

**DIMENSIONAMIENTO DE UNA SOLUCIÓN DE GENERACIÓN Y  
ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA ABASTECER LA DEMANDA  
ELÉCTRICA EN UNA RED AISLADA**

**KAREN JOHANA ANGARITA SUAREZ  
MARCELA CECILIA PABÓN PACHÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2018**

**DIMENSIONAMIENTO DE UNA SOLUCIÓN DE GENERACIÓN Y  
ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA ABASTECER LA DEMANDA  
ELÉCTRICA EN UNA RED AISLADA**

**KAREN JOHANA ANGARITA SUAREZ  
MARCELA CECILIA PABÓN PACHÓN**

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

**Director**

**JAVIER ENRIQUE SOLANO MARTÍNEZ  
DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Codirector**

**JUAN CARLOS OVIEDO CEPEDA  
DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2018**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por permitirme cumplir este sueño.

A mis padres Betty Pachón y Manuel Pabón por su esfuerzo todos estos años.

A mis hermanos Manuel Pabón y Cristian Amado por qué sin ellos nada de esto sería posible, este logro es de ustedes, Gracias.

A mi familia por su compañía en este proceso.

A mis amigas, Aleja, Maryi, Yuya, Xioma y Jessi por hacer de estos años los más maravillosos

A mis amigos Sergio, Sebastián, Brayan, Jorge y Julián por su infinita paciencia y su incondicional amistad, gracias por los momentos compartidos.

A Jesús y Karen por hacerme parte de su familia.

A todos los que batallamos juntos en este largo e incierto camino.

Gracias por estar ahí

**MARCELA**

A Dios, por sus bendiciones, amor y misericordia.

A mis padres María Isabel Suarez y Alirio Angarita, por ser ejemplo, motor y base de toda mi vida, por alentarme cuando lo necesite y motivarme a ser mejor cada día; por amarme de manera incondicional y confiar en mí sin dudar.

A mi hermano Edwin Angarita Suarez, por ser la persona que me motivo a entrar a la Universidad Industrial De Santander y por creer en mí.

A mi novio Jesús García, por ser la persona incondicional que me apoyo, aconsejo y colaboro en cada uno de los momentos difíciles de este largo camino.

Adicionalmente quiero agradecer al PhD. Javier Solano y al PhD(C) Juan Carlos Oviedo por su apoyo en el desarrollo de este trabajo de grado.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis amigos que de una u otra forma me acompañaron en este proceso, a la Universidad Industrial De Santander y a todos los docentes que hicieron parte de mi formación profesional

**KAREN**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	14
1. INFORMACIÓN PRELIMINAR.....	16
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3. METODOLOGÍA .....	18
3.1 CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS EN LA ZONA.....	19
3.2 CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO .....	19
3.2.1. Energía Solar .....	20
3.2.2 Energía Eólica.....	21
3.3. ANÁLISIS DE LA POSIBLE UTILIZACIÓN DE GENERADOR DIESEL. ....	23
3.4. SELECCIÓN DE FUENTES VIABLES Y ESTIMACIÓN DE COSTOS RENOVABLES Y CONVENCIONALES.....	23
3.5. SELECCIÓN DEL SISTEMA CON EL MIX ENERGÉTICO DE GENERACIÓN ÓPTIMO.....	26
3.5.1. Simulación de posibles configuraciones para el sistema .....	26
3.5.2. Optimización del sistema .....	27
3.5.3 Análisis de Sensibilidad .....	28
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	29
4.1. IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	30
4.2. PERFIL DE CARGA DIARIO .....	30

4.3. POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA ZONA.....	32
4.4 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS SELECCIONADOS .....	35
4.4.1 Especificaciones del panel fotovoltaico.....	35
4.4.2 Especificaciones de la turbina eólica .....	36
4.4.3 Especificaciones de la batería .....	37
4.4.4 Especificaciones del generador diésel.....	38
4.4.5 Especificaciones del convertidor.....	38
4.5 SIMULACIÓN Y RESULTADOS.....	38
4.5.1. Análisis comparativo entre fuentes de información meteorológica .....	39
4.5.2 Análisis comparativo entre los diversos mix energéticos propuestos. ....	41
4.5.3 Solución de generación y almacenamiento seleccionada.....	44
4.5.4 Análisis de sensibilidad.....	48
5. CONCLUSIONES .....	51
BIBLIOGRAFÍA .....	53

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema de metodología aplicada.....	18
Figura 2. Irradiación global horizontal medio diario anual.....	21
Figura 3. Velocidad del viento de máxima energía (m/s).....	22
Figura 4. Perfil de carga en la zona seleccionada. ....	31
Figura 5. Perfil de carga anual en la zona seleccionada.....	32
Figura 6. Radiación Solar presente en la zona .....	33
Figura 7. Velocidad del viento presente en la zona .....	34
Figura 8. Índice de temperatura presentes en la zona.....	35
Figura 9. Flujo de caja del proyecto .....	43
Figura 10. Potencia de salida por hora del sistema híbrido de generación.....	44
Figura 11. Sumatoria del sistema de generación.....	46
Figura 12. Costo total neto presente.....	49

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Especificaciones técnicas de modulo fotovoltaico. ....	36
Tabla 2. Especificaciones técnicas de turbina eólica. ....	36
Tabla 3. Especificaciones técnicas de la batería. ....	37
Tabla 4. Resultados estación MÁLAGA vs NASA.....	39
Tabla 5. Resultados de posibles combinaciones de generación. ....	41
Tabla 6. Resumen de costos del proyecto. ....	47
Tabla 7. Porcentajes de variación del costo total neto presente.....	50

## LISTA DE ANEXOS

Los Anexos relacionados a continuación se encuentran adjuntos en la base de datos de la Universidad.

**ANEXO A** Simulación de comparación entre estaciones meteorológicas

**ANEXO B.** Reporte técnico-económico de generación para solución energética, con Panel fotovoltaico, turbina eólica y generador diésel.

**ANEXO C.** Reporte técnico-económico de generación para solución energética, con Panel fotovoltaico y generador diésel.

**ANEXO D** Reporte técnico-económico de generación para solución energética, con turbina eólica y generador diésel.

**ANEXO E** Reporte técnico-económico de generación para solución energética, con Panel fotovoltaico y turbina eólica

**ANEXO F** Reporte técnico-económico de generación para solución energética, con Panel fotovoltaico.

**ANEXO G.** Dimensionamiento de generación para solución energética, con Panel fotovoltaico, turbina eólica y generador diésel.

**ANEXO H.** Dimensionamiento de generación para solución energética, con Panel fotovoltaico y generador diésel.

**ANEXO I.** Dimensionamiento de generación para solución energética, con turbina eólica y generador diésel.

**ANEXO J.** Dimensionamiento de generación para solución energética, con Panel fotovoltaico y turbina eólica

**ANEXO K.** Dimensionamiento de generación para solución energética, con Panel fotovoltaico.

## RESUMEN

**TÍTULO:** DIMENSIONAMIENTO DE UNA SOLUCIÓN DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA ABASTECER LA DEMANDA ELÉCTRICA EN UNA RED AISLADA\*

**AUTORES:** KAREN JOHANA ANGARITA SUAREZ\*\*  
MARCELA CECILIA PABÓN PACHÓN

**PALABRAS CLAVES:** Energía URE, Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL), software HOMER PRO, estación meteorológica, microrred

### DESCRIPCIÓN

Este trabajo de grado desarrollado en con el software de simulación HOMER PRO<sup>1</sup>, tiene como objetivo la identificación de una solución de generación y almacenamiento de energía por medio de la instalación de una microrred para una comunidad aislada.

El propósito del actual proyecto es contribuir a fortalecer la línea de investigación del uso racional de la energía URE y energías alternativas desarrollada por el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) adscrito a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicación (E3T), de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Para el desarrollo del proyecto se tomó como base una metodología enfocada en la optimización de recursos energéticos en zonas aisladas, la cual abarca desde la identificación de necesidades energéticas, hasta el mix energético óptimo según los recursos primarios encontrados en la zona.

Las posibles combinaciones para la generación y almacenamiento de energía fueron simuladas en el software HOMER PRO y analizadas con el criterio del costo nivelado de la energía (COE). La solución presentada en el proyecto es la solución óptima encontrada con el software de simulación para la cual fue realizado su respectivo análisis de sensibilidad. La cuantificación y caracterización del potencial energético de la zona fue realizada empleando los datos climáticos de dos estaciones meteorológicas diferentes. La comparación de la capacidad instalada cuando es considerada la fuente de datos de la estación meteorológica de Málaga o la estación meteorológica de la NASA permitió comprobar que no existe una diferencia significativa en los resultados.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Javier Enrique Solano Martínez, Doctor en Ingeniería Eléctrica. Codirector: Juan Carlos Oviedo Cepeda. Doctor en Ingeniería Eléctrica

<sup>1</sup> Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources

## ABSTRACT

**TITLE:** SIZING OF AN ENERGY GENERATION AND STORAGE SOLUTION TO SUPPLY THE ELECTRICAL DEMAND IN AN ISOLATED NETWORK\*

**AUTHORS:** KAREN JOHANA ANGARITA SUAREZ\*\*  
MARCELA CECILIA PABÓN PACHÓN

**KEYWORDS:** URE Energy, Electric Power Systems (GISEL), HOMER PRO software, weather station, microgrid

### DESCRIPTION

This degree work, developed with the HOMER PRO simulation software, aims to identify an energy generation and storage solution through the installation of a microgrid for an isolated community.

The purpose of the current project is to contribute to strengthen the line of research on the rational use of energy URE and alternative energy developed by the Research Group in Electric Power Systems (GISEL) attached to the School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering (E3T), from the Industrial University of Santander (UIS).

For the development of the project was based on a methodology focused on the optimization of energy resources in isolated areas, which ranges from the identification of energy needs, to the optimal energy mix according to the primary resources found in the area. The possible combinations for the generation and storage of energy were simulated in the HOMER PRO software and analyzed with the criterion of the level of energy cost (COE). The solution presented in the project is the optimal solution found with the simulation software for which a sensitivity analysis was also carried out. The quantification and characterization of the energy potential of the area was carried out using the climatic data of two different meteorological stations. The comparison of the installed capacity when it is considered the data source of the meteorological station of Malaga or the meteorological station of NASA allowed to verify that there is no significant difference in the results

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering. Director: Javier Enrique Solano Martínez, PhD in Electrical Engineering. Co-director: Juan Carlos Oviedo Cepeda. Doctor in Electrical Engineering

## INTRODUCCIÓN

La electrificación rural es aún un desafío para diferentes regiones geográficas y gobiernos alrededor del mundo. Más de un billón de personas principalmente ubicadas en el sub-Sahara africano y en la parte sur de Asia aún no tiene acceso a energía eléctrica<sup>2</sup>. El séptimo objetivo de desarrollo sostenible presentado por la Organización de las Naciones Unidas desea lograr una cobertura global del servicio de energía eléctrica para el 2030. Sin embargo, considerando la velocidad de avance actual de los procesos de energización rural aún faltarían alrededor de 0.6 billones de personas por conectar a los servicios básicos de energía eléctrica en el 2030<sup>3</sup>.

Por supuesto Colombia no es ajena a esta problemática. Alrededor del 4% de la población aún no tiene ninguna clase de acceso a la energía eléctrica y alrededor del 0.5% de la población necesita una solución alternativa puesto que no es factible extender la red eléctrica hasta las ubicaciones geográficas remotas de las comunidades<sup>4</sup>. Esta problemática también se ha visto afectada por los fuertes conflictos internos que se han presentado en el país. Muchas de estas zonas que aún no cuentan con acceso a energía eléctrica son zonas que fueron azotadas por la violencia en las últimas décadas. El difícil acceso a estas zonas y la reducida población hacen necesario considerar la opción de instalar soluciones alternativas como la implementación de microrredes aisladas.

---

<sup>2</sup> WILLIAMS, N. J., JARAMILLO, P., TANEJA, J., & USTUN, T. S. Enabling private sector investment in microgrid-based rural electrification in developing countries: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 2015. 1268–1281. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.153>

<sup>3</sup> WORLD BANK. Tracking SDG7: the Energy Progress Report. 2018. Disponible en: [http://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/tracking\\_sdg7-the\\_energy\\_progress\\_report\\_full\\_report.pdf](http://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/tracking_sdg7-the_energy_progress_report_full_report.pdf)

<sup>4</sup> UPME. Plan Indicativo De Expansión De Cobertura De Energía Eléctrica 2013-2017. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Considerando este contexto, el grupo de investigación GISEL presenta un proyecto a la convocatoria 782 dirigida por Colciencias. El objetivo del proyecto es facilitar el intercambio de investigadores colombianos y franceses para fortalecer la capacidad investigativa y aportar una visión internacional a las soluciones planteadas para ayudar a resolver esta problemática en Colombia. El proyecto llamado: "Generación, almacenamiento y distribución de energía eléctrica a partir de fuentes renovables en regiones aisladas o en redes con baja confiabilidad y su aplicación para el desarrollo de zonas de postconflicto en Colombia" fue elaborado y actualmente se encuentra en ejecución.

El presente proyecto de grado se realiza como una de las investigaciones que ayudarán a contribuir al desarrollo del mencionado proyecto. Seleccionando una zona rural del municipio de Málaga se pretende dimensionar una microrred aislada que tenga completa autonomía para abastecer la demanda eléctrica de la comunidad. Para cumplir con este objetivo se empleó el software HOMER PRO, el cual permite encontrar la solución óptima de generación tomando en cuenta los recursos primarios disponibles en la zona. Adicionalmente se realizaron análisis de sensibilidad sobre la mejor alternativa encontrada para anticipar los posibles efectos negativos de variaciones sobre las suposiciones realizadas.

El resto del documento es organizado de la siguiente manera: El capítulo 1 presenta la introducción del problema. El capítulo 2 presenta el planteamiento del problema y los objetivos que se desean lograr. El capítulo 3 describe la metodología que se implementó para el desarrollo del proyecto. El capítulo 4 presenta los resultados de las simulaciones con su respectivo análisis y finalmente el capítulo 5 presenta los aspectos más relevantes y las lecciones aprendidas durante el desarrollo del proyecto.

# 1. INFORMACIÓN PRELIMINAR

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema que se desea resolver es el del dimensionamiento de una solución energética para una comunidad aislada. La solución energética considerada es la instalación de una microrred que pueda brindar cobertura del servicio eléctrico durante todo el día. Para el dimensionamiento de la microrred se hace necesario conocer la demanda eléctrica de la comunidad y la disponibilidad de recursos energéticos primarios en la zona.

La metodología presentada en el capítulo tres fue seleccionada para realizar el dimensionamiento de la solución de generación y almacenamiento de energía. Suministrando la demanda eléctrica de la comunidad y la disponibilidad de recursos en la zona de Málaga al software HOMER PRO, se estimó la capacidad necesaria a instalar para abastecer la demanda eléctrica de la comunidad.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

El objetivo principal del trabajo de investigación es implementar una metodología para el dimensionado de las fuentes de generación y almacenamiento de energía para abastecer la demanda eléctrica en una red aislada.

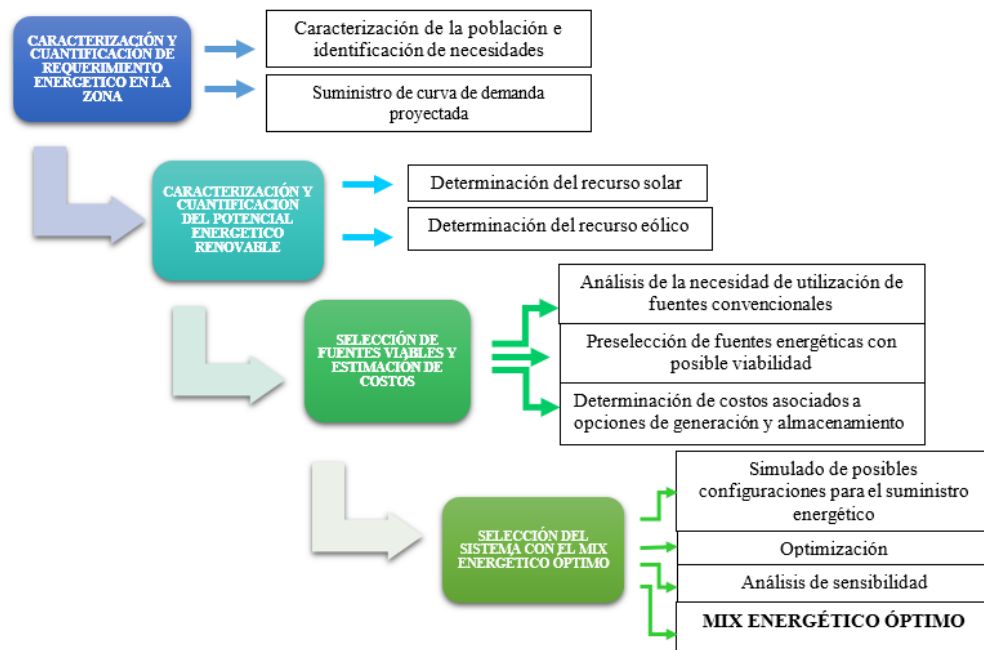
### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar la disponibilidad de recursos primarios para la generación de energía en la zona a estudiar.
- Basados en el perfil de consumo suministrado, proponer una solución de generación y almacenamiento de energía (tipo de fuentes y dimensionado) para abastecer la demanda eléctrica.
- Evaluar la solución utilizando el software HOMER PRO, bajo el criterio del costo nivelado de la energía

### 3. METODOLOGÍA

La metodología seleccionada para el dimensionado de generación y almacenamiento de energía consta de cinco partes: 1). Caracterización y cuantificación de requerimientos energéticos en la zona, 2). Caracterización y cuantificación del potencial energético. 3). Análisis de la posible utilización de generador diésel. 4). Selección de fuentes viables y estimación de costos renovables y convencionales. 5). Selección del sistema con el mix energético de generación óptimo<sup>5</sup>. Un esquema representativo de esta metodología es presentado en la figura 1.

**Figura 1. Esquema de metodología aplicada**



Fuente: Ingeniería, F. D. E., El, U., & Atp, P. Departamento de Ingeniería Eléctrica. 2012. Modificado por autor.

<sup>5</sup> INGENIERÍA, F. D. E., El, U., & Atp, P. Departamento de Ingeniería Eléctrica. 2012

A continuación, se procederá a dar una descripción mucho más detallada de cada uno de los aspectos que componen la metodología.

### **3.1 CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS EN LA ZONA**

Contar con un conocimiento general de la zona debe ser el punto inicial de cualquier tipo de planificación o diseño de soluciones energéticas para una red aislada. En algunas ocasiones, se cuenta con suficiente información para definir las características geográficas, económicas y sociales de la población, así como el detalle de las viviendas y necesidades energéticas. En otros casos es necesario hacer un levantamiento, clasificación y estudio de información, para obtener la caracterización de la población a beneficiar, de tal forma que sea posible conocer las necesidades energéticas que permitan construir la curva de carga estimada, siendo esta el pilar para la planificación y diseño de la solución energética.

### **3.2 CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO**

Es necesario analizar los diferentes recursos energéticos presentes en la zona de influencia, con el fin de descartar las tecnologías de generación que no puedan ser viables para su implementación y posteriormente elegir las que mejor aprovechen el potencial energético disponible.

Inicialmente, se obtuvieron datos de referencia de algunas organizaciones encargadas de recolectar información meteorológica y climatológica, tales como: IDEAM, UPME y NASA. De las cuales se obtienen datos de irradiación solar,

velocidad del viento, temperatura y caudal hídrico de estaciones meteorológicas ubicadas en cercanías a la zona de estudio. Una vez obtenidos los datos se realizan diferentes simulaciones en el software HOMER PRO para seleccionar los posibles tipos de fuentes de energía que mejor se ajustan al potencial energético existente.

No obstante, para disminuir el margen de error a la hora de seleccionar las características de las tecnologías de generación, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos por la NASA y los datos suministrados por la estación meteorológica Málaga, actualmente activa en la zona y propiedad de la Universidad Industrial de Santander.<sup>6</sup> Con lo anterior, se estudia la diferencia entre utilizar estas dos fuentes de información con respecto a los costos y potencial energético.

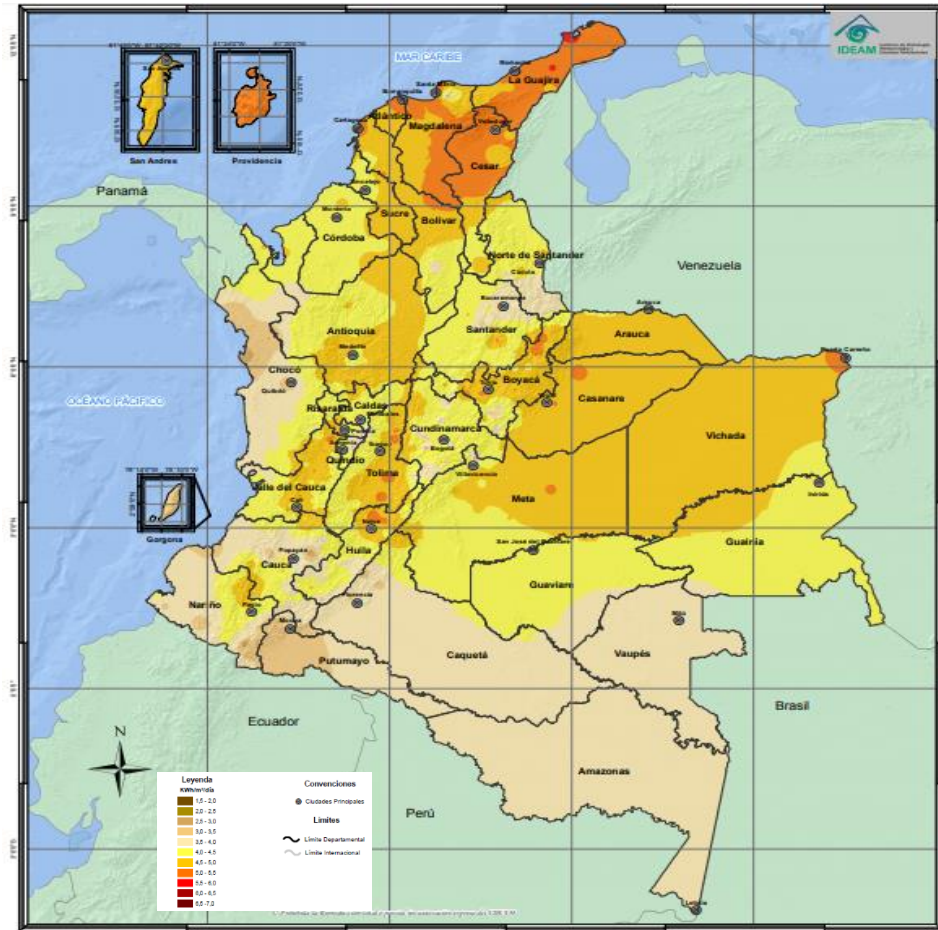
**3.2.1. Energía Solar.** El recurso solar se determina de acuerdo a la irradiación solar recibida a nivel del suelo, la cual tiene una potencia promedio de 1 kW por cada metro cuadrado de terreno plano, la cantidad de energía solar que incide en el sistema fotovoltaico (FV) diariamente, se mide en kilovatios-hora [*kWh*] por cada metro cuadrado durante un día, dependiendo así del número de horas que brilla el sol.

Dado que la irradiación solar es de 1 [*kW/m<sup>2</sup>*], para los cálculos se define el termino de Horas de Sol Pico (HSP), correspondiente al número de horas al día equivalentes si se contase con dicho potencial máximo de 1 [*kW/m<sup>2</sup>*] en el lugar, por lo que dependerá en gran medida por condiciones climáticas y nubosidad del sitio, en la Figura 2 se aprecia el potencial de radiación solar presente en Colombia, esta se encuentra entre los 4 – 4,5 [*kW/m<sup>2</sup>/d*]. La energía generada por el sistema FV para satisfacer cierta demanda (*E<sub>d</sub>*), en [*kWh/d*] dependerá también de las eficiencias de los sistemas de inversión de corriente, así como la eficiencia de almacenamiento y suministro del banco de baterías que se requiere.

---

<sup>6</sup> INGENIERÍA, F. D. E., El, U., & Atp, P. Op. Cit.

**Figura 2. Irradiación global horizontal medio diario anual.**



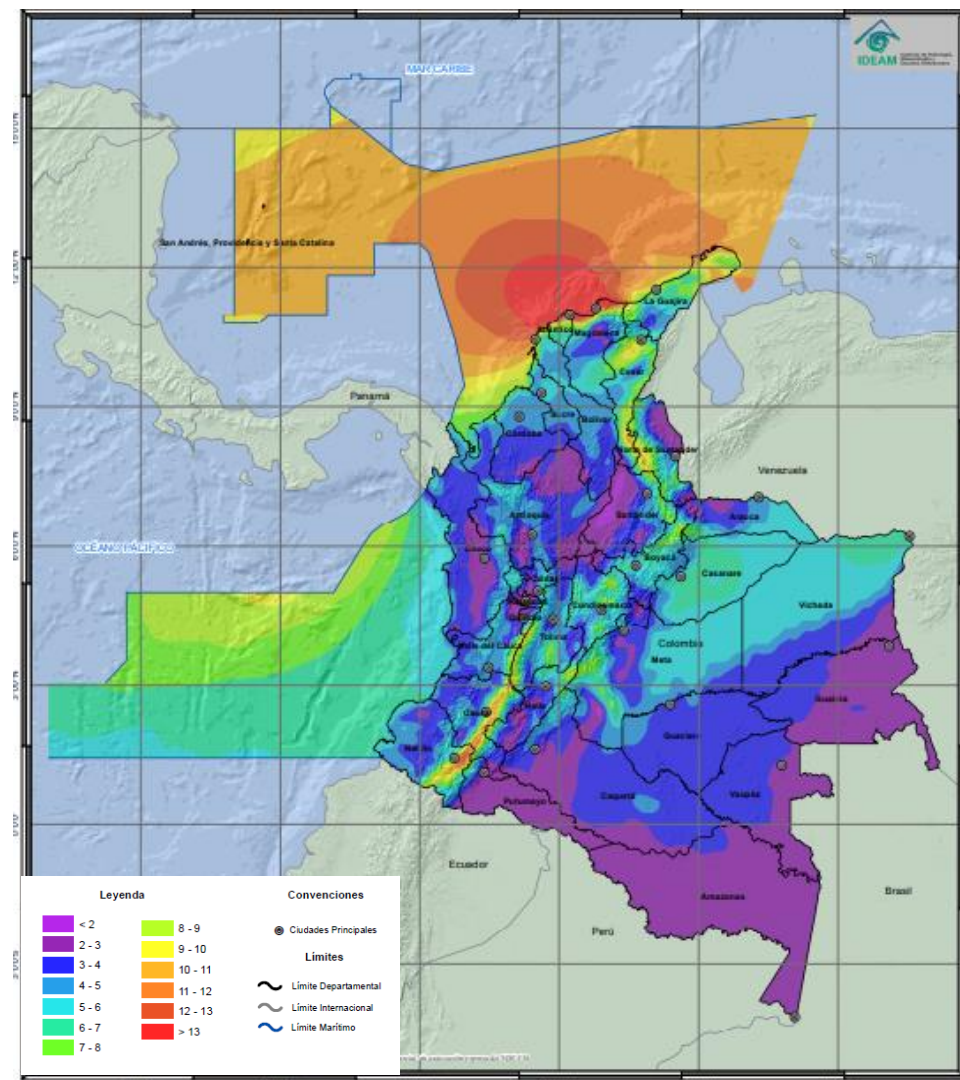
Fuente: Atlas de Radiación Solar de Colombia. IDEAM Gobierno de la República de Colombia. Atlas Interactivo – IDEAM. 2014

**3.2.2 Energía Eólica.** El recurso eólico se produce a partir del movimiento de la masa del aire y su aprovechamiento depende fuertemente de la velocidad del viento en sitio, su potencial lo determina la capacidad de la turbina del aerogenerador, compuesta de las aspas acopladas a un rotor que mueve el generador, para convertir la energía cinética del viento en electricidad.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> GONZÁLES, Y. Electrificación sostenible de zonas interconectadas del pacífico Colombiano, por medio de Clusters prototipo de sistemas híbridos solar-eólico-híbridos-diesel optimizados con HOMER PRO. 2016

En la Figura 3 se observa el potencial de energía eólica presente en Colombia medido en velocidad del viento, en la zona se aprecia una velocidad del viento entre los 3 – 4  $[m/s]$ . Los valores exactos tanto para la energía solar como para la energía eólica se deben constatar con las estaciones meteorológicas instaladas en la zona de estudio.

**Figura 3. Velocidad del viento de máxima energía (m/s).**



Fuente: Atlas de Radiación Solar de Colombia. IDEAM Gobierno de la República de Colombia. (2014). Atlas Interactivo - IDEAM

### **3.3. ANÁLISIS DE LA POSIBLE UTILIZACIÓN DE GENERADOR DIESEL.**

Desde el punto de vista medioambiental lo ideal es obtener un sistema de generación que cuente únicamente con energías renovables. Sin embargo, pasando al campo técnico-económico, merece mencionar que dependiendo de los recursos naturales con que se cuente para tal fin y recordando que las fuentes son en su mayor parte intermitentes, suele ser necesario considerar energías convencionales para que el mix energético ofrezca estabilidad y calidad de energía, así como viabilidad económica. El elemento más común a considerar en este tipo de mix energético es el generador diésel, gracias a su eficiencia, sus costos asociados y su estabilidad en generación, así como la respuesta para el control de frecuencia.

Por lo tanto, se deberá considerar la posibilidad de usar generadores gracias a su fácil adquisición, transporte y utilización, considerando costos asociados, facilidad de conseguir y transportar el combustible a la zona de estudio, planteando posibles escenarios en la conformación del mix energético.

### **3.4. SELECCIÓN DE FUENTES VIABLES Y ESTIMACIÓN DE COSTOS RENOVABLES Y CONVENCIONALES.**

Es importante elaborar un listado de las fuentes energéticas viables encontradas, preferiblemente ordenadas según la viabilidad observada, dando prioridad a las energías renovables y en un segundo plano a las energías convencionales.

Para determinar la combinación más viable en el mix energético, será necesario definir los costos asociados a cada una de las fuentes consideradas, así como los posibles sistemas de almacenamiento. Considerando los siguientes tipos de costos:

- **Costos de Implementación:** Son todos los costos en los que se incurrirá para la adquisición, montaje y puesta en marcha del sistema de generación.
- **Costos de Operación:** Son los costos asociados a la operación del sistema, en general serán costos de combustibles y costos de mantenimiento.
- **Costos de Sustitución:** Son los costos que implica la sustitución de un elemento de generación energética una vez ha cumplido su vida útil.

Es conveniente definir los parámetros que implementa HOMER PRO para realizar la optimización técnico-económica. Entre los cuales se encuentran:

- El costo actual neto total (NPC) de un sistema de energía consiste en los valores actuales de todos los costos incurridos y los ingresos obtenidos a lo largo de la vida del sistema. En este estudio, se consideran los costos de capital, reemplazo y (O&M).

HOMER PRO usa la siguiente ecuación para calcular el NPC total:

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i,R_{proj})} \quad (1)$$

donde,

$C_{ann,tot}$ , es el costo total anualizado (\$/año).

$CRF$ , es el factor de recuperación de capital.

$i$ , es la tasa de interés real (%).

$R_{proj}$ , la vida útil del proyecto por año. En las simulaciones, la vida del proyecto se toma como 25 años.

- El factor de recuperación de capital es una relación utilizada para calcular el valor actual de una anualidad (una serie de flujos de efectivo anuales iguales). La ecuación para el factor de recuperación de capital es:

$$CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (2)$$

donde,

N, es el número de años.

- La ecuación de la tasa de interés real utilizada por HOMER PRO para calcular los factores de descuento y convertir entre los costos de una sola vez y los costos anualizados se pueden encontrar con la siguiente ecuación:

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (3)$$

donde,

$i$ , es la tasa de interés real.

$i'$ , es la tasa de descuento nominal.

$f$ , es la tasa de inflación esperada.

- El costo de energía nivelado (COE) significa el costo promedio por [kWh] para producir energía eléctrica útil por un sistema. HOMER PRO calcula COE con la siguiente

ecuación:

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{prim} + E_{def} + E_{grid,sales}} \quad (4)$$

donde,

$C_{ann,tot}$  , es el costo total anualizado [\$/año]

$E_{prim}$  , es la carga principal servida [kWh/año ]

$E_{grid,sales}$  , representa las ventas totales de la red (kWh/año), que en este caso son nulas debido a que es una red aislada. <sup>8</sup>

### **3.5. SELECCIÓN DEL SISTEMA CON EL MIX ENERGÉTICO DE GENERACIÓN ÓPTIMO.**

El procedimiento para llegar a este mix energético óptimo consiste en:

- Conocer la respuesta técnico-económica de diferentes configuraciones generación y almacenamiento de las unidades, que se han preseleccionado para aprovechar las fuentes de mayor potencial energético en la zona.
- Identificar las óptimas.
- Seleccionar un escenario que cumpla con los requerimientos de la curva de demanda de energía, que sea el más económico y viable.

Para poder conseguirlo, se debe aplicar los procesos de simulación, optimización y el respectivo análisis de sensibilidad.

**3.5.1. Simulación de posibles configuraciones para el sistema.** Para el dimensionamiento de los elementos de generación se toma como punto de partida un sondeo de mercado para la selección de una serie de unidades de generación y almacenamiento según las referencias comerciales, para cada una de las fuentes

---

<sup>8</sup> DUMAN, A. C., & GÜLER, Ö. Techno-economic analysis of off-grid PV/wind/fuel cell hybrid system combinations with a comparison of regularly and seasonally occupied households. *Sustainable Cities and Society*, 42(May), 2018. 107–126. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.029>

energéticas preseleccionadas, tanto renovables como convencionales, considerando que estas unidades deben suplir solas o combinadas el total de la carga.

Una vez seleccionadas las posibles dimensiones de las unidades de producción y almacenamiento, se plantea el proceso de operación y despacho de la microrred, se procede a la simulación, la cual determina una configuración particular del sistema, es decir una combinación de unidades de tamaños específicos, y una estrategia de operación que defina la interacción de estos componentes.

Los propósitos esenciales del proceso de simulación son: determinar que configuraciones son técnicamente viables, tales corresponderán a las que puedan suplir la demanda y por ultimo estimar el costo de ciclo de vida del proyecto, este es el resultante de instalar y operar el sistema durante el tiempo de vida del proyecto.

**3.5.2. Optimización del sistema.** En la optimización se busca encontrar cuál de estas configuraciones es la adecuada, de esta manera es un análisis depurado que considera las configuraciones viables técnicamente, esto involucra decidir sobre el mix de componentes que el sistema podría contener, el tamaño o cantidad de cada uno, con la estrategia de despacho que el sistema pueda adoptar.

Para la realización de este diseño se considera el aspecto económico realizado mediante la minimización del costo del proyecto durante su tiempo de vida, es decir del Costo Nivelado de la Energía.

Con respecto a las energías renovables y no renovables tienen diferentes características respecto al costo. Las fuentes renovables presentan altos costos de capital inicial y bajos costos de operación, mientras las fuentes no renovables presentan un bajo capital inicial y alto costo de operación. En el proceso se debe

considerar comparar los aspectos económicos de un amplio rango de configuraciones de sistema, teniendo en cuenta tanto costos de capital como los de operación.

Otra forma de evaluar la configuración óptima es mediante el Costo Nivelado de Energía (LCE), este corresponde al costo medio por kilovatio hora de electricidad producido por el sistema. Es decir, es el cociente entre el costo total del sistema dividido entre la energía total producida.

**3.5.3 Análisis de Sensibilidad.** Dado que el escenario analizado puede variar, debido a consideraciones como el precio del combustible, la radiación solar, las tasas de interés entre otras, es necesario realizar un análisis de sensibilidad que consiste en efectuar varios procesos de optimización, modificando los valores de las variables sensibles de tal manera que se puede determinar que configuración de unidades es óptima bajo cada condición, de esta manera se controla la incertidumbre y se reduce el riesgo en el proyecto.

En primera instancia, se deben identificar las variables sensibles, es decir sobre las cuales se tenga mayor incertidumbre y que por lo tanto puedan desviar sus valores, una vez identificadas las variables, se plantea el rango en el cual se puedan modificar su costo, para realizar comparaciones y definir el sistema óptimo para cada combinación de variables y finalmente se procede a analizar el diagrama de sensibilidad que compara las soluciones optimas, para diferentes valores de las variables.

Así, el fin principal del análisis de sensibilidad es permitir determinar que tecnologías o combinaciones de tecnologías son óptimas bajo diferentes condiciones.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> INGENIERÍA, F. D. E., El, U., & Atp, P. Op. Cit.

## 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo serán presentados los resultados de la simulación realizada con el software HOMER PRO. Para facilitar la presentación de los resultados se han dividido en cinco secciones diferentes. La primera sección muestra las fuentes de información consultadas, a fin de identificar la región para la cual se desarrolló el dimensionamiento de la microrred. La segunda sección muestra la curva promedio de carga diaria característica y la variación promedio mensual de la región seleccionada para realizar el proyecto. La tercera sección presenta el potencial energético de recursos primarios presentes en la zona de estudio. Adicionalmente es presentado un análisis de las diferencias encontradas entre los datos suministrados por la NASA y por una estación meteorológica de propiedad de la Universidad Industrial de Santander, la cual se encuentra controlada y monitoreada por el ingeniero Rony Alexander Ortiz Aponte e instalada en Málaga Santander y posee las siguientes coordenadas:

Latitud: 06° 43,72'N

Longitud: 72° 46,48'W

Altitud: 2200 msnm

La cuarta sección presenta los equipos seleccionados como suministro para el software HOMER PRO con el cual se encontrará la capacidad a instalar. Finalmente, la quinta sección presenta los resultados de las simulaciones realizadas con el software HOMER PRO para la búsqueda de la capacidad instalada óptima.

#### **4.1. IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

Para la identificación de la zona de estudio, se obtiene información sobre la proyección de la demanda en investigaciones consultadas tales como:<sup>10, 11, 12</sup> para este caso en particular como lo muestra en los objetivos el desarrollar un perfil de carga diario no se encuentra en el alcance de este proyecto, ya que este es suministrado por el grupo de investigación GISEL. Dicho perfil suministrado corresponde a la demanda de 100 usuarios ubicados en MALAGA- SANTANDER.

#### **4.2. PERFIL DE CARGA DIARIO**

La Figura 4 describe el comportamiento de la demanda de 100 usuarios ubicados en la zona de estudio. Este perfil se obtiene como se explica en la sección 3.1.

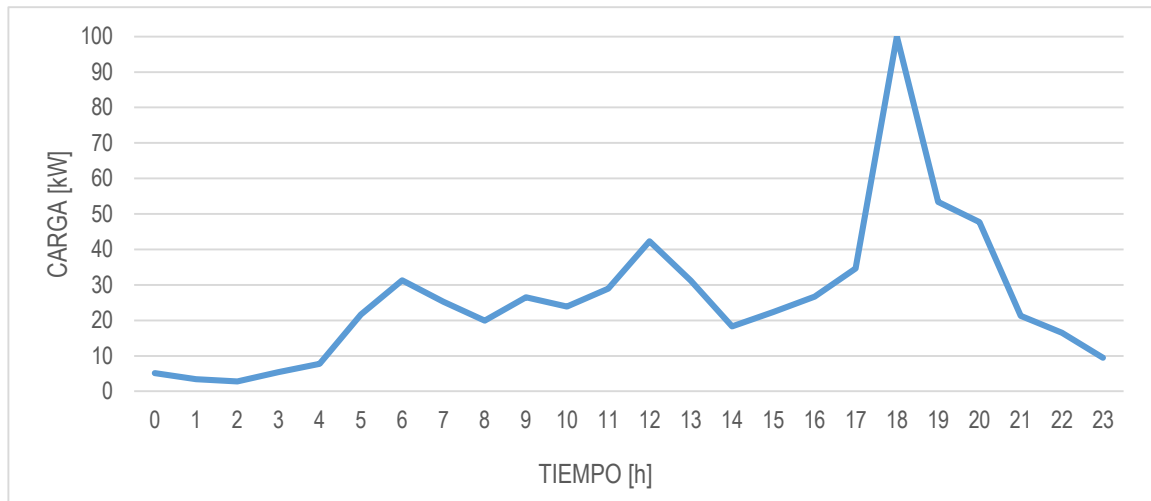
---

<sup>10</sup> BALLESTEROS ALTUVE, Andrea. Energías no convencionales, una tarea pendiente. 2018

<sup>11</sup> DUMAN, & GÜLER, Io. Cit.

<sup>12</sup> GONZÁLES, Op. Cit.

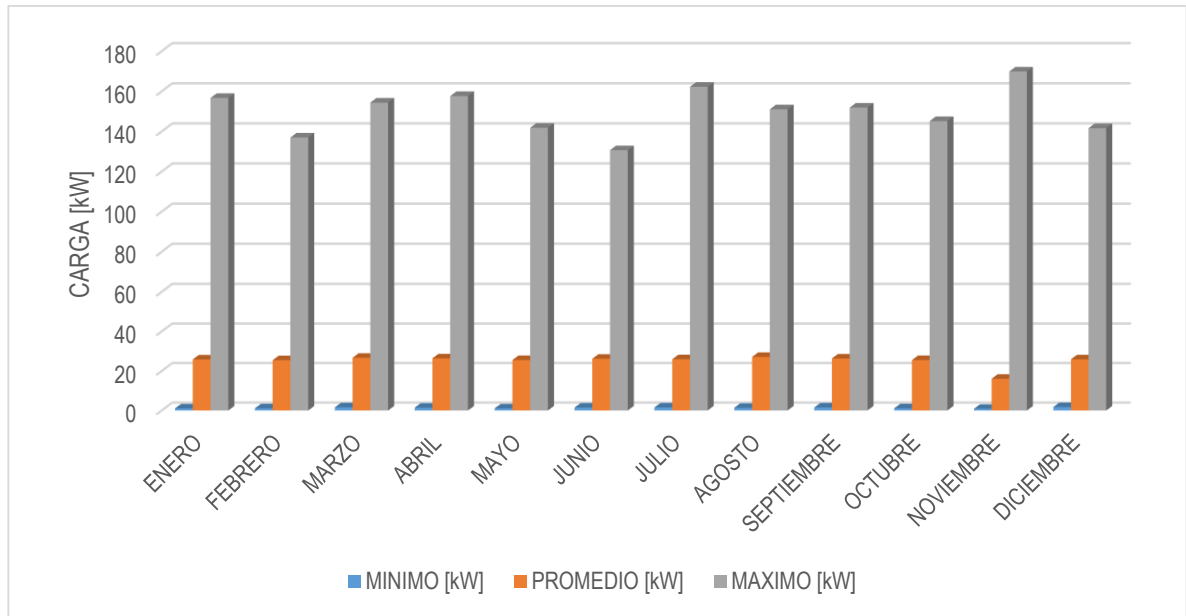
**Figura 4. Perfil de carga en la zona seleccionada.**



En la Figura 5 se presentan los valores de demanda anual, los cuales son obtenidos por medio de HOMER PRO, que basado en los datos de entrada (demanda diaria en kW hora a hora), genera datos sintéticos a lo largo de un año.

Para cada mes, las barras grises corresponden al máximo general del respectivo mes. Las barras azules corresponden al mínimo general. Finalmente, las barras naranjas corresponden al promedio general para todo el mes.

**Figura 5. Perfil de carga anual en la zona seleccionada.**



### 4.3. POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA ZONA

El método de obtención de la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre se ha basado tradicionalmente en la utilización de piranómetros distribuidos sobre la misma, el cual extiende el espectro de la radiación solar entre 300 y 2800 [nm], esto significa que cubre el espectro con una sensibilidad lo más plana posible.<sup>13</sup>

Para medir una radiación solar se requiere que la respuesta al flujo de radiación varíe con el coseno de ángulos de incidencia, por ejemplo: cuando el flujo incide perpendicularmente sobre el sensor a 0° la respuesta es máxima, la respuesta es nula cuando el sol está en el horizonte a 90°, o tendrá valores intermedios cuando el ángulo de incidencia esta entre los anteriores.<sup>14</sup>

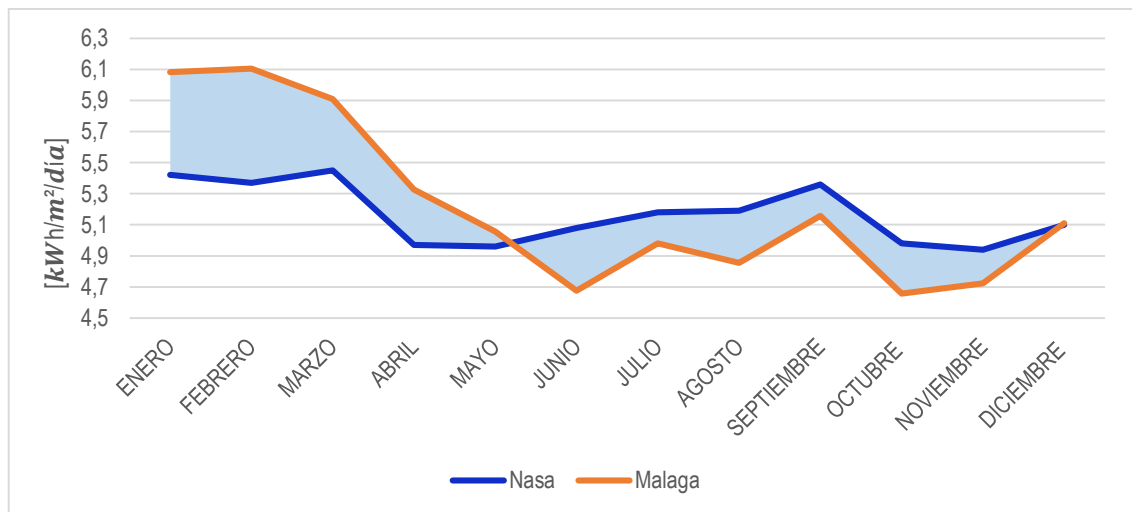
<sup>13</sup> ZARCO, P. J., ARIZA, F., & LÓPEZ, R. Métodos de obtención de la radiación solar mediante teledetección: órbita polar vs órbita geoestacionaria. Espacio y Desarrollo, No. 8, 1996. 33–73

<sup>14</sup> Ibid.

A partir de lo anterior, se obtienen datos hora – hora, los cuales permiten conocer el nivel de radiación solar presente en la zona en un día, necesarios para obtener el promedio de radiación mensual, dicho promedio se realiza para las estaciones meteorológicas de Málaga y NASA.

Por otra para, de acuerdo con los datos consultados de radiación solar presente en la zona de influencia, se observa que la estación meteorológica instalada en Málaga suministra durante 5 meses del año valores mayores con respecto a la NASA. Sin embargo, este intervalo de tiempo no es suficiente para que la diferencia sea relevante ya que el área bajo la curva de las dos graficas en estudio difiere en tan solo 0,3 [kWh/m<sup>2</sup>/día] por unidad de tiempo. Ver Figura 6.

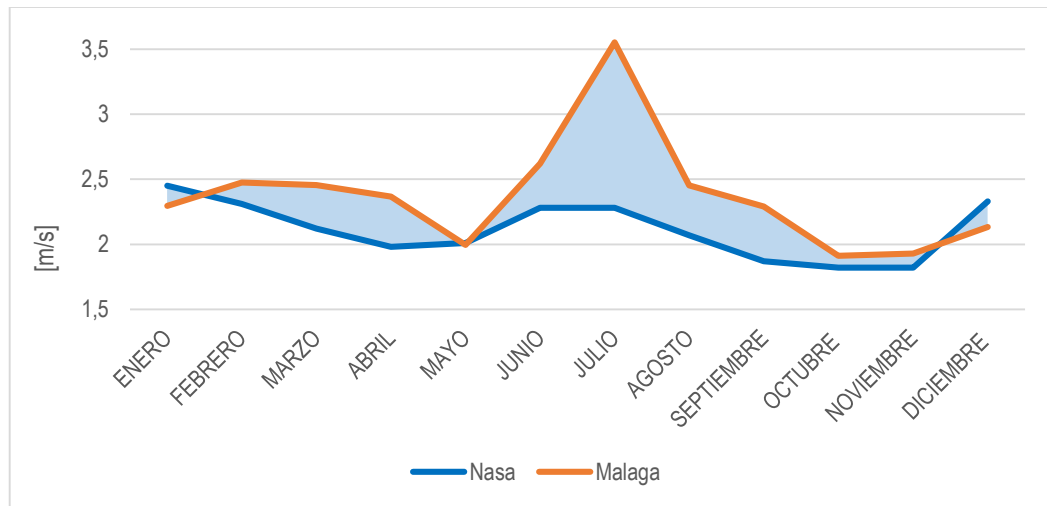
**Figura 6. Radiación Solar presente en la zona**



Así mismo, de acuerdo con los datos obtenidos de velocidad del viento presente en la zona de estudio, se observa que la estación meteorología instalada en Málaga suministra valores superiores la mayor parte del año con respecto a la NASA. Esto

es suficiente para que la estación de Málaga dominé esta diferencia en  $3,32 [m/s]$  por unidad de tiempo. Ver figura 7.

**Figura 7. Velocidad del viento presente en la zona**



A diferencia de las figuras anteriores, los datos suministrados de temperatura en la zona de estudio describen que la estación meteorológica instalada en Málaga arroja a lo largo del año valores inferiores con respecto a la NASA. Para este caso, se tiene una diferencia de área bajo la curva de  $5,08 [^{\circ}C]$  por unidad de tiempo. Lo que impacta positivamente en la eficiencia de los paneles solares y por ende en el dimensionamiento de la solución energética<sup>15</sup>. Ver figura 8.

<sup>15</sup> CEPEDA, J., & SIERRA, A. Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones, 2016. 10.

**Figura 8. Índice de temperatura presentes en la zona**



#### **4.4 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS SELECCIONADOS**

Considerando las especificaciones técnicas, costos, disponibilidad de proveedores y tiempo de entrega, los cuales fueron consultados al área de generación fotovoltaica a cargo del Ingeniero Alexander Pinzón Ávila de la empresa COPOWER, se seleccionaron los siguientes componentes:

**4.4.1 Especificaciones del panel fotovoltaico.** El costo del suministro de instalación del panel fotovoltaico se establece en **1.365.492 [\$/kW]** e incluye costos de hardware y controlador, \$ en pesos colombianos. El costo de operación y mantenimiento (O&M) es establecido en **43.000 [\$/año]** por [kW].

No se incluye ningún sistema de seguidor solar y las matrices fotovoltaicas se fijan a una pendiente de 30°. A continuación, se describe especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico, en la Tabla 1.

**Tabla 1. Especificaciones técnicas de modulo fotovoltaico.**

Especificaciones		CandianSolar MaxPower CS6X-325
Tipo de Panel		Polycrystalline
Capacidad Nominal [W]		325
Coefficiente de temperatura		-0,41
Temperatura de funcionamiento [%/°C]		45
Eficiencia [%]		16,94
Tiempo de vida [años]		20

**4.4.2 Especificaciones de la turbina eólica.** La turbina eólica seleccionada para las simulaciones es Eocycle EO10 modelo 10 kW. El capital y el costo de reemplazo de la turbina eólica se establecen en \$90.630.000 cada uno. Este valor incluye costos de controlador, soporte e instalación. El Costo O&M de la turbina se estima en un 2% del costo de capital y se establece en \$1.812.600 al año. Las especificaciones técnicas de la turbina eólica se dan en la Tabla 2.

**Tabla 2. Especificaciones técnicas de turbina eólica.**

Modelo		EOCYCLE 10
Tipo		3 Aspas
Capacidad Nominal [kW]		10
Altura del cubo		16
Tiempo de vida [años]		20
Diámetro del rotor [m]		15,81
Velocidad del viento de corte [m/s]		2,75
Velocidad de corte del viento [m/s]		20

**4.4.3 Especificaciones de la batería.** Para el almacenamiento de energía eléctrica se utilizan baterías Hoppecke 12 OPzS 1500. El capital y el costo de reemplazo de esta batería es \$2.682.684. El precio de O&M se fija en \$125.000 al año. Se distinguen por ser una de las baterías con mayor duración y fiabilidad con el paso del tiempo en el mercado, las especificaciones de la batería se encuentran en la Tabla 3.

**Tabla 3. Especificaciones técnicas de la batería.**

Modelo		Hoppeck 12 Opzs 1500
Voltaje Nominal [ <i>V</i> ]		2
Capacidad Nominal [ <i>kWh</i> ]		3,59
Capacidad Máxima [ <i>Ah</i> ]		1.790
Estado de carga mínimo [%]		45
Eficiencia de carga y descarga [%]		86
Corriente de carga máxima [ <i>Ah</i> ]		306
Rendimiento de por vida [ <i>kWh</i> ]		5.080

**4.4.4 Especificaciones del generador diésel.** Con fines de brindar confiabilidad en el suministro del fluido eléctrico se fija la potencia nominal del generador diésel en **100 [kW]**, teniendo en cuenta que el pico o potencia máxima demanda por la carga no sobrepasa este valor. Para ejecutar las simulaciones se utiliza un generador diésel genérico de HOMER PRO con un costo de O&M de **12000 \$/h.** y un precio de adquisición y remplazo de aproximado de **\$61.326.300**, teniendo en cuenta características y especificaciones técnicas similares entre el generador utilizado en la simulación y el que ofrecen los proveedores.<sup>16</sup> El costo del combustible se toma como **\$4.833** pesos por litro, según la proyección de precios de los energéticos para generación eléctrica.<sup>17</sup>

**4.4.5 Especificaciones del convertidor.** En cuanto este componente, se usa un convertidor genérico de HOMER PRO de **2,3 [kW]**, con un costo de adquisición y reemplazo de \$4.150.854 fijado de la misma forma como se realizó con el generador diésel. Adicionalmente, el valor de O&M es de **100.000 \$/año**. Este convertidor cuenta con una vida útil de **15 años** y una eficiencia del **95%**.

## **4.5 SIMULACIÓN Y RESULTADOS**

Para llevar a cabo las simulaciones con el software HOMER PRO, se deben obtener los datos de la demanda, irradiación, velocidad de viento y precio de diésel. Adicionalmente es necesario suministrar las especificaciones técnicas de los equipos considerados para ser instalados en la región seleccionada. Estos parámetros ya fueron mostrados en la sección 4.1, 4.2 y 4.3 respectivamente.

---

<sup>16</sup> En, E., & En, E. Adicionales de instalacion (Para cada planta). 2018

<sup>17</sup> BRENT, C. W. T. I. Y. Proyección de precios de los energéticos para generación eléctrica. 2016

Esta sección muestra la simulación de las posibles combinaciones de generación realizadas por el software HOMER PRO. La comparación de resultados obtenidos por el software cuando fueron utilizados los datos de la estación climática de Málaga y los datos climáticos de la NASA es presentada en la sección 4.5.1. La comparación de las diferentes soluciones propuestas por el software HOMER PRO es presentada en la sección 4.5.2.

**4.5.1. Análisis comparativo entre fuentes de información meteorológica.** Es importante evaluar la diferencia entre los datos suministrados por las fuentes meteorológicas, ya que estas miden los parámetros que describen el potencial energético presente en la zona. En este estudio se comparan dos posibles fuentes de información con el fin de seleccionar una de ellas y continuar con el análisis de los resultados. La tabla 4 muestra los parámetros obtenidos al realizar las simulaciones utilizando los datos climáticos de la estación meteorológica de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y la estación meteorológica ubicada en Málaga.

**Tabla 4. Resultados estación MÁLAGA vs NASA.**

Estación Meteorológica	Málaga	Nasa
Parámetro		
Capacidad PV Instalada [ <i>kW</i> ]	241	272
Capacidad Diésel Instalada [ <i>kW</i> ]	100	100
Almacenamiento [ <i>und</i> ]	338	331
Convertidor [ <i>kW</i> ]	126	127
Producción De Energía [ <i>MWh/año</i> ]	400	410

Parámetro	Estación Meteorológica	
	Málaga	Nasa
Demanda No Suplida [ <i>kWh/año</i> ]	0	0
COE [ <i>\$/kWh</i> ]	704	710
Inicial Capital [\$]	1.525.484.160	1.549.640.076
Costo Total [\$]	2.989.074.072	3.011.631.879





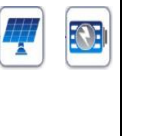
Según la tabla 4, se puede observar que para este caso de estudio los resultados son similares. Es decir, para este caso en particular, para obtener resultados verídicos o precisos en cuanto a un dimensionamiento energético, no es indispensable instalar una estación meteorológica en la zona de influencia del proyecto. Puesto que los resultados obtenidos por la NASA se asemejan considerablemente a los que arroja la estación instalada en la zona de estudio (MALAGA).

De acuerdo a lo anterior, se facilita la adquisición de los datos meteorológicos en esta zona en cualquier zona, ya que la NASA posee una plataforma de fácil acceso para la adquisición de los mismos. Además, el software HOMER PRO incluye en su base de datos esta información, lo que lo convierte en una herramienta útil para el desarrollo de proyectos similares tanto investigativos como aplicados a la industria. No obstante, se deja abierta la posibilidad para que futuros trabajos de grado, corroboren que, para cualquier zona de estudio los resultados obtenidos no varían considerablemente. Por tanto, la NASA sería una fuente confiable de información meteorológica para proyectos con objeto similar al presente trabajo de grado.

Para efectos de este estudio, se decide trabajar con los datos suministrados por la estación meteorológica Málaga.

**4.5.2 Análisis comparativo entre los diversos mix energéticos propuestos.** En cuanto a la comparación de posibles configuraciones de generación, la tabla 5 muestra los datos resultantes de las simulaciones con distintos mix energéticos.

**Tabla 5. Resultados de posibles combinaciones de generación.**

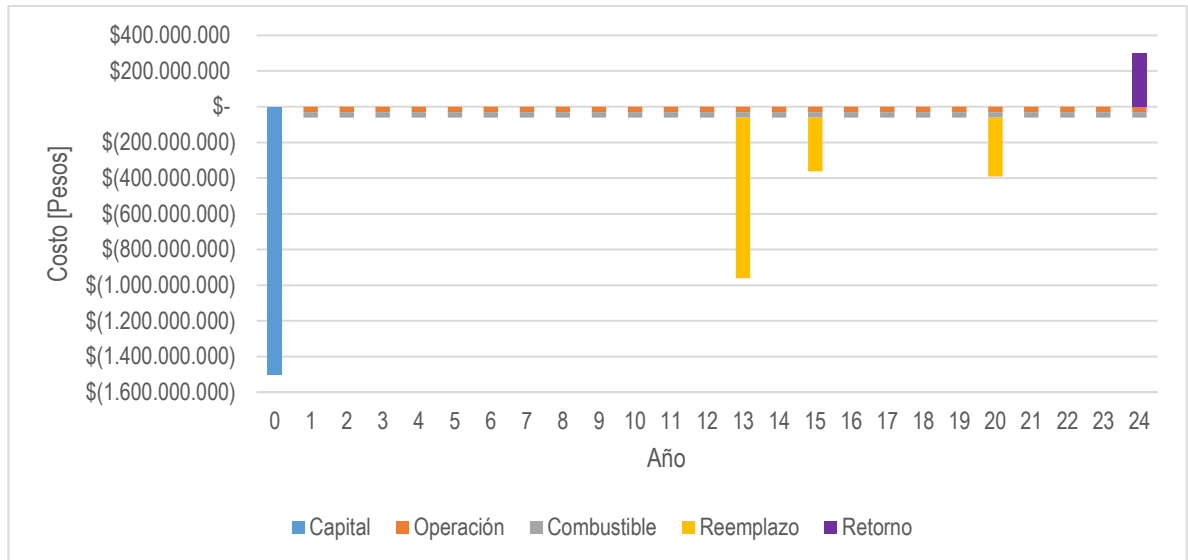
Componentes / Parámetros					
Capacidad PV Instalada [kW]	241	241	-	335	314
Capacidad Eólica instalada [kW]	1	-	7	1	-
Capacidad Diésel Instalada [kW]	100	100	100	-	-
Almacenamiento [und]	332	338	121	488	527
Convertidor [kW]	126	126	60,6	161	168
COE [\$/kWh]	722	704	1948	782,43	764,31

Componentes   Parámetros					
Inicial Capital [\$]	1.600.069.629	1.525.484.160	1.129.684.824	2.147.852.454	2.145.698.481
Costo Total [\$]	3.071.934.060	2.989.074.072	8.276.842.149	3.328.154.133	3.245.656.665

De acuerdo a la tabla 5, se observa que la configuración óptima bajo el criterio del costo nivelado de la energía según HOMER PRO, es la que contiene en su estructura de generación: paneles solares, almacenamiento de energía (baterías) y generador diésel. Fijando el costo total del proyecto en dos mil novecientos ochenta y nueve millones setenta y cuatro mil setenta y dos pesos (\$2.989.074.072).

Esta configuración presenta un flujo de caja como se muestra en la figura 9, en donde el eje vertical representa el valor del flujo en pesos y el eje horizontal representa los años de vida útil del proyecto. Cabe resaltar que hay un flujo de caja significativo en el año 13, 15 y 20, debido a que algunos equipos cumplen su vida útil antes de lo que esta previsto el proyecto (25 años).

**Figura 9. Flujo de caja del proyecto**



Aunque el capital inicial es el menor con respecto a las demás configuraciones, se observa que cuando la estructura de generación se basa en energía eólica, generador diésel y almacenamiento (baterías), el costo total del proyecto se incrementa considerablemente, superando el doble del valor óptimo. Esto se debe a que esta configuración basa su generación de energía en el uso de combustibles fósiles y el valor de producción de estos aumenta a lo largo del tiempo según la UPME.<sup>18</sup>

Además, según los resultados obtenidos de las simulaciones, se contrasta la información del bajo potencial eólico existente en la zona. Puesto que, HOMER PRO hace que su participación en el mix energético sea prácticamente nula en todas las configuraciones.

<sup>18</sup> UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia, resumen ejecutivo. Unidad de Planeación Minero Energética, 2015. 13. Disponible en: <https://doi.org/ISSN.0121-4993>

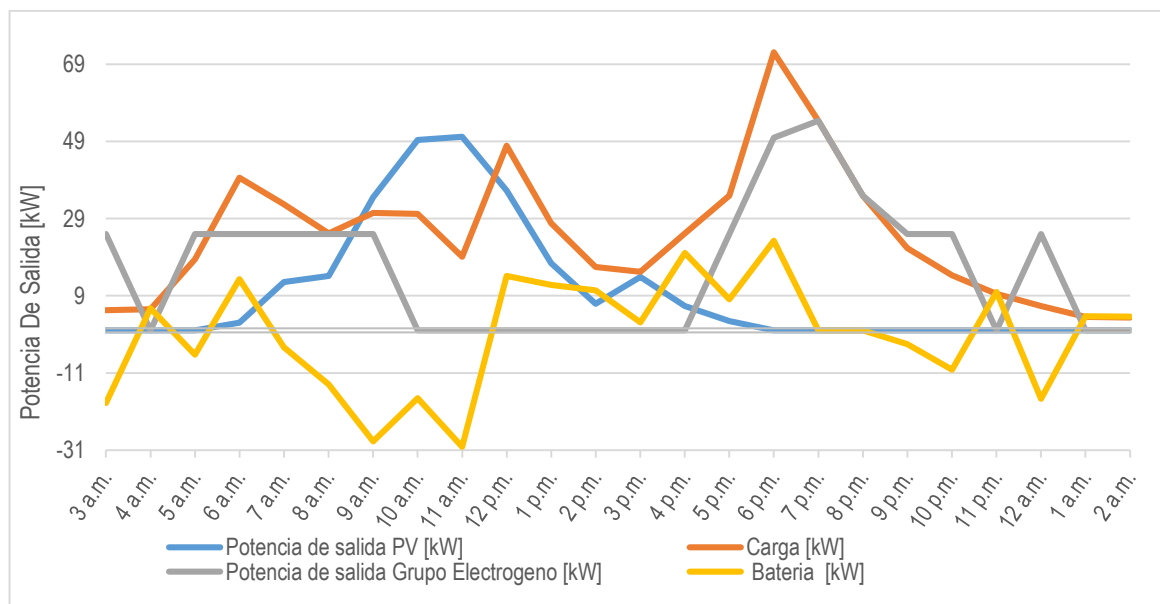
**4.5.3 Solución de generación y almacenamiento seleccionada.** Partiendo de los resultados obtenidos con HOMER PRO se elige una solución de generación de energía eléctrica, que está dada por la siguiente formula:

$$P_{carga} = P_{FV} + P_{diésel} + P_{bateria} \quad (5)$$

Esta se basa en generación solar fotovoltaica ( $P_{FV}$ ), generación diésel ( $P_{diésel}$ ) y almacenamiento de energía ( $P_{bateria}$ ). La estructura de esta solución está distribuida de la siguiente manera: el 70% de la capacidad total instalada corresponde a generación solar fotovoltaica (241 kW) y el 30% está constituido a base de grupos electrógenos (100kW). El almacenamiento de energía requerido para esta configuración es de 1,213 MWh.

La figura 9 muestra los resultados obtenidos para un día seleccionado aleatoriamente en el mes de agosto (mayor demanda promedio).

**Figura 10. Potencia de salida por hora del sistema híbrido de generación**



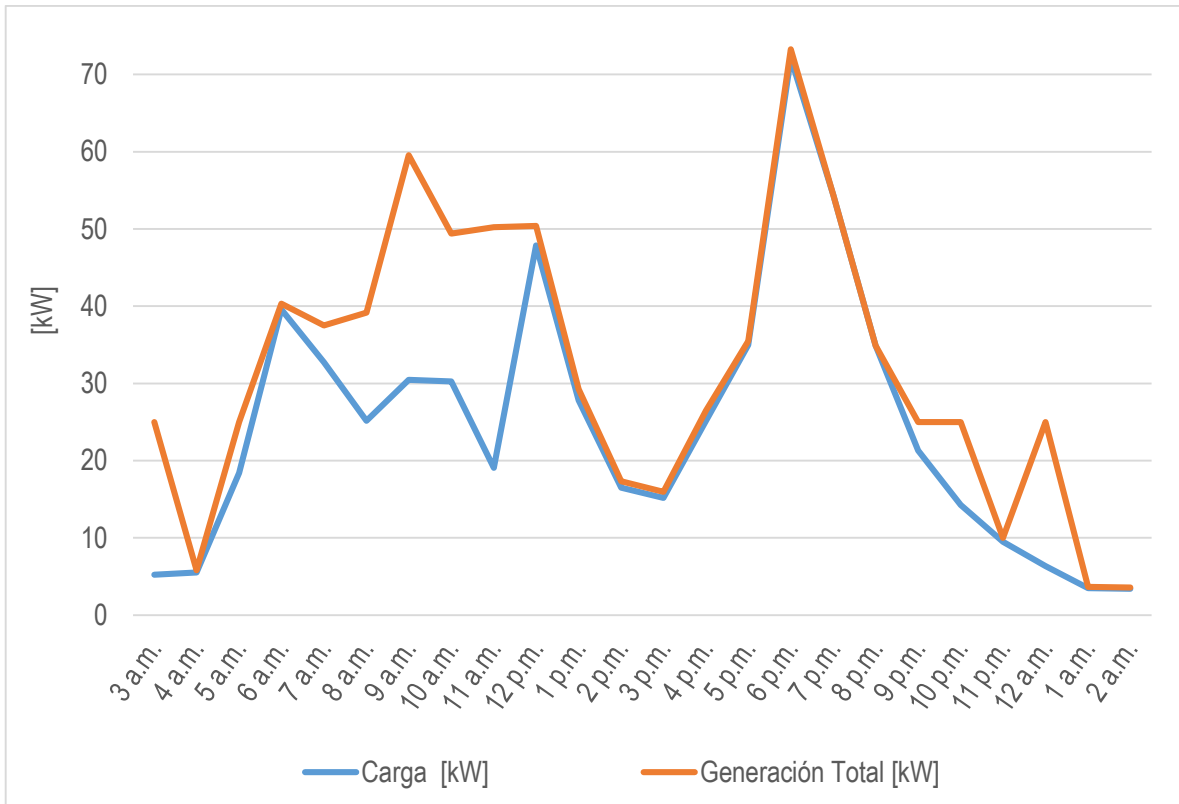
Se puede observar que el valor pico de la demanda se ubica a las 6 de la tarde, justo donde la generación solar fotovoltaica desciende al mínimo. Debido a esto el grupo electrógeno llega a su producción más alta. Entre las 10 y las 11 am se presenta un escenario similar, donde la generación fotovoltaica está en su punto máximo de producción y el grupo electrógeno desciende al mínimo.

Cabe resaltar, que las continuas variaciones que presentan las curvas de producción de energía, se deben a que el software siempre busca optimizar los costos en la generación, y a su vez suplir la demanda en cada instante de tiempo con los recursos energéticos disponibles.

En la figura 10, se observa que, durante las 24 horas de un día seleccionado en cierto escenario desfavorable (mes con mayor consumo promedio), el valor de la carga no supera la generación de energía, lo que determina la confiabilidad del suministro para este caso de estudio (un día aleatorio del mes de agosto). Es decir, la solución de generación y almacenamiento seleccionada garantiza el fluido eléctrico de forma constante a cada usuario en este intervalo de tiempo.

Cabe resaltar que existen más escenarios desfavorables como, por ejemplo: si se tiene un mes donde la disponibilidad de recursos energéticos primarios para la generación es menor, así la demanda sea menor puede presentar desabastecimiento. Debido a que, afirmar que un escenario, es más, o menos favorable que otro, no solamente depende del consumo, sino también depende de la disponibilidad de recursos energéticos del mes.

**Figura 11. Sumatoria del sistema de generación**



Por otro lado, de acuerdo al costo total del proyecto (\$2.989.074.072), la tabla 6 muestra los valores de cuanto le costaría a cada usuario la solución de generación y almacenamiento a lo largo de la vida útil del proyecto (25 años). Además, determina el valor mensual que cancelaría por el suministro de energía, haciendo una analogía al modelo de cobro del operador de red, que en este caso es la electrificadora de Santander.

**Tabla 6. Resumen de costos del proyecto.**

Consumo total de energía en un año [kWh]	228.453,88
Cantidad de usuarios	100
Consumo de energía por usuario [kWh/mes]	190,38
Costo del kilovatio hora	\$704
Costo mensual/usuario	\$134.026

La estimación del costo mensual por usuario es hipotética, ya que cada uno de ellos no consume exactamente la misma energía a lo largo del tiempo. No obstante, proporciona una aproximación del costo real mensual. A continuación, se describe brevemente como se obtuvo el resultado del costo mensual por usuario

$$\text{Consumo de energía por usuario} = \frac{\text{Consumo total de energía en un año}}{\text{Cantidad de usuarios} \times \text{Cantidad de meses}} \text{ [kWh/mes]} \quad (6)$$

$$\text{Consumo de energía por usuario} = \frac{228.453,88}{100 \times 12} = 190,38 \text{ [kWh/mes]} \quad (7)$$

**Costo mensual/usuario**

$$= \text{Consumo de energía por usuario} \times \text{Costo del kilovatio hora} \text{ [\$]}$$

$$\text{Costo mensual/usuario} = 190,38 \times 704 = \$134.026 \quad (8)$$

**4.5.4 Análisis de sensibilidad.** Hay varias razones para realizar un análisis de sensibilidad al ingresar múltiples valores para una variable de entrada en particular. En primer lugar, es posible que no se sepa el valor exacto de esa variable. Al especificar un rango de valores, puede determinar qué tan importante es esa variable y cómo cambia la solución según su valor. En otras palabras, puede determinar cuán "sensibles" son las salidas a los cambios en esa variable.

La figura 11 describe la sensibilidad del costo total del proyecto cuando se varían parámetros como el precio del diésel, la tasa nominal de descuento y el promedio de radiación solar. Los valores base de estos parámetros se fijan a continuación.

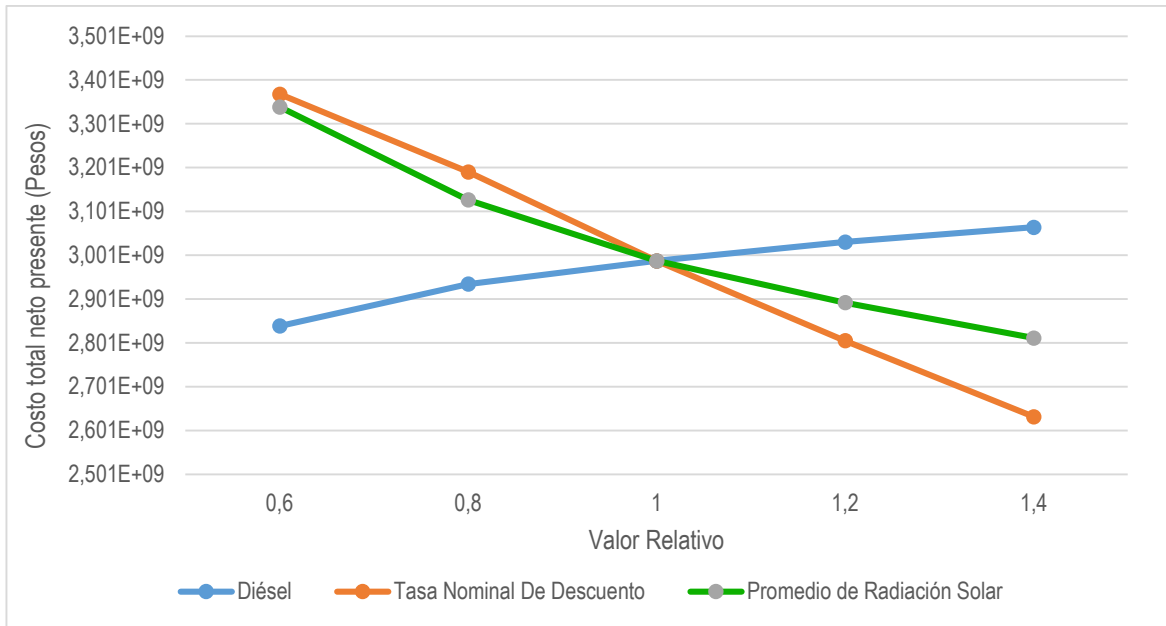
- Precio del diésel: 2,200 pesos por litro<sup>19</sup>,
- Tasa nominal de descuento: 6%(002-14, n.d.)
- Promedio de radiación solar: 5.23 [kWh/m<sup>2</sup>/día]

Se observa que el incremento del costo total del proyecto es directamente proporcional al precio del diésel, mientras que la tasa nominal de descuento y el promedio de radiación solar son inversamente proporcionales al costo total. Es decir, cuando se aumenta la radiación solar o la tasa de descuento el costo del proyecto disminuye.

---

<sup>19</sup> UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA.Op. Cit.

**Figura 12. Costo total neto presente**



La tasa nominal de descuento es la que tiene una mayor pendiente, lo que hace que la variación del costo total del proyecto sea más sensible a sus cambios que al cambio de los demás parámetros. No obstante, la radiación solar también tiene un comportamiento similar. Por esto, al disminuir cualquiera de estos dos parámetros en un 40 % (Valor relativo = 0,6) el costo total llegaría aproximadamente al mismo punto, un 12% mayor que el valor base.

En la tabla 7 se complementa la información anterior. Por ejemplo, al disminuir un 20% (Valor relativo= 0.8) el precio del diésel, el costo total neto del proyecto disminuye un 1.8%, mientras que, si se disminuye la tasa nominal de descuento y el promedio de radiación solar en el mismo valor, el costo total neto presente aumentaría un 11.29% y 10.52% respectivamente.

Con base en esto se puede afirmar que, el porcentaje de variación de los parámetros no es directamente proporcional a la variación del costo total neto del proyecto. Es decir, no necesariamente el costo total del proyecto aumenta un 10% cuando disminuyo la radiación solar en este mismo porcentaje.

**Tabla 7. Porcentajes de variación del costo total neto presente.**

Parámetros % De Variación	Diésel	Tasa Nominal De Descuento	Promedio de Radiación Solar
-40%	-5.24%	11.29%	10.52%
-20%	-1.80%	6.36%	4.45%
20%	1.42%	-6.50%	-3.30%
40%	2.50%	-13.51%	-6.26%

## 5. CONCLUSIONES

- La metodología presentada por INGENIERÍA, F. D. E., El, U., & Atp, P<sup>20</sup> sirvió como base estructural para el desarrollo del proyecto. La caracterización y cuantificación de los requerimientos energéticos fue realizada bajo el marco del proyecto presentado a Colciencias en la convocatoria 782. La información recopilada por el desarrollo de este proyecto sirvió para determinar la demanda eléctrica de la comunidad que fue suministrada al software HOMER PRO.
- La cuantificación y caracterización del potencial energético de la zona fue realizada empleando los datos climáticos de dos estaciones meteorológicas diferentes. La comparación de la capacidad instalada cuando es considerada la fuente de datos de la estación meteorológica de Málaga o la estación meteorológica de la NASA permitió comprobar que no existe una diferencia significativa en los resultados.
- Gracias al uso del software HOMER PRO fue posible realizar la selección de las fuentes más factibles para la generación y la estimación de costos asociados a cada una de las soluciones propuestas. Comparando los costos asociados a cada una de las soluciones obtenidas fue posible seleccionar la opción que presentaba el menor costo nivelado de la energía. Como resultado adicional se presentó un análisis acerca de los posibles costos que debería pagar cada uno de los usuarios que se benefician de la instalación de este sistema. Es válido resaltar que los costos que debe cancelar cada uno de los usuarios es elevado con respecto al nivel socioeconómico de la población. En este sentido es aconsejable considerar la opción propuesta por los PERS en la cual se considera la combinación de capital público con capital privado para la instalación y

---

<sup>20</sup> INGENIERÍA, F. D. E., El, U., & Atp, P. Departamento de Ingeniería Eléctrica. 2012

operación de este tipo de proyectos. Un subsidio de capital proveniente del gobierno para la instalación de este proyecto podría reducir significativamente las tarifas pagadas por cada uno de los usuarios aumentando la viabilidad de este tipo de proyectos.

## BIBLIOGRAFÍA

002-14, C. D-002-14 Marco regulatorio prestación servicio de energía eléctrica en zonas ZNI.pdf.

BALLESTEROS ALTUVE, A. Energías no convencionales, una tarea pendiente. 2018

BRENT, C. W. T. I. Y. Proyección de precios de los energéticos para generación eléctrica. 2016

CEPEDA, J., & SIERRA, A. Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones, 2016. 10.

DUMAN, A. C., & GÜLER, Ö. Techno-economic analysis of off-grid PV/wind/fuel cell hybrid system combinations with a comparison of regularly and seasonally occupied households. *Sustainable Cities and Society*, 42(May), 2018. 107–126. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.029>

En, E., & En, E. Adicionales de instalacion (Para cada planta). 2018

GOBIERNO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Atlas Interactivo - IDEAM. 2014

GONZÁLES, Y. Electrificación sostenible de zonas interconectadas del pacífico Colombiano, por medio de Clusters prototipo de sistemas híbridos solar-eólico-híbridos-diesel optimizados con HOMER PRO. 2016

INGENIERÍA, F. D. E., EI, U., & Atp, P. Departamento de Ingeniería Eléctrica. 2012

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia, resumen ejecutivo. Unidad de Planeación Minero Energética, 2015. 13. Disponible en: <https://doi.org/ISSN.0121-4993>

UPME. Plan Indicativo De Expansión De Cobertura De Energía Eléctrica 2013-2017. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

WILLIAMS, N. J., JARAMILLO, P., TANEJA, J., & USTUN, T. S. Enabling private sector investment in microgrid-based rural electrification in developing countries: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 2015. 1268–1281. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.153>

WORLD BANK. Tracking SDG7: the Energy Progress Report. 2018. Disponible en: [http://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/tracking\\_sdg7-the\\_energy\\_progress\\_report\\_full\\_report.pdf](http://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/tracking_sdg7-the_energy_progress_report_full_report.pdf)

ZARCO, P. J., ARIZA, F., & LÓPEZ, R. Métodos de obtención de la radiación solar mediante teledetección: órbita polar vs órbita geoestacionaria. *Espacio y Desarrollo*, No. 8, 1996. 33–73