16	0.0832	0.0839	0.083	0.083	0.084
h17	0.0513	0.0503	0.052	0.053	0.050
h18	0.0401	0.042	0.041	0.042	0.041
h19	0	0	0	0	0
h20	0	0	0	0	0
h21	0	0	0	0	0
h22	0	0	0	0	0
h23	0	0	0	0	0
h24	0	0	0	0	0

Tabla 33 Factor del uso del sol G27 a G30

Hora	G27	G28	G29	G30
h1	0	0	0	0
h2	0	0	0	0
h3	0	0	0	0
h4	0	0	0	0
h5	0	0	0	0
h6	0.0108	0.0082	0.0096	0.012
h7	0.089	0.085	0.086	0.081
h8	0.0106	0.0102	0.0108	0.0102
h9	0.215	0.212	0.204	0.203
h10	0.4	0.42	0.403	0.4
h11	0.719	0.724	0.738	0.726
h12	0.88	0.845	0.988	0.921
h13	0.953	0.964	0.826	0.809
h14	0.732	0.743	0.722	0.717
h15	0.52	0.513	0.508	0.519
h16	0.082	0.0843	0.0807	0.0831
h17	0.051	0.0538	0.0522	0.0531
h18	0.0405	0.0422	0.042	0.041
h19	0	0	0	0
h20	0	0	0	0
h21	0	0	0	0
h22	0	0	0	0
h23	0	0	0	0
h24	0	0	0	0

Una vez conocido el factor del uso del sol, se constató que el despacho establecido por el optimizador en el problema maestro, satisface la demanda de la red de distribución para el periodo de tiempo con la implementación de sistemas de generación fotovoltaicos. En la siguiente figura se muestra el despacho de las unidades fotovoltaicas para cada uno de los escenarios generados:

Figura 10 Despacho de GD-PF



Con el despacho realizado, es posible resolver el subproblema para optimización y minimizar del costo de operación del SDE. Para lograr encontrar este óptimo, es necesario correr un FOP al sistema de distribución generado, cuyas características se detallaron en secciones anteriores.

Una vez analizado todo el sistema y sus resultados, una vez que se haya encontrado el óptimo dimensionamiento y la óptima ubicación de generación fotovoltaica, es necesario contrastar dos resultados: el primero es el abastecimiento de la demanda de la zona con la inclusión de generación fotovoltaica y el segundo consiste en verificar que el optimizador encontró el óptimo valor de operación para el SDE que se ha generado aleatoriamente y que depende de los datos solares obtenidos a través de NASA POWER.

En tabla 34 se observa los valores de demanda y generación, tanto de la red como de las unidades de generación fotovoltaica, con lo que se afirma que se realizó el abastecimiento de la demanda.

Tabla 34 Abastecimiento de la demanda para cada escenario generado

HORA	DemE1[MW]	GEN_FV[MW]	GEN_RED[MW]	DemE2[MW]	GEN_FV[MW]	GEN_RE[MW]	DemE3[MW]	GEN_FV[MW]	GEN_RED[MW]
h1	1.62	0.00	1.62	1.60	0.00	1.60	1.56	0.00	1.56
h2	1.53	0.00	1.53	1.51	0.00	2.14	1.47	0.00	1.47
h3	1.47	0.00	1.47	1.46	0.00	1.46	1.42	0.00	1.42
h4	1.46	0.00	1.46	1.45	0.00	1.45	1.41	0.00	1.41
h5	1.48	0.00	1.48	1.46	0.00	1.46	1.43	0.00	1.43
h6	1.56	0.01	1.55	1.54	0.01	1.53	1.50	0.01	1.49
h7	1.63	0.09	1.54	1.62	0.08	1.54	1.58	0.09	1.48
h8	1.63	0.04	1.59	1.61	0.02	1.59	1.57	0.03	1.54
h9	1.76	0.23	1.53	1.74	0.20	1.54	1.70	0.23	1.47
h10	1.91	0.46	1.45	1.89	0.39	1.50	1.85	0.45	1.39
h11	2.00	0.81	1.19	1.98	0.70	1.28	1.93	0.78	1.15
h12	2.06	1.02	1.04	2.04	0.88	1.16	1.99	1.00	0.99
h13	2.06	1.04	1.02	2.04	0.89	1.15	1.99	0.94	1.05
h14	2.02	0.82	1.21	2.00	0.68	1.32	1.95	0.79	1.16
h15	2.06	0.58	1.48	2.04	0.50	1.54	1.99	0.58	1.42
h16	2.08	0.09	1.99	2.06	0.08	1.98	2.01	0.09	1.92
h17	2.08	0.06	2.02	2.06	0.05	2.01	2.01	0.06	1.95
h18	2.02	0.05	1.97	2.00	0.04	1.96	1.95	0.05	1.90
h19	2.16	0.00	2.16	2.14	0.00	2.14	2.08	0.00	2.08
h20	2.30	0.00	2.30	2.28	0.00	2.28	2.22	0.00	2.22
h21	2.25	0.00	2.25	2.23	0.00	2.23	2.17	0.00	2.17
h22	2.12	0.00	2.12	2.10	0.00	2.10	2.05	0.00	2.05
h23	1.97	0.00	1.97	1.95	0.00	1.95	1.90	0.00	1.90
h24	1.81	0.00	1.81	1.79	0.00	1.79	1.74	0.00	1.74

[Figura 11 Abastecimiento de la demanda con la inclusión de generación FV en el escenario 1

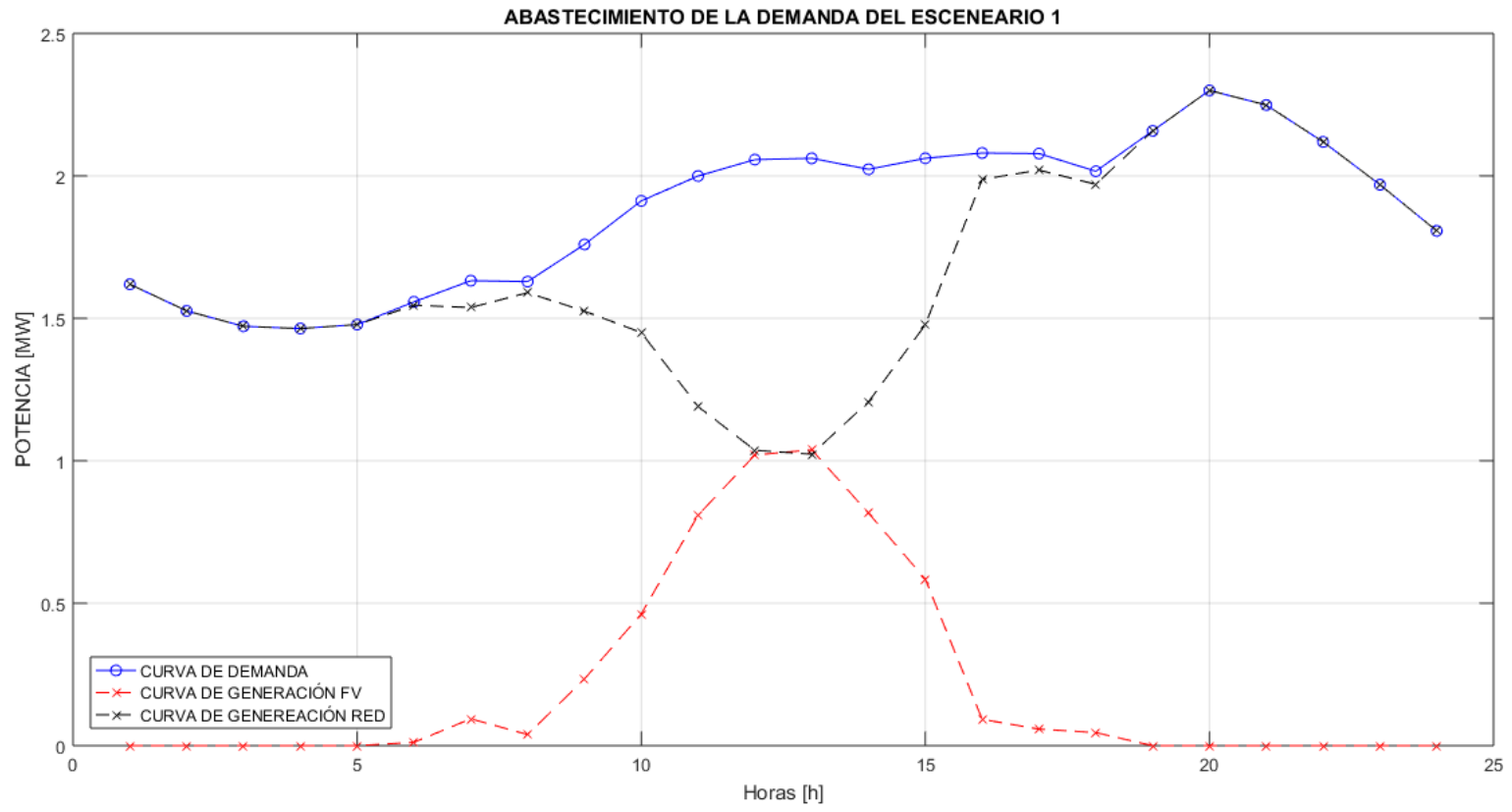


Figura 12 Abastecimiento de la demanda con la inclusión de generación FV en el escenario 2

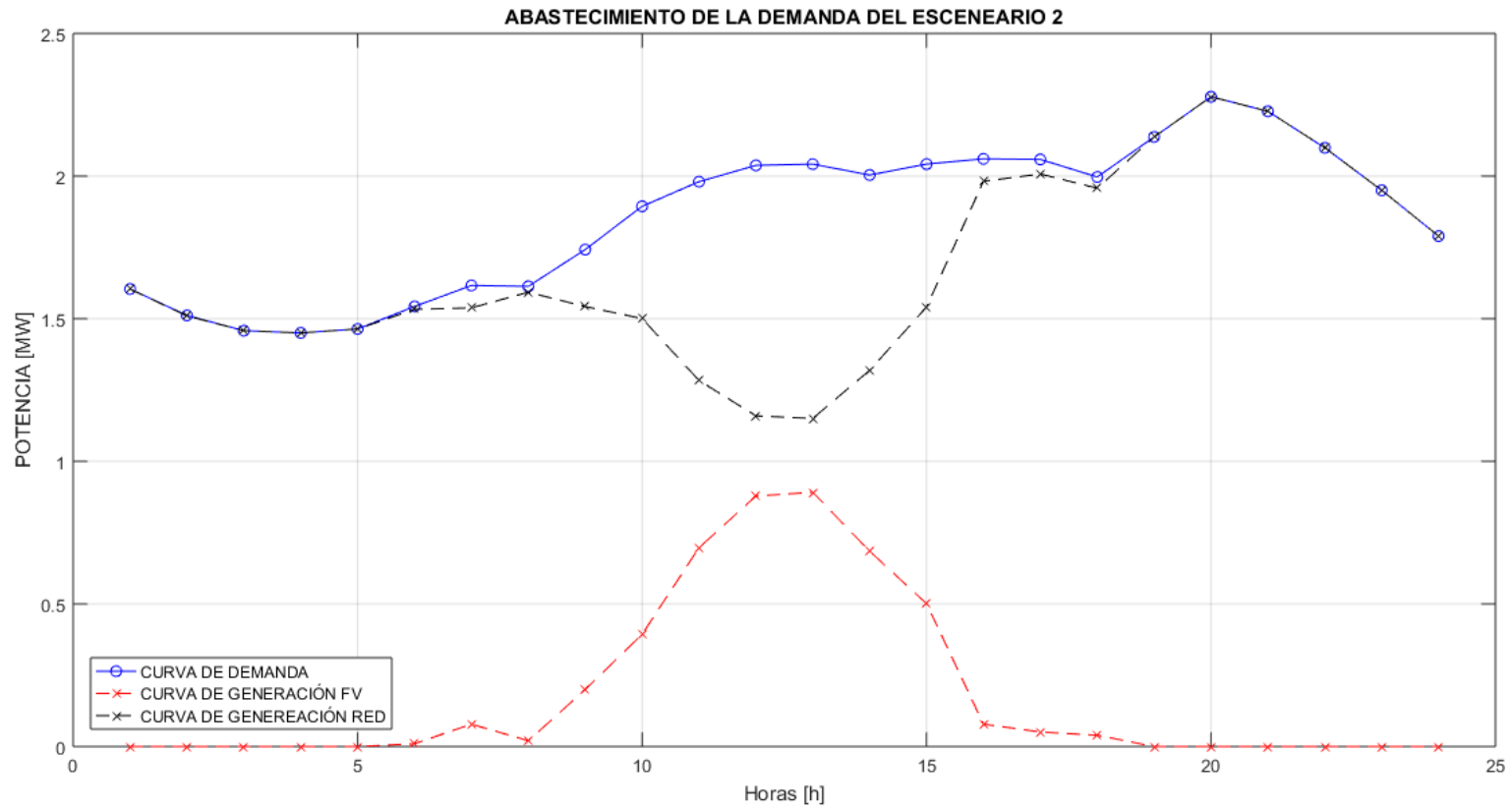
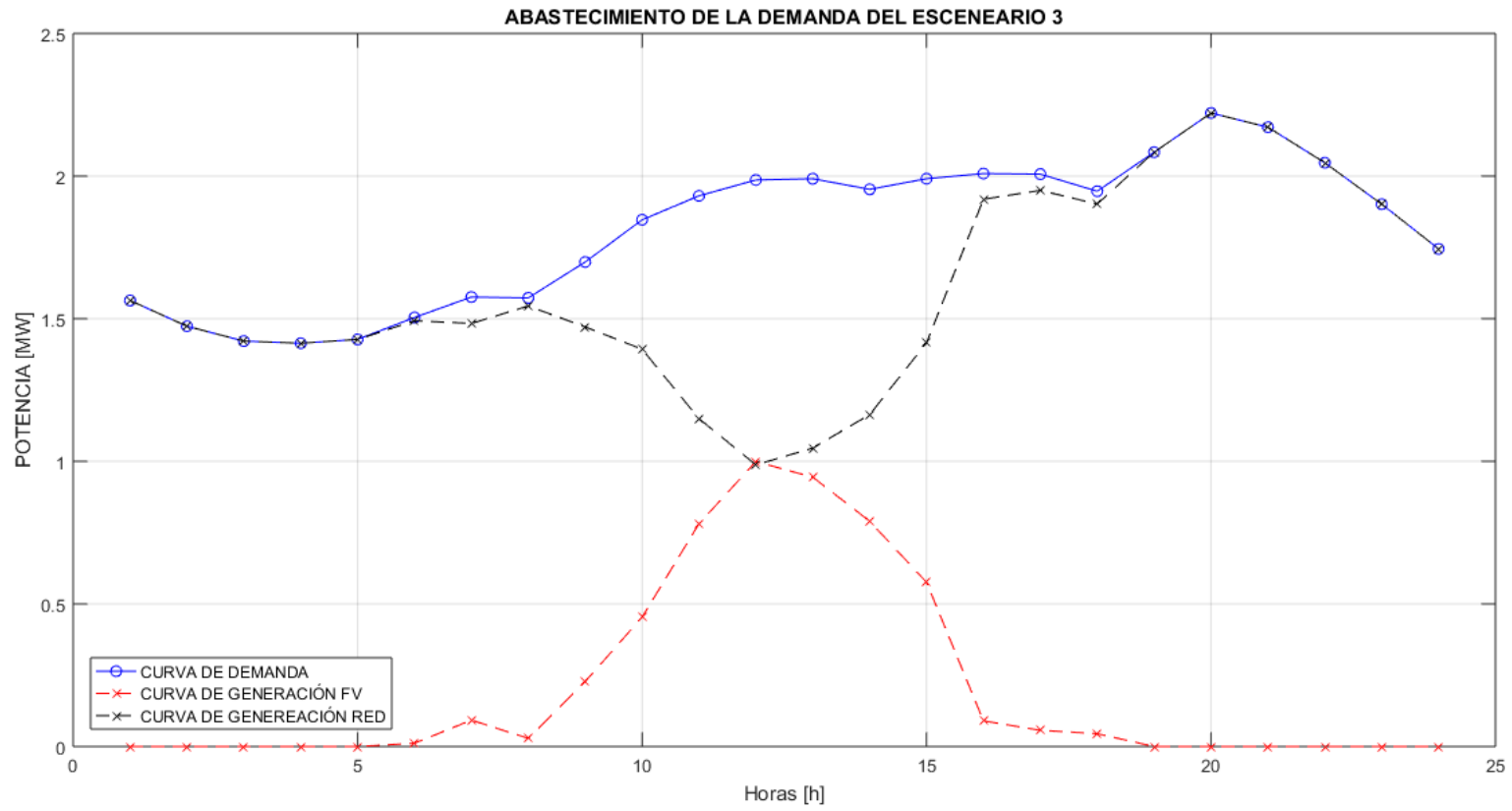


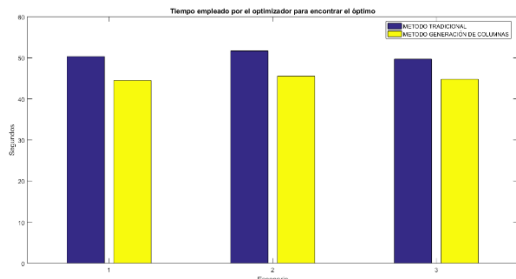
Figura 13 Abastecimiento de la demanda con la inclusión de generación FV en el escenario 3



La diferencia entre el simulador y el optimizador es mínima, siendo esta diferencia menor al 0.2% entre ambos por lo que podemos validar que el optimizador está realizando de forma correcta el FOP. Una vez analizadas las características de cada SDE.

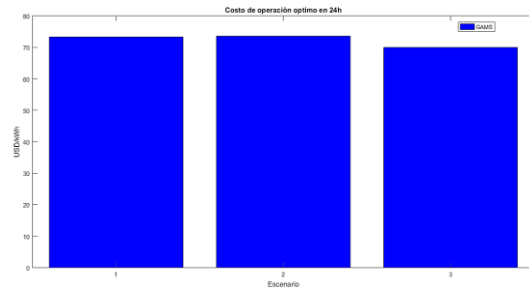
Es importante conocer cuánto tiempo el optimizador se demoró en encontrar la solución, ya que el método de generación de columnas es un método de solución que implica menos uso de recursos computacionales, lo que se traduce en una disminución considerable en el tiempo para encontrar una respuesta. En la siguiente figura se muestra el tiempo que emplea cada escenario generado para encontrar el mínimo costo de operación y su comparación con el método tradicional de optimización.

Figura 14 Tiempo empleado por el optimizador para hallar la solución



El costo de operación del SDE. si se decide operar con las unidades de generación fotovoltaica que sugiere el optimizador se muestra en la siguiente figura con una comparativa de los costos obtenidos para cada uno de los escenarios generados.

Figura 15 Costo óptimo de operación del SDE



5. Conclusiones

La micro generación distribuida es una de las posibles soluciones para satisfacer las necesidades, tanto del sistema de distribución eléctrica, como del sistema de transmisión, ya que permite la minimización de pérdidas y de costos de generación. Todos estos sistemas se encuentran ligados directamente a la generación centralizada.

El método de generación de columnas es una variación al modelo de Dantzig Wolfe, se abre como una posibilidad factible para encontrar una respuesta óptima a un problema en el que se encuentren un número alto de variables y de ecuaciones. El uso de los modelos tradicionales resulta en una cantidad mayor de iteraciones para encontrar la solución al problema.

El método de generación de columnas reduce el tiempo computacional que se necesita para encontrar un óptimo resultado a un modelo matemático específico, ya que el tiempo de solución se ve reducido, gracias a la creación de subproblemas para hallar la solución al problema maestro. Este método sirvió mucho para esta investigación.

El optimizador entrega resultados lo más cercanos a los simuladores, con un error menor al 0,2% lo que resulta muy útil para optimizar tiempos de trabajo, además que es posible realizar el análisis

de un SDE y la optimización del mismo, bajo el mismo código de programación y dentro del mismo software.

Cada uno de los escenarios creados de forma aleatoria resultaron ser sistemas casi perfectos, ya que se tuvo una cantidad mínima de pérdidas; a pesar de lo mencionado, el optimizador encuentra la forma de resolver los problemas de pérdidas, además de encontrar la mejor forma de despachar energía al sistema, en base a cada costo de operación que posee un generador.

En algunos casos, la potencia despachada resulta ser mayor a la cantidad de potencia necesaria para satisfacer la demanda del sistema, por lo que es una prueba, que el optimizador encontró la solución óptima y ha cumplido con cada una de las restricciones que se encontraban dentro del modelo matemático establecido.

El factor de uso corresponde a un valor establecido basado en la irradiancia promedio de la zona de estudio, por lo que al multiplicar este, por la potencia de generación, se obtiene el valor sobre el cual la generación fotovoltaica debe producir energía para satisfacer cierta demanda.

Los sistemas de generación distribuida que se implementan con tecnología fotovoltaica, deben tener un estudio tanto técnico como climático, ya que el sol es la fuente principal de producción y es parte fundamental para el análisis y cálculos dentro de este documento.

El periodo de análisis tomado para investigación es de 24 horas, por lo que los datos en cuanto al factor del uso del sol, son tomados y calculados a forma de probabilidad, ya que para un estudio con datos reales se debe tener un espectro de

tiempo de análisis de por lo menos 6 meses.

El costo de operación del sistema de distribución eléctrica, con la inclusión de la generación fotovoltaica, se expresa en unidades de dólares americanos, con la consideración que el análisis de todos los escenarios generados de forma aleatoria se los ha hecho en un tiempo corto (una hora) por lo que el modelo es funcional en su totalidad en ese periodo de tiempo.

5.1 Investigaciones futuras.

Este documento sirve como base para futuras investigación de pre grado, por lo que se recomienda lo siguiente: Mejorar el escenario generado de forma aleatoria con el uso de un enrutamiento de vías aéreas, lo que nos permitirá tener una idea real de cómo está la red de distribución eléctrica dentro de un espacio específico y de esta forma obtener medidas exactas, en caso de poder ocupar dicho escenario en una investigación con fines comerciales y en casos de estudios reales.

Realizar un estudio a profundidad de la irradiación promedio de la zona con distintos tipos de paneles fotovoltaicos, para observar el impacto económico y técnico que podrían tener estos al incorporarse a la red de distribución eléctrica con la ayuda de un estudio de respuesta de generación fotovoltaica frente a cada uno de los escenarios generados, considerando el mes y las condiciones climatológicas que pueden existir en ese periodo de tiempo.

Ampliar el espectro de tiempo de análisis para encontrar el óptimo dimensionamiento y ubicación, ya que en el presente documento se realizó todo el estudio para un periodo de tiempo de 24 horas de funcionamiento, por lo que se recomienda obtener datos de demanda

en un periodo superior para establecer cuál sería el costo total anual de operación de una red de distribución con la inclusión de generación fotovoltaica.

6. Referencias

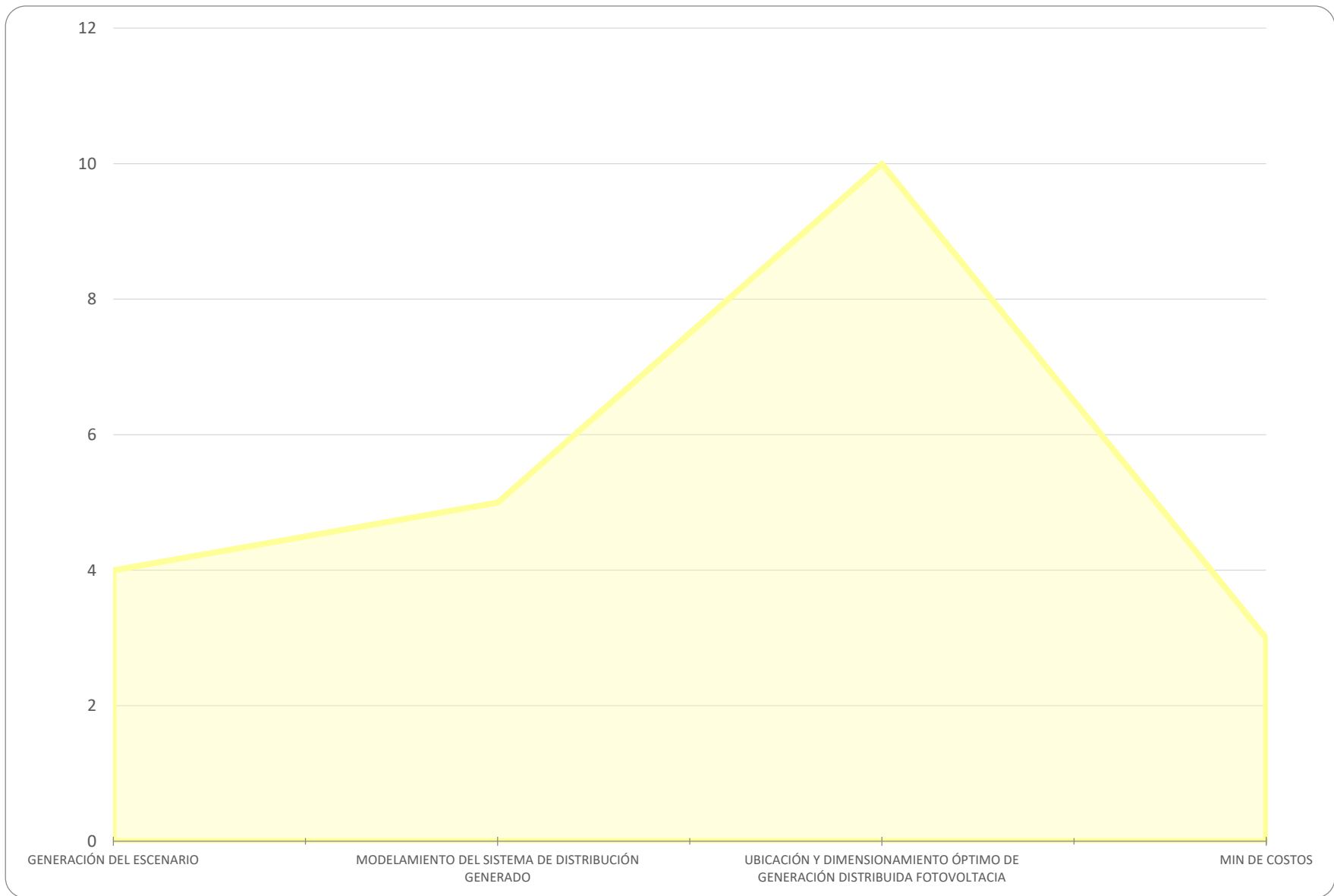
- [1] C. Vasquez, “Óptima ubicación de fuentes de Generación Distribuida basado en el perfil de tensión en sistemas de distribución eléctrica,” 2016.
- [2] G. Celli and F. Pilo, “Optimal distributed generation allocation in MV distribution networks,” 2001.
- [3] A. Dukeyro, “Ubicación óptima de generación distribuida en sistemas eléctricos de distribución basado en costos de operación,” 2017.
- [4] P. Sánchez and P. Linares, “Modelos matemáticos de optimización,” 2010.
- [5] R. Viral and D. K. Khatod, “Optimal planning of distributed generation systems in distribution system : A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 5146–5165, 2012.
- [6] V. Hengsritawat, T. Tayjasant, and N. Nimpitiwan, “Electrical Power and Energy Systems Optimal sizing of photovoltaic distributed generators in a distribution system with consideration of solar radiation and harmonic distortion,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 39, no. 1, pp. 36–47, 2012.
- [7] F. Katiraei, “Solar PV Integration Challenges,” p. 10, 2011.
- [8] A. Flores-quiroy, R. Palma-behnke, G. Zakeri, and R. Moreno, “A column generation approach for solving generation expansion planning problems with high renewable energy penetration,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 136, pp. 232–241, 2016.
- [9] M. M. A. Salama, “Distributed generation technologies , definitions and benefits,” vol. 71, no. August 2002, pp. 119–128, 2004.
- [10] L. Ioan, M. Abrudean, and D. Bic, “Distributed generation technologies and optimization,” vol. 12, pp. 687–692, 2014.
- [11] A. Padilha, L. Alfonso, and G. Pareja, “Ubicación óptima de generación distribuida en sistemas de energía eléctrica,” pp. 9–23, 2009.
- [12] E. Lora Silva and J. Haddad, *Planificación de la expansión de sistemas de distribución vía algoritmos genéticos.* 2006.
- [13] I. Pereda, “Celdas fotovoltaicas en generacion distribuida,” 2005.
- [14] T. Ackermann, “Distributed generation : a definition,” vol. 57, pp. 195–204, 2001.
- [15] C. Wilmer, “Ubicación óptima de generación distribuida en el sistema de distribución,” pp. 1–23, 2017.
- [16] E. Caamaño *et al.*, “Interaction Between Photovoltaic Distributed Generation and Electricity Networks,” 2008.
- [17] R. A. Shayani, S. Member, M. Aurélio, G. De Oliveira, and S. Member, “Photovoltaic Generation Penetration Limits in Radial Distribution Systems,” 2011.
- [18] L. F. Grisales, “Ubicación y dimensionamiento de generación distribuida : una revisión

- Location and sizing of distributed generation : a review *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*,” 2017.
- [19] M. M. Chuqui Quinteros, “Análisis de generación distribuida en hogares y edificaciones,” 2014.
- [20] C. L. Smallwood, “Análisis de generación distribuida en hogares y edificaciones,” 2002.
- [21] N. Chauhan, “Distributed Generation : Definition , Technology , Impact & Issues due to penetration,” no. September, 2014.
- [22] J. M. Pearce, “Expanding photovoltaic penetration with residential distributed generation from hybrid solar photovoltaic and combined heat and power systems,” *Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 1947–1954, 2009.
- [23] P. S. Georgilakis, S. Member, and N. D. Hatziargyriou, “in Power Distribution Networks : Models , Methods , and Future Research,” pp. 1–9, 2012.
- [24] M. Kumawat, “Optimal Distributed Generation Placement in Power Distributed Networks: A Review,” 2015.
- [25] J. Rojas, “Descomposición para problemas de programación lineal multi - divisionales,” 2012.
- [26] P. Rey and R. Weber, “Descomposición de Dantzig Wolfe,” 2004.
- [27] S. Freire, “Planeación óptima de una red de distribución eléctrica usando dantzig-wolfe,” 2019.
- [28] M. Using and D. Wolfe, “Hierarchical Demand Response for Peak Decomposition,” 2015.
- [29] C. Ade, D. Ouelhadj, D. Jones, M. Stålhane, and I. Bakken, “Optimisation of maintenance routing and scheduling for offshore wind farms,” Elsevier B.V., 2016.
- [30] G. B. Dantzig and P. Wolfe, “Decomposition Principle for Linear Programs,” no. October 2014, 1960.
- [31] L. Lasdon, *Optimization theory for large systems*. 2002.
- [32] G. Desaulniers, J. Desrosiers, and M. Solomon, *Column generation*. 2005.

7. Estado del arte

ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO Y UBICACIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA EN UNA MICRORED GEOREFERENCIADA UTILIZANDO GENERACIÓN DE COLUMNAS																			
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	PAÍS	CITAS	TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA			
					ENERGIAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES PARA GENERACIÓN DISTRIBUIDA	GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	OPTIMIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	GENERACIÓN DEL ESCENARIO	MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN GENERADO	UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA	MIN DE COSTOS	DESPECHO EN BASE AL FACTOR DEL USO DEL SOL	RESTRICCIÓN DE ABASTECIMIENTO DE LA DEMANDA	RESTRICCIÓN DE BALANCE DE POTENCIA	RESTRICCIÓN DE NIVELES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE VOLTAJE	ALGORITMO DE DIJKSTRA	ALGORITMO DE KMEANS	MÉTODO DE GENERACIÓN DE COLUMNAS	MODELO DE DANTZIG WOLFE
1	2016	Óptima ubicación de fuentes de Generación Distribuida basado en el perfil de tensión en sistemas de distribución eléctrica	Ecuador	11	X	X	X	X		X		X	X	X				X	X

2	2001	Optimal distributed generation allocation in MV distribution networks	Italia	12	X	X	X			X										X	
3	2017	Ubicación óptima de generación distribuida en sistemas eléctricos de distribución basado en costos de operación	Ecuador	9	X	X	X		X	X	X		X	X	X					X	X
4	2010	Modelos matemáticos de optimización	España	2				X	X			X			X	X	X				
5	2012	Optimal planning of distributed generation systems in distribution system	India	295		X	X			X										X	
6	2012	Optimal sizing of photovoltaic distributed generators in a distribution system with consideration of solar radiation harmonic distortion	Tailandia	126	X	X	X			X		X	X							X	
7	2011	Solar PV integration challenges	USA	112	X			X			X									X	
8	2016	A column generation approach for solving generation expansion planning problems with high renewable energy penetration	UK	203	X		X			X	X						X	X			
9	2014	Distributed generation technologies , definitions and benefits	Canada	156	X					X										X	X
10	2013	Distributed generation technologies and optimization	Romania	31	X															X	X
11	2009	Ubicación óptima de generación distribuida en sistemas de energía eléctrica	Colombia	13		X			X					X						X	X
12	1999	Planificación de la expansión de sistemas de distribución vía algoritmos genéticos	Chile	587						X											
13	2005	Celdas fotovoltaicas en generacion distribuida	Chile	19	X			X			X										
14	2000	Distributed generation : a definition	Suiza	13		X															
15	2017	Ubicación óptima de generación distribuida en el sistema de distribución	Ecuador	5		X	X		X	X	X									X	X
16	2008	Interaction Between Photovoltaic Distributed Generation and Electricity Networks	Alemania	16	X	X		X													
17	2011	Photovoltaic Generation Penetration Limits in Radial Distribution Systems	USA	1076	X	X				X											
18	2017	Ubicación y dimensionamiento de generación distribuida : una revisión	Colombia			X				X											
19	2014	Análisis de generación distribuida en hogares y edificaciones	Ecuador	13		X															
20	2002	Distributed generation in autonomous and Non-Autonomous Micro Grids	USA	2025		X															
21	2013	Distributed Generation : Definition , Technology , Impact & Issues due to penetration	India	235	X																
22	2009	Expanding photovoltaic penetration with residential distributed generation from hybrid solar photovoltaic and combined heat and power systems	Canada	420	X																



**ENERGIAS RENOVABLES NO
CONVENCIONALES PARA
GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

