

Optimización del Flujo de Energía en Instituciones de Asistencia Médica Utilizando  
Técnicas Heurísticas

Juan David Acosta Dangond ✉ dangond@uninorte.edu.co

Magíster en Ingeniería Eléctrica

Asesores:

Ph.D. Ingrid Oliveros

M.Sc. José Daniel Soto



Universidad del Norte  
Departamento De Ingeniería Eléctrica y Electrónica (DIEE)  
Barranquilla, Atlántico  
2022

## Contenido

<b>Resumen</b> .....	6
<b>Declaración De Autoría</b> .....	7
<b>Agradecimientos</b> .....	8
<b>Introducción</b> .....	11
<b>Motivación</b> .....	12
<b>Objetivos</b> .....	14
<b>Pregunta sobre la tesis</b> .....	14
<b>Hipótesis de investigación</b> .....	14
<b>Esquema de la tesis</b> .....	14
<b>CAPITULO I</b> .....	16
<b>1.1 Descripción de las unidades hospitalarias</b> .....	16
<b>1.2 Red de instituciones de asistencia médica del Departamento De La Guajira</b> .....	16
<b>1.3 Descripción del problema</b> .....	17
<b>1.4 Problemas en el suministro eléctrico en las instituciones de asistencia médica</b> .....	21
<b>1.5 Antecedentes</b> .....	24
<b>CAPITULO 2</b> .....	32
<b>2.1. Solución del problema en otras latitudes</b> .....	32
<b>2.2. Métodos matemáticos aplicados</b> .....	33
<b>2.3. Caracterización de los sistemas híbridos de energía renovables (HRES)</b> .....	35
<b>2.4. Hipótesis investigación</b> .....	44
<b>CAPITULO 3</b> .....	46
<b>3.1 Descripción epistemológica de la investigación</b> .....	46
<b>3.2 Descripción de las fases de investigación</b> .....	48
<b>3.3 Métodos matemáticos de solución</b> .....	49
<b>CAPITULO 4</b> .....	57
<b>4.1 Descripción del modelo matemático</b> .....	57
<b>4.2 Diagrama de bloques algoritmo desarrollado</b> .....	60
<b>4.3 Ecuaciones matemáticas</b> .....	61
<b>4.4 Función objetivo</b> .....	69
<b>4.5 Restricciones</b> .....	70
<b>4.6 Modelo matemático desarrollado</b> .....	71
<b>4.7 Metodología - Algoritmo Genético (GA)</b> .....	73
<b>4.8 Cálculo de las métricas de errores</b> .....	79
<b>4.9 Resultados</b> .....	80
<b>4.9.4 Como conseguir resultados más consistentes</b> .....	90
<b>CAPITULO 5</b> .....	91

<b>5.1. Conclusiones.....</b>	91
<b>5.2. Contribución principal.....</b>	91
<b>5.3. Trabajo futuro .....</b>	91
<b>-ANEXOS .....</b>	92
<b>Bibliografía. ....</b>	100

## Lista de Figuras.

<i>Figura 1</i> Clasificación de Instituciones De Asistencia Médica [14].	16
<i>Figura 2</i> Red Hospitalaria Departamento De La Guajira,[16].	17
<i>Figura 3</i> Diagrama de bloques del sistema eléctrico de una Institución de Asistencia Médica,[18].	19
<i>Figura 4</i> Sistema eléctrico básico de Instituciones De Asistencia Médica, Fuente NTC 2050, Sección 517 [18].	20
<i>Figura 5</i> Problemas de energía en las Instituciones De Asistencia Médica [25].	24
<i>Figura 6</i> Objetivos de optimización sistema híbrido de energía renovable (HRES), Fuente [27]	25
<i>Figura 7</i> Beneficios gestión energética eficiente (EMS) [28].	26
<i>Figura 8</i> Estrategias De Control Sistemas HRES, Fuente [27].	26
<i>Figura 9</i> Técnicas de Optimización, Fuentes [27-29].	27
<i>Figura 10</i> Tecnologías Híbridas FV-EES Para Edificaciones,[34].	29
<i>Figura 11</i> Tipos de Problemas de Optimización, Fuente Propia.	33
<i>Figura 12</i> Métodos de Análisis del Flujo Óptimo de Potencia (OPF) [46].	34
<i>Figura 13</i> Áreas académicas asociadas a los sistemas HRES, Fuente Scopus.	36
<i>Figura 14</i> Clasificación sistemas HRES [49].	37
<i>Figura 15</i> Configuración HRES acoplada en DC [50-51].	38
<i>Figura 16</i> Configuración HRES acoplada en AC [50 - 51].	39
<i>Figura 17</i> Configuración HRES acoplada en AC/DC [50 - 51].	39
<i>Figura 18</i> Irradiación global horizontal media diaria, Departamento De La Guajira [54].	41
<i>Figura 19</i> Clasificación Sistemas Fotovoltaicos [55].	41
<i>Figura 20</i> Tipos de Sistemas de Almacenamiento de Energía [52].	42
<i>Figura 21</i> Componentes Sistema HRES AC/DC, Fuente Propia.	44
<i>Figura 22</i> Enfoque metodológico para la selección de los estudios revisados, adaptado de [94].	46
<i>Figura 23</i> Fases de investigación diseñada.	49
<i>Figura 24</i> Revisión De La Literatura Optimización, Fuente Propia.	50
<i>Figura 25</i> Clasificación de técnicas heurísticas, tomado de [76].	50
<i>Figura 26.</i> Áreas de aplicación técnicas de optimización en sistemas (HRES), [81].	51
<i>Figura 27</i> Sistema HRES, Propuesto.	57
<i>Figura 28</i> Diagrama de Flujo Modelo Matemático, Fuente Propia.	61
<i>Figura 29</i> Radiación Solar Datos Obtenidos Vs Pronosticados.	63
<i>Figura 30</i> Energía Producida Sistema Fotovoltaico (EPVt ), - Paneles Solares de 200W.	63
<i>Figura 31</i> Perfil de Demanda - Hospital de Nivel I, Fuente Propia	68
<i>Figura 32</i> Esquema de funcionamiento algoritmo genético (AG),[108].	74
<i>Figura 33</i> Flujo de creación de la descendencia de una población, Algoritmo Genético (GA),[108].	75
<i>Figura 34</i> Algoritmo Desarrollado, Fuente propia.	78
<i>Figura 35</i> Flujo de Energía Sistema HRES – Escenario 1.	81
<i>Figura 36</i> Estado de carga (SOC) Sistema de baterías – Escenario 1.	82
<i>Figura 37</i> \$COP/kWh – Escenario 1.	82
<i>Figura 38</i> Flujo de Energía Sistema HRES – Escenario 2.	84
<i>Figura 39</i> Estado de carga (SOC) Sistema de baterías – Escenario 2.	85
<i>Figura 40</i> \$COP/kWh – Escenario 2.	85
<i>Figura 41.</i> Flujo de Energía Sistema HRES – Escenario 3.	87
<i>Figura 42</i> Estado de carga (SOC) Sistema de baterías – Escenario 3.	88
<i>Figura 43</i> \$COP/kWh Generador Diésel – Escenario 3.	88
<i>Figura 44</i> Diagrama de Bloques Detallado del Sistema- Perfil de demanda (kWh).	94

## Lista de Tablas.

<i>Tabla 1 IPS Por Nivel De Atención, [16].</i>	17
<i>Tabla 2 Normatividad Eléctrica Sector Hospitalario, Fuente Propia.</i>	18
<i>Tabla 3 Costos de referencia generadores diésel, Fuente Propia.</i>	22
<i>Tabla 4 Categorías y características de fenómenos electromagnéticos (IEEE 1159 - 1995) [120].</i>	23
<i>Tabla 5 Ventajas y desventajas control centralizado/distribuido [28].</i>	27
<i>Tabla 6 Artículos de referencias, Fuente Propia</i>	30
<i>Tabla 7 Aspectos relevantes de esta investigación.</i>	31
<i>Tabla 8 Ventajas y Desventajas entre las Técnicas de Optimización, Fuente Propia.</i>	35
<i>Tabla 9 Clasificación de los sistemas HRES [49-50].</i>	36
<i>Tabla 10 Ventajas y Desventajas de los sistemas HRES [52].</i>	40
<i>Tabla 11 Parámetros claves sistema de baterías [52].</i>	43
<i>Tabla 12 Técnicas de resolución para problemas relacionados con los sistemas HRES, tomado de [94].</i>	47
<i>Tabla 13 Característica de los diseños cuasi-experimentales [57]</i>	48
<i>Tabla 14 Aplicación de algoritmos de optimización en sistemas HRES.</i>	52
<i>Tabla 15 Algoritmos Heurísticos Implementados, [78-83].</i>	54
<i>Tabla 16 Ventajas/Desventajas Algoritmos Heurísticos [93- 94]</i>	56
<i>Tabla 17 Componentes del sistema HRES.</i>	59
<i>Tabla 18 Consideraciones Sistema HRES.</i>	59
<i>Tabla 19 Descripción Del Problema De Optimización</i>	60
<i>Tabla 20 Parámetros Sistema FV</i>	62
<i>Tabla 21 Variables Sistema FV.</i>	63
<i>Tabla 22 Parámetros generador diésel.</i>	64
<i>Tabla 23 Variables generador diésel</i>	65
<i>Tabla 24 Variables Sistema Baterías</i>	66
<i>Tabla 25 Equipos Médicos Hospital De Nivel de Atención 1 [107].</i>	69
<i>Tabla 26 Índices Modelo Matemático.</i>	72
<i>Tabla 27 Formulación Modelo Matemático.</i>	72
<i>Tabla 28 Parámetros Algoritmo Genético (AG).</i>	78
<i>Tabla 29 Resultados Flujo De Energía sistema HRES – Escenario 1.</i>	83
<i>Tabla 30 Resultados Flujo De Energía sistema HRES – Escenario 2.</i>	86
<i>Tabla 31 Resultados Flujo De Energía sistema HRES – Escenario 3.</i>	89
<i>Tabla 32 HSP, Villanueva - La Guajira Año 2019</i>	95
<i>Tabla 33 Radiación mínima del lugar, Villanueva - La Guajira.</i>	95
<i>Tabla 34 Ficha Técnica Panel Fotovoltaico Seleccionado.</i>	96
<i>Tabla 35 Cálculo del Banco de Paneles Fotovoltaicos.</i>	96
<i>Tabla 36 Cálculo del Banco de Baterías.</i>	97
<i>Tabla 37 Cantidad Total de Baterías.</i>	98
<i>Tabla 38 Dimensionamiento generador diésel.</i>	98

## Resumen

Las instalaciones de asistencia médica ubicadas en el Departamento de La Guajira tienen como fuente de suministro de energía principal la red de distribución del operador de red, quedando expuestas a todo tipo de interrupciones que puedan presentarse en el suministro de energía. El sistema eléctrico esencial de estas instalaciones utiliza como fuente alternativa de energía un generador diésel que fue dimensionado para operar por periodos de tiempo determinados de (8-16) horas y en casos de emergencia, lo que significa que no se garantiza completamente el respaldo de la fuente alternativa para suplir la totalidad de la demanda hospitalaria para un periodo de 24 horas.

Esta investigación se enfocó en encontrar una solución energéticamente viable y amigable con el medio ambiente. Por lo tanto, en este documento se describe la metodología que permitió optimizar el flujo de energía mediante la selección de una técnica heurística entre las fuentes de energía en un sistema eléctrico esencial de una instalación de asistencia médica.

La contribución de esta investigación, consistió en optimizar el flujo de energía en el sistema eléctrico esencial cuando se implementa un sistema fotovoltaico y un sistema baterías. Esta optimización se realizó mediante el desarrollo de un modelo matemático resuelto por un método heurístico que para este caso fue un algoritmo genético de estrategia evolutiva (Plus ( $\mu + \lambda$ )). Gracias a la implementación de este algoritmo se logró calcular y minimizar los costos de la generación del sistema eléctrico esencial que opera sin conexión (Off - grid) a la red de media tensión.

En los resultados obtenidos de acuerdo a un período de simulación de 24 horas se logró disminuir el uso del generador diésel en un 20% de acuerdo a los indicadores MAE (3,9%) y MAPE (4%). Además, se evidencio que a través de la implementación de un sistema fotovoltaico y de un sistema de baterías se pueden disminuir los costos energéticos un 5%, de las instalaciones de asistencia hospitalaria.

## Declaración De Autoría

Yo, Juan David Acosta Dangond, nacido el 21 de septiembre de 1992 en Colombia, declaro que esta tesis titulada *Optimización del Flujo de Energía en Instituciones de Asistencia Médica Utilizando Técnicas Heurísticas* como caso de estudio y el trabajo presentado en ella son de mi autoría. Confirmo que este trabajo fue realizado para la obtención del título de magister en ingeniería eléctrica en la Universidad del Norte.

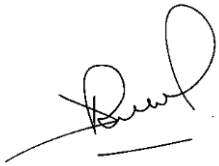
Salvo en los casos en que se hace referencia en el texto de la tesis, ésta no contiene material publicado en otro lugar ni extraído total o parcialmente de una tesis aceptada para la obtención de cualquier otro título o diploma. No se ha utilizado ningún trabajo ajeno sin el debido reconocimiento en el texto principal de la tesis. Esta tesis no ha sido presentada para la obtención de ningún título o diploma en ninguna otra institución terciaria.

Juan David Acosta Dangond

Juan David Acosta Dangond



Ph.D. Ingrid Oliveros  
Asesor



M.Sc. José Daniel Soto  
Co - Asesor

## **Agradecimientos.**

Ha pasado un tiempo desde que comencé este reto, el cual ha sido un proceso de aprendizaje interesante no sólo en el ámbito científico sino en lo profesional y personal. Este logro significa mucho para mí y quiero agradecer a todas las personas que me apoyaron e hicieron posible que este trabajo se realice con éxito.

En primer lugar, deseo dar gracias a Dios por haberme dotado de Paciencia, sabiduría, entendimiento y sobre todo haberme guiado a lo largo de mi formación, brindarme fortaleza en momentos de debilidad lo que me permitió mantenerme motivado para llevar a cabo esta investigación.

Le doy gracias a mi madre María Celina Dangond Quintero, a mi padre Narciso Antonio Acosta Guerra, a mi hermano David Fernando Acosta Dangond y a mi novia Luna Melissa Arregocés Orcasita que fueron el motor que con su amor, confianza y paciencia me impulsaron a seguir adelante con este proyecto.

En segundo lugar, agradezco a mi asesora Ph.D. Ingrid Oliveros Pantoja y a mi co-asesor MSc. José Daniel Soto Ortiz por brindarme todo el tiempo su conocimiento, disposición, confianza, paciencia y orientación para culminar satisfactoriamente esta investigación.

Finalmente quiero agradecer al profesor Esneyder Rafael González Ponzon y a los compañeros Luis López y Álvaro González del Grupo de Investigación en Sistemas Eléctricos de Potencia (GISEL) por sus aportes y recomendaciones realizadas durante todo este tiempo para la investigación.

Hoy siento que subo otro escalón de la vida en donde veo recompensado todo el sacrificio, solo puedo decir Gracias.



## Glosario De Definiciones.

**EPS-S:** Son las entidades responsables de la afiliación y prestación del plan obligatorio de salud del régimen subsidiado a los beneficiarios de éste.

**ESE:** (Empresa Social del Estado). Institución prestadora de servicios de salud que en el SGSSS tiene la función de prestar los servicios en el respectivo nivel de afiliados y beneficiados de los distintos regímenes en los que se divide el sistema.

**IPS:** Son las instituciones encargadas de prestar los servicios de salud en su nivel de atención correspondiente a los afiliados y beneficiarios dentro de los parámetros y principios señalados en la presente ley.

**Instalaciones Especiales:** Son aquellas instalaciones que por estar localizadas en ambientes clasificados como peligrosos o por alimentar equipos o sistemas complejos, presentan mayor probabilidad de riesgo que una instalación básica y, por tanto, requieren de medidas especiales, para mitigar o eliminar tales riesgos.

**Instituciones De Asistencia Médica:** Edificios o partes de los edificios que comprenden ocupaciones como, entre otros, los hospitales, centros de acogida, centros de cuidados limitados, centros de supervisión, clínicas, consultas médicas y dentales y ambulatorios, ya sean permanentes o móviles.

**POS-S:** (Plan Obligatorio de Salud-subsidiado): Es el conjunto de actividades, procedimientos e intervenciones, servicios, insumos y medicamentos al que tienen derecho los afiliados al Régimen Subsidiado.

**Ramal Crítico:** Subsistema de un sistema de emergencia consistente en alimentadores y circuitos ramales que suministran corriente al alumbrado de trabajo, circuitos especiales de fuerza y determinados tomacorrientes seleccionados para servir y funciones de atención al paciente y que están conectados a fuentes de alimentación alternativas por uno o más conmutadores de transferencia durante la interrupción del servicio normal.

**Ramal Vital:** Subsistema de un sistema de emergencia que consta de alimentadores y circuitos ramales, destinado para suministrar la corriente necesaria que garantice la seguridad de los pacientes y del personal y que se conecta automáticamente a la fuente de alimentación alternativa cuando se produce una interrupción del servicio normal.

**Sistema De Seguridad Social En Salud (SGSSS):** es un conjunto armónico de entidades públicas y privadas, normas y procedimientos, que procuran la prestación del servicio y fijan condiciones de acceso en todos los niveles de atención, bajo el fundamento de garantizar la atención integral a toda población.

**Sistema De Equipos:** Conjunto de alimentadores y circuitos ramales dispuesto para la conexión retardada, automática o manual a la fuente de alimentación alternativa y al que están conectados fundamentalmente equipos de potencia trifásicos.

**Sistema Eléctrico Esencial:** Sistema compuesto por fuentes de alimentación alternativas y todos los sistemas de distribución y equipos auxiliares conectados y necesarios, para asegurar la continuidad del suministro eléctrico a determinadas áreas y funciones de una institución de asistencia médica durante un corte del suministro normal y diseñado además para minimizar las interrupciones dentro del sistema interno de alumbrado.

**Sistema De Emergencia:** Un sistema de potencia y control destinado a suministrar energía de respaldo a un número limitado de funciones vitales, dirigidas a garantizar la seguridad y protección de la vida humana.

**Sistema HRES:** Los sistemas híbridos de energía renovable (HRES) consisten en dos o más fuentes de energía, con al menos una de ellas renovable e integrada con equipo de control de potencia y un sistema de almacenamiento opcional.

## Introducción.

De acuerdo al ABC de los compromisos de Colombia para la COP21, donde el principal compromiso es “La República de Colombia se compromete a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% con respecto a las emisiones proyectadas para el año 2030”, el país ha adoptado distintas iniciativas en los principales sectores económicos que permitan lograr esta meta,[1]. A partir de esto, en el sector económico de la energía, se promueve la eficiencia energética en todos los sectores de la producción por medio de las energías renovables no convencionales y una gestión más eficiente de la energía. Para lograr esta meta es muy importante identificar aquellas edificaciones que realizan un uso intensivo de los recursos naturales, las cuales inciden significativamente en el cambio climático y generan impactos ambientales negativos porque utilizan el doble de la energía consumida por edificaciones asociadas al sector comercial. Un ejemplo de estas edificaciones corresponde a las instalaciones de asistencia médica debido a sus actividades generan grandes cantidades de residuos tóxicos y peligrosos que requieren gran cantidad de agua y energía. En el programa de uso racional de la energía (PROURE), las instalaciones de asistencia médica están incluidas en el sector terciario, siendo identificadas como servicios sociales y de salud, e indica que los principales usos de la electricidad donde se presentan un mayor consumo son las áreas de iluminación (31%), aire acondicionado (22.8%), refrigeración (19%) [2]. Para reducir el consumo energético en estas áreas de acuerdo a la Red Global de Hospitales Verdes y Saludables existen varias instituciones médicas que han adoptado políticas energéticas dirigidas al cumplimiento de los objetivos, en donde se destaca el de la energía. Por ejemplo, el Hospital Cañaveralejo de Cali, en el año 2014 se instaló un sistema fotovoltaico que brinda energía para el área de Urgencias [3]. Una revisión detallada sobre la implementación de energías renovables en los centros de salud se menciona en [4], donde realizan una estimación de las necesidades energéticas para los diferentes centros sanitarios en función de la capacidad de los pacientes, de sus necesidades y de los servicios prestados. A nivel internacional, de acuerdo con el experimento realizado entre U.S Department of Energy (DOE) y The National Renewable Energy Laboratory (NREL) en el hospital general de Massachusetts (MGH) y La Universidad Estatal de Nueva York Upstate Medical University (SUNY UMU), se estimó el uso final de la energía utilizada para múltiples categorías y se concluyó que las áreas de uso final con mayores consumos de energía para el (MGH) son las siguientes: recalentamiento y calentamiento (27%), iluminación y otras cargas eléctricas (21%) , pérdidas en las tuberías de vapor (14%), ventilación (13%), energía de la planta de enfriamiento chiller (10%). EL DOE sugiere a los gerentes de los hospitales y a los ingenieros de la salud que pueden utilizar esta caracterización para priorizar y afianzar de una forma más eficiente el alcance de las inversiones que deban realizar en las instalaciones [5]. En el contexto internacional, se han desarrollado aplicaciones tecnológicas relacionadas con el diseño y operación de Microrredes conformadas por sistemas fotovoltaicos y otros tipos de generación aplicado a las instalaciones de asistencia médica como lo proponen en [6], donde proporcionan una metodología para la optimización tecno-económica de los sistemas que conforman una Microrred instalada en el hospital St. Mary Lacar de Gulu, Uganda. Los autores de [7] propusieron un sistema de energía basado en energía fotovoltaica y demostraron el análisis económico asociado al sistema para regiones aisladas de la franja de Gaza. El sistema que propusieron es sostenible y supera al generador diésel en la vida útil y en un menor costo de la energía. Debido a los frecuentes cortes en el

suministro de energía eléctrica y a que la carga es suministrada normalmente por generadores diésel que consumen una gran cantidad de combustible, los autores en [8] a través de un algoritmo genético, desarrollaron un método sencillo que permite obtener un diseño óptimo para una microrred conectada a la red y conformada por un sistema FV, baterías y generador diésel. En [9] realizaron una comparación de la programación óptima de energía para los generadores de emergencia de un gran hospital con sistema de energía renovable implementando métodos matemáticos de programación lineal y cuadrática, donde destacaron que obtuvieron un mejor escenario de mejora utilizando el método de programación cuadrática. En [10] los autores proponen métodos estadísticos para modelar el comportamiento de la irradiación solar y la temperatura. En el contexto internacional, de acuerdo con [11][12][13], se proponen metodologías para previsión de la producción de energía fotovoltaica para los sistemas PV basados en algoritmos desarrollados con técnicas de Machine Learning. De acuerdo en la literatura se observó el vacío de que solamente se recurren a las técnicas heurísticas para resolver problemas relacionados con el dimensionamiento de los sistemas HRES. Por lo tanto, en esta investigación se indaga sobre una solución energética amigable con el medioambiente que son los sistemas HRES y se abordó el problema de optimización del flujo de energía en el sistema eléctrico esencial de una instalación de asistencia médica mediante el uso de algoritmos genético porque estos operan de forma simultánea con varias soluciones, en vez de trabajar de forma secuencial como las técnicas tradicionales.

### **Motivación.**

Esta investigación presenta una solución energética para las instalaciones de asistencia médica ubicadas en el Departamento de La Guajira, especialmente para aquellas que se encuentran ubicadas en lugares con problemas de gestión energética. Por lo tanto, el reto científico de esta investigación consiste en proponer una estrategia de despacho para la operación de las fuentes de energías renovables y convencionales del sistema eléctrico esencial de una instalación de asistencia médica. Esta estrategia estará soportada en un modelo matemático que de manera innovadora brindará soluciones energéticas y mejorará la gestión energética de la instalación de asistencia médica. Para esto, en primera instancia se debe analizar el comportamiento del perfil de la demanda (kWh) e identificar cuáles serán los escenarios más adecuados donde el sistema fotovoltaico y el sistema de baterías satisfagan parte del consumo energético de la instalación de asistencia médica, evitando así la utilización de los generadores diésel en horas en las cuales no es viable desde el punto de vista tecno-económico. Además, la aplicación de esta tecnología podría ayudarle a las entidades gubernamentales del departamento al desarrollo de una nueva economía diversa, sostenible que permita impulsar la diversificación productiva en el sector hospitalario. Se destaca que la principal limitación de esta investigación es que no se contempló el sincronismo de las fuentes alternativas de la institución hospitalaria con la red de media tensión.

Además, debido a que el impacto ambiental del sector hospitalario es muy significativo por el consumo intensivo de agua, energía y la generación de residuos, tanto biológicos como de material y equipo médico, esta investigación contribuirá ambientalmente porque promoverá el uso de fuentes de energía no convencionales en las instalaciones de asistencias médica

haciéndolas más amigable, con el medio ambiente y contribuyendo de alguna forma con la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, dando así cumplimiento a los requisitos establecidos en las normas ISO 14000 - ISO 50001. Para la sociedad se propone una propuesta innovadora porque a partir de una mejor capacidad energética se podría eliminar la barrera que existe en la oferta de servicios médicos prestados en el Departamento, la cual se encuentra actualmente limitada a servicios de baja y mediana complejidad, y algunos de alta complejidad.

## Objetivos.

Los objetivos de esta tesis de investigación son los siguientes:

✚ **Objetivo General:** Optimizar el flujo de energía en el sistema eléctrico esencial de una instalación de asistencia médica

### ✚ **Objetivos Específicos:**

- Caracterizar el sistema eléctrico esencial de una instalación de asistencia médica.
- Optimizar el modelo matemático desarrollado mediante una técnica heurística.
- Validar el modelo matemático propuesto mediante indicadores de evaluación.

## Pregunta sobre la tesis.

¿Cómo disminuir los costos por generación de energía en las instalaciones de asistencia médica en el Departamento de La Guajira?

## Hipótesis de investigación.

Con una buena gestión del sistema de baterías (BAT) menor será la utilización del generador diésel.

## Esquema de la tesis

El resto de esta tesis se organiza como sigue:

### ▪ **Capítulo 1.**

En este capítulo se describen las unidades hospitalarias, sus problemas energéticos y todo lo relacionado con los antecedentes de esta investigación.

### ▪ **Capítulo 2.**

En este capítulo se describen las obras relacionadas con las soluciones de tipo energético aplicadas al sector hospitalario.

### ▪ **Capítulo 3.**

En este capítulo se describe en primera instancia la metodología desarrollada para resolver esta investigación. También se analizarán los métodos matemáticos de solución utilizados en el estado del arte.

### ▪ **Capítulo 4.**

En este capítulo se soluciona el modelo matemático desarrollado y se presentan los resultados del problema de optimización del flujo de energía en un sistema eléctrico esencial de una instalación de asistencias médica mediante el uso de algoritmos genéticos evolutivos.

- **Capítulo 5.**

En este capítulo se presentan las conclusiones relevantes, contribución principal y trabajo futuro de esta investigación.

## CAPITULO I.

Este capítulo está conformado por tres secciones. En la primera sección se describe el panorama del sector hospitalario del Departamento de La Guajira. En la segunda sección se discute la problemática de la investigación y en la tercera sección se presentan todos los antecedentes encontrados en la literatura.

### 1.1 Descripción de las unidades hospitalarias.

A continuación, en esta sección se describen temas centrales relacionados con los niveles de atención hospitalaria y la red de instituciones de asistencia médica del Departamento de La Guajira.

Cabe destacar que en la resolución No 2003 de 2014 se establecieron los diferentes equipos y dispositivos, que deben ser dotados para las IPS con niveles de complejidad de I, II, III,[14].

#### ▪ Niveles De Atención Hospitalaria

Por medio del decreto 1760 de 1990, en el artículo 6º literal a) de la ley 10 de 1990 se establecieron y definieron los niveles de atención para las instituciones de asistencia médica [14][15]. En la figura 1 se muestra la clasificación de estas instituciones.



*Figura 1 Clasificación de Instituciones De Asistencia Médica [14].*

### 1.2 Red de instituciones de asistencia médica del Departamento De La Guajira.

El Departamento de La Guajira está conformado por 15 municipios. A continuación, se presenta una caracterización del sector hospitalario del Departamento de La Guajira en la cual se destaca la cantidad de IPS por nivel de atención, IPS por carácter territorial, empresas sociales del estado (E.S.E) y empresas sociales del estado (E.S.E) por nivel de complejidad,[16].



### 1.1.1. IPS por nivel de atención.

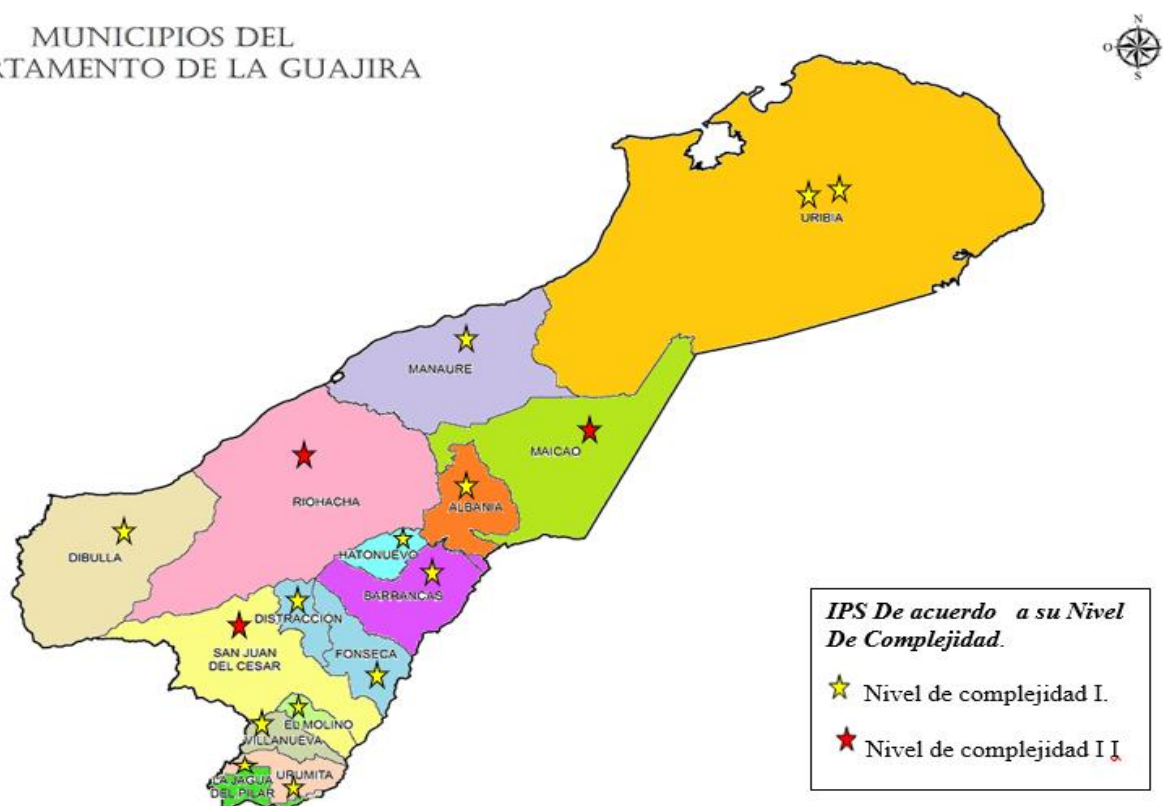
En la página del Ministerio de Salud y Protección Social se encontró la siguiente información correspondiente a la caracterización de IPS que se encuentran en el Departamento de La Guajira. Esto se puede ver en la tabla 1.

*Tabla 1 IPS Por Nivel De Atención, [16].*

Nivel	Cantidad	Porcentaje %
1	31	91.0
2	3	9.0

En la figura 2 se puede observar la red hospitalaria de nivel de complejidad I y II que se encuentra en cada uno de los municipios del Departamento de La Guajira.

MUNICIPIOS DEL  
DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA



*Figura 2 Red Hospitalaria Departamento De La Guajira,[16].*

### 1.3 Descripción del problema.

En esta sección se realizará la descripción del problema de esta investigación. En específico, se hará referencia sobre el sistema eléctrico esencial y el suministro eléctrico en las instituciones de asistencia médica.

### 1.3.1 Sistema eléctrico esencial en instituciones de asistencia médica.

El sistema eléctrico esencial para estas instituciones debe constar de un sistema capaz de alimentar un número limitado de servicios de alumbrado y fuerza, que se consideren esenciales para la seguridad de la vida y que interrumpa ordenadamente los procedimientos durante el tiempo en que el servicio eléctrico normal está interrumpido por cualquier razón. Esto incluye clínicas, consultorios médicos y odontológicos, instalaciones de atención ambulatoria, centros de atención con enfermeras, centros de cuidados limitados, hospitales y otras instalaciones para el cuidado de la salud que atiendan pacientes [18].

A continuación, en la tabla 2, se presenta la referenciación del marco legal basada en la normatividad eléctrica aplicada a las instituciones del sector hospitalario colombiano.

*Tabla 2 Normatividad Eléctrica Sector Hospitalario, Fuente Propia.*

Norma	Descripción
<b>RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas) [17]</b>	Capítulo 8, artículo 28, sección 28.3.2 instalaciones en instituciones de asistencia médica
<b>NTC 2050 (Norma Técnica Colombiana) [18]</b>	Sección 517, Instituciones de asistencia médica.
<b>IEC 60364-7-710 [19]</b>	Requisitos para instalaciones o emplazamientos especiales - Emplazamientos médicos
<b>NTC 4405 [20]</b>	Eficiencia energética. Evaluación de la eficiencia de los sistemas solares fotovoltaicos y sus componentes.
<b>LEY 697 de 2001 [21]</b>	Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.
<b>LEY 1715 de 2014 [22]</b>	Tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las Fuentes No Convencionales de Energía.

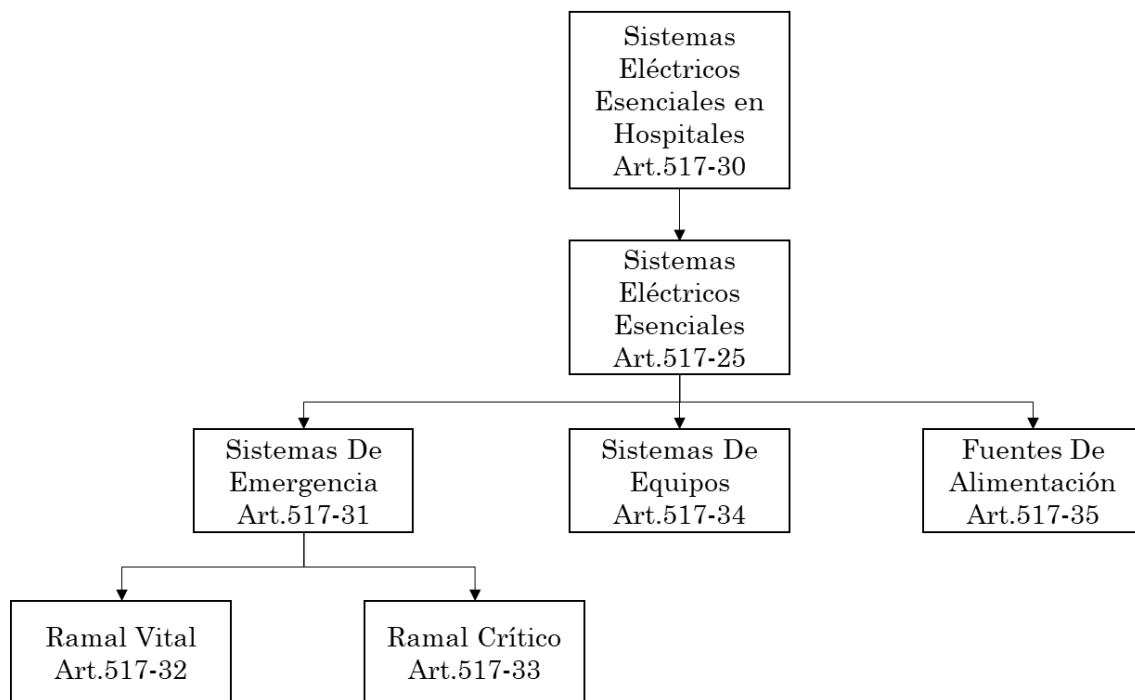
Otras normativas se pueden encontrar en el apartado 1 de la sección anexo, donde se hace referencia a todo lo relacionado con el marco legal de las instituciones del sector hospitalario colombiano.

Algunas generalidades de las instalaciones eléctricas en las instituciones de asistencia médica son las siguientes,[18]:

- **Sistemas separados:** Los sistemas eléctricos esenciales para hospitales deben constar de dos sistemas separados capaces de alimentar un número limitado de servicios de alumbrado y fuerza, que se consideren esenciales para la seguridad de la vida de los pacientes y la operación efectiva del hospital durante el tiempo en que el servicio eléctrico normal está interrumpido por cualquier razón. Estos dos sistemas deben ser *el sistema de emergencia y el sistema de equipos*. Estos sistemas deben ser independientes y su finalidad es suministrar corriente eléctrica a las diferentes áreas de carácter esencial para funcionamiento del hospital en caso de falla del sistema normal del suministro de energía.
- **Sistemas de emergencia:** El sistema de emergencia se debe limitar a los circuitos esenciales de seguridad para la vida y de atención crítica a los pacientes. Estos dos circuitos se denominan el ramal de seguridad para la vida y el ramal crítico.

- **Sistema de equipos:** El sistema de equipos debe alimentar los principales equipos eléctricos necesarios para el cuidado de los pacientes y la operación básica del hospital. Acá se encuentran bombas hidráulicas, ascensores para servicio al público general, equipos de ventilación mecánica forzada (aire acondicionado), grúas y plataformas eléctricas. Los equipos de imágenes diagnósticas también son alimentados desde el ramal de equipos, en caso de que así se requiera por consejo del fabricante o por disposición del equipo técnico encargado de la disposición y alimentación de los equipos, estos pueden ser alimentados desde un transformador independiente y contar con equipo de suplencia, aunque los costos subirían considerablemente.

En la figura 3, se presenta un diagrama de bloque del sistema eléctrico de una institución médica.

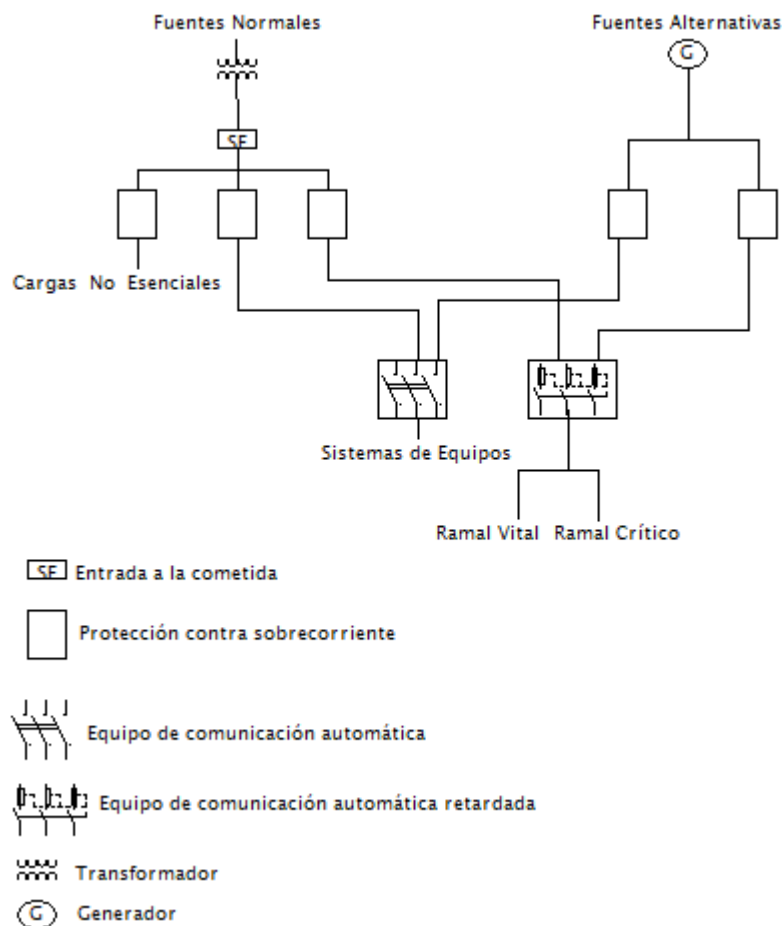


*Figura 3 Diagrama de bloques del sistema eléctrico de una Institución de Asistencia Médica,[18].*

Este sistema está conformado por fuentes alternativas de energía, sistemas de distribución y los equipos auxiliares conectados, diseñados para asegurar la continuidad de la energía eléctrica a determinadas áreas y funciones de una instalación para el cuidado de la salud durante un corte de la fuente de energía normal, y además para reducir al mínimo las interrupciones dentro del sistema interno de alimentación. De acuerdo con [18], este sistema está conformado por el ramal vital, ramal crítico y las fuentes alternativas de energía.

Los ramales eléctricos (vital y crítico) buscan generar redundancia en los equipos y servicios eléctricos importantes, categorizando el servicio eléctrico que se le brinda a cada una de las salidas. En la figura 4, se puede observar los ramales que conforman el sistema eléctrico de una institución de asistencia médica, resaltando al sistema esencial ya que este es de vital

importancia para el buen funcionamiento del sistema eléctrico en caso de presentarse irregularidades en los parámetros eléctricos.



**Figura 4** Sistema eléctrico básico de Instituciones De Asistencia Médica, Fuente NTC 2050, Sección 517 [18].

Para los circuitos asociados al *ramal crítico*, se busca que no haya interrupción o corte de energía y se cuenta con respaldo tanto del grupo electrógeno como del sistema UPS. Por su parte para los circuitos asociados al *ramal vital* se podrá tener un corte limitado de energía mientras entra el respaldo del grupo electrógeno, según lo indica la normatividad [18].

### 1.3.2. Usos para el sistema eléctrico esencial.

El equipo de generación utilizado se reservará exclusivamente para dicho servicio o se utilizará normalmente para otros fines de control de la demanda máxima, control de la tensión interna, alivio de la carga para la empresa de energía o cogeneración. Si se utilizan normalmente para los demás fines enumerados anteriormente, se instalarán dos o más grupos, de modo que la demanda máxima real que probablemente produzca la carga conectada del sistema de emergencia, así como los compresores de aire médico, las bombas de vacío médico-quirúrgicas, las bombas contra incendios de funcionamiento eléctrico, las bombas jockey, las bombas de combustible y los accesorios de los generadores se satisfagan con el

mayor grupo generador individual fuera de servicio. La fuente alternativa de energía de emergencia para la iluminación y la identificación de los medios de salida será el sistema eléctrico esencial. La fuente alternativa de energía para los sistemas de señalización de protección contra incendios será el sistema eléctrico esencial [18].

- Se permitirá que un solo grupo electrógeno que opere el sistema eléctrico esencial forme parte del sistema que suministra los demás fines enumerados en 4.4.1.1.7.1 de [18].
- Se permitirá que las cargas opcionales sean atendidas por el equipo generador del sistema eléctrico esencial. Las cargas opcionales serán servidas por sus propios medios de transferencia, de tal manera que estas cargas no serán transferidas al equipo generador si la transferencia sobrecarga el equipo generador y se desprenderán en caso de sobrecarga del equipo generador.

De acuerdo con la normativa colombiana NTC 2050 [18], el sistema de emergencia se debe limitar a los circuitos esenciales de asistencia vital y de atención crítica a los pacientes. Estos dos circuitos se denominan “ramal vital” y “ramal crítico”. El ramal vital del sistema de emergencia se debe instalar y conectar a la fuente de alimentación alternativa de forma que todas las funciones especificadas aquí para esos sistemas se restablezcan automáticamente dentro de los 10 segundos después de la interrupción del servicio normal.

#### **1.4 Problemas en el suministro eléctrico en las instituciones de asistencia médica.**

El Departamento de La Guajira tiene una cobertura neta de energía eléctrica del 78%, 32.029 viviendas conectadas a la red de energía eléctrica según la Unidad de Planeación Minero-Energética. La meta nacional, según el documento Conpes 3918, es que al 2030 la cobertura de energía eléctrica deberá ser del 100% para todos los departamentos [23]. Los generadores hospitalarios también están configurados para proporcionar energía para servicios y necesidades clave. A menudo, el término energía de “emergencia” se usa para referirse a toda la energía necesaria en un generador de respaldo en un hospital. La energía de emergencia comprende solo las cargas que deben restablecerse en decenas de segundos según lo exige la NTC 2050, Sección 517 [18]. El sistema de energía crítico de un hospital podría representar fácilmente el 25% o más del requerimiento total de energía de un hospital.

Para los hospitales, la energía de emergencia es de vital importancia porque deben mantenerse en operación durante un corte de energía, que podría durar días después de un evento catastrófico. Como resultado, no es inusual ver que la energía de emergencia de un hospital excede el 50% o el 60% de las necesidades totales de energía eléctrica del edificio. La mayoría de los generadores hospitalarios están configurados para proporcionar energía de respaldo solo durante unas pocas (8-16) horas, pero los cortes de energía importantes suelen durar mucho más. Las horas de trabajo del generador diésel cuando trabaja en régimen de su potencia prime es de un número ilimitado de horas de acuerdo a lo indicado por el fabricante cuando la carga es variable, (por ejemplo, 24/7). En los hospitales se suelen emplear generadores de respaldo diésel, pero es posible que no siempre sean fiables. La alternativa a la energía de respaldo del generador diésel es la energía limpia y resistente que incluye energías renovables en el sitio; generadores de alta eficiencia como los sistemas de

cogeneración, microrredes, sistemas HRES, sistemas fotovoltaicos y en general varios tipos de generadores junto con almacenamiento de energía, para soportar múltiples cargas [24].

En la tabla 3, se muestran unos costos de referencias relacionados con el valor hora de operación y el valor mes de mantenimiento para generadores diésel de 20, 50 y 100 kVA.

*Tabla 3 Costos de referencia generadores diésel, Fuente Propia.*

Potencia (kVA)	Valor hora de operación	Valor mes mantenimiento
20	\$ 34.875,00	\$ 245.933
50	\$ 43.500,00	\$ 244.942
100	\$ 90.000,00	\$ 256.842

En [25], los autores mencionan los cinco tipos de problemas de energía que son más comunes en los centros de atención de la salud y otros centros institucionales. A continuación, se presenta la descripción de cada uno de estos problemas:

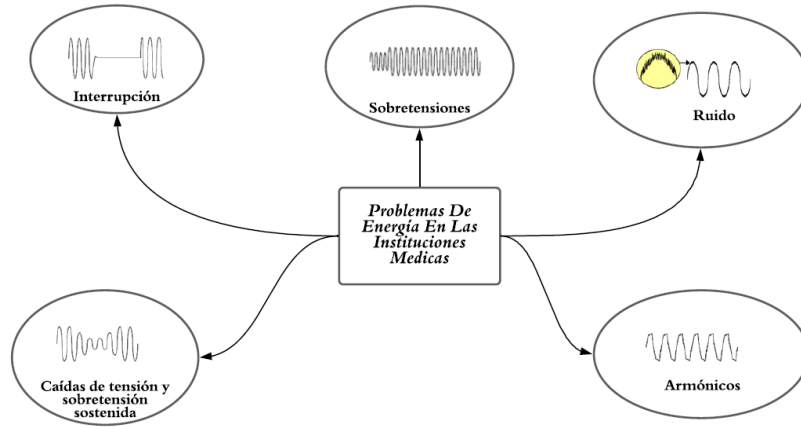
- a) **Interrupción:** Las interrupciones ocurren cuando la energía de la red pública se interrumpe y los generadores de emergencia se activan.
- b) **Caídas de tensión y sobretensión sostenida:** Las interrupciones ocurren cuando el nivel de tensión cae por debajo o aumenta por encima del rango especificado.
- c) **Sobretensiones:** Estos aumentos de tensión de corto período, comúnmente conocidos como picos de voltaje, pueden dañar los componentes electrónicos dentro de los equipos médicos y los servidores de datos.
- d) **Ruido:** El ruido eléctrico consiste en fluctuaciones de potencia pequeñas pero rápidas y repetitivas que provocan un flujo inconsistente de una onda sinusoidal de potencia al equipo.
- e) **Armónicos:** Los armónicos son voltajes o corrientes a frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental. En la mayoría de los sistemas, la frecuencia fundamental es de 60 Hz. Los armónicos pueden provocar la sobrecarga de los conductores y transformadores y el sobrecalentamiento de los motores, lo que puede provocar un incendio.

El estándar IEEE 1159-1995 [120] clasifica los fenómenos electromagnéticos que describen los problemas de la calidad de energía de la forma como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4 Categorías y características de fenómenos electromagnéticos (IEEE 1159 - 1995) [120].

Categoría	Contenido Típico Espectral	Duración Típica	Magnitud Típica del Voltaje	
<b>1.0 Transitorio</b>				
1.1 Impulsos				
1.1.1	Nanosegundos	5ns de elevación	<50 ns	
1.1.2	Microsegundos	1 ms de elevación	50ns-1ms	
1.1.3	Milisegundos	0.1ms elevación	>1ms	
1.2 Oscilatorios				
1.2.1	Baja Frecuencia	< 5kHz	0.3-50ms	0-4 pu
1.2.2	Frecuencia Media	5-500 kHz	20us	0-8 pu
1.2.3	Alta Frecuencia	0.5 - 5MHz	5us	0-4 pu
<b>2.0. Variaciones de corta duración</b>				
2.1 Instantáneas				
2.1.1	Sag		.5-30 ciclos	0.1-0.9 pu
2.1.2	Swell		.5-30 ciclos	1.1-1.8 pu
2.2 Momentáneas				
2.2.1	Interrupción		.5 ciclos -3s	< 0.1 pu
2.2.2	Sag		30 ciclos-3s	0.1-0.9 pu
2.2.3	Swell		30 ciclos-3s	1.1-1.4 pu
2.3 Temporal				
2.3.1	Interrupción		3 seg-1 min	< 0.1 pu
2.3.2	Sag		3 seg-1 min	0.1-0.9 pu
2.3.3	Swell		3 seg-1 min	1.1-1.2 pu
<b>3.0 Variaciones de larga duración</b>				
3.1	Interrup. Sostenida		>1 min	0.0 pu
3.2	Bajo voltaje		>1 min	0.8-0.9 pu
3.3	Sobrevoltaje		>1 min	1.1-1.2 pu
<b>4.0 Desbalance de V</b>			Estado Estable	0.5-2%
<b>5.0 Distorsión de Forma de Onda</b>				
5.1	Componente de CD		Estado Estable	0-0.1%
5.2	Contenido armónico	0-100 <sup>th</sup> H	Estado Estable	0-20%
5.3	Interarmónicas	0-6 kHz	Estado Estable	0-2%
5.4	Muecas en el voltaje		Estado Estable	
5.5	Ruido Banda amplia		Estado Estable	0-1%
<b>6.0 Fluctuaciones de Voltaje</b>				
	<25 Hz		Intermitente	0.1-7%
<b>7.0 Variaciones de Frecuencia</b>				
			<10 seg	

Debido a que cualquiera de estos problemas puede causar daños en el sistema eléctrico de una instalación de atención médica, los sistemas de energía de emergencia deben diseñarse de manera que para cada problema potencial se tenga en cuenta y se aborde. En la figura 5, se muestran los principales problemas de energía que se presentan en las instalaciones médicas. En el Departamento de La Guajira la duración total de la interrupción para el cliente durante un período de tiempo predefinido o SAIDI para el año 2020 fue de 95,84 horas. Así mismo, en cuanto al SAIFI, que es el índice indica la frecuencia con que el cliente experimenta una interrupción prolongada durante un período de tiempo, para este caso en fue de a 91 veces. Basado en lo anterior las interrupciones son uno de los principales problemas que enfrentan las instituciones hospitalarias [26].



*Figura 5 Problemas de energía en las Instituciones De Asistencia Médica [25].*

### 1.5 Antecedentes.

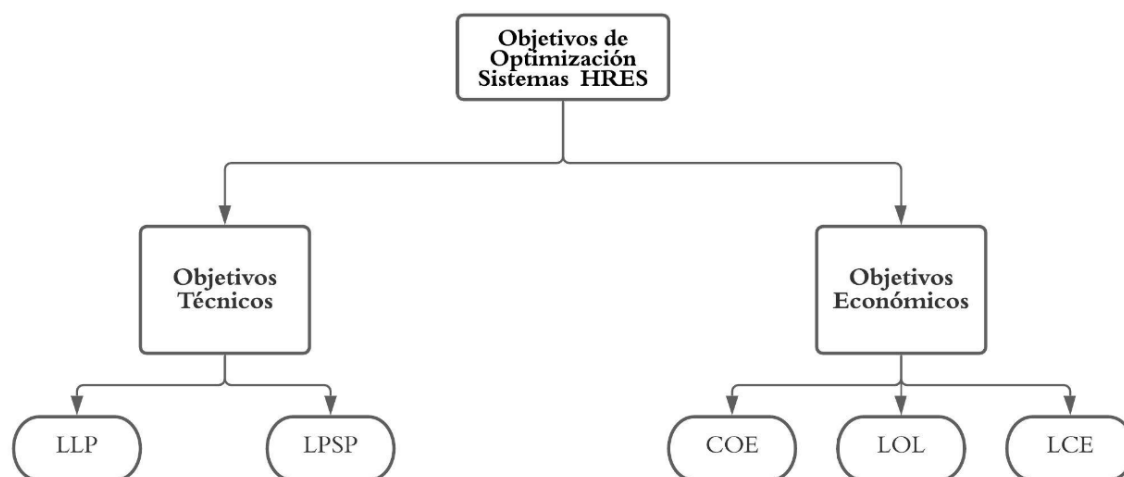
Los autores más destacados se enfrentan actualmente al problema crítico de suministrar energía de forma fiable, segura y respetuosa con el medio ambiente. El problema del suministro de energía es aún más crucial en las instalaciones hospitalarias debido a los elevados requisitos energéticos y a las cargas esenciales asociadas a los equipos médicos. Este trabajo se centra en una revisión exhaustiva del estado del arte en lo que respecta a la "optimización del flujo de energía en instalaciones hospitalarias".

Actualmente los generadores diésel (GD) se utilizan para satisfacer la demanda de carga requerida en distintos tipos de edificaciones y áreas remotas. El costo operativo de un generador diésel (GD) es alto debido a la fluctuación en el costo de los combustibles fósiles y al mantenimiento del generador. Por lo tanto, una fuente alternativa de energía como un sistema fotovoltaico o generadores eólicos ofrecen otras posibilidades para la generación de electricidad en distintos tipos de edificaciones con o sin conexión a la red de suministro energético local. Los principales impactos positivos que se obtienen cuando se realiza el cambio hacia un sistema HRES que sea confiable y factible está relacionado con las ventajas tecno-económicas de los diferentes tipos de combinaciones híbridas y con la mitigación del rápido agotamiento de las fuentes convencionales de energía que podrían causar un riesgo de desabastecimiento energético en diferentes tipos de edificaciones esenciales como, por ejemplo, las instituciones hospitalarias.

En [27], los autores realizaron una revisión sobre diferentes tipos de objetivos de optimización, estrategias de control, análisis tecno-económico y de efecto social relacionados con la implementación de sistema híbrido de energía renovable (HRES). Los autores identificaron que el diseño óptimo de estos sistemas depende de numerosos parámetros técnicos y económicos. En esta categoría se destacan los siguientes objetivos: probabilidad de pérdida de carga (LLP, siglas en inglés Loss of Load Probability) y probabilidad de pérdida de suministro eléctrico (LPSP, siglas en inglés Loss of Power Supply Probability).



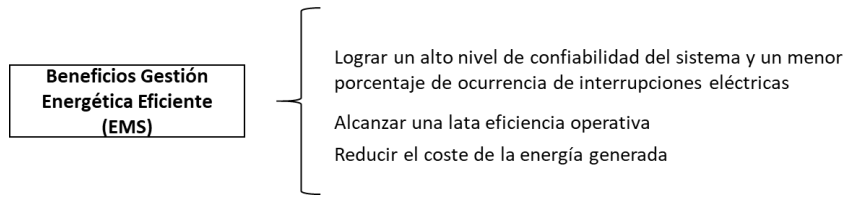
Mientras tanto los objetivos relacionados con los parámetros económicos están basados en criterios económicos como la minimización del costo del ciclo de vida (LOL, siglas en inglés Loss of Life Cost), Costo de energía (COE, siglas en inglés Cost of Energy), Ciclo de vida de la energía (LCE, sigla en inglés Life Cycle Energy) y varias optimizaciones relacionadas con los costos. En la figura 6, se presentan el análisis realizado sobre los objetivos de optimización para el sistema (HRES) más investigados en la literatura.



*Figura 6 Objetivos de optimización sistema híbrido de energía renovable (HRES), Fuente [27]*

Una estrategia de gestión de la energía (Energy Management Systems, EMS) puede integrarse conjuntamente con la optimización para garantizar la continuidad del suministro de carga y reducir el costo de producción de energía del sistema híbrido de energía renovable (HRES). Por lo tanto, la gestión de la energía es un término que recoge todos los procedimientos sistemáticos para controlar y minimizar la cantidad y el costo de la energía utilizada por una edificación en específico. La estrategia de gestión de la energía suele depender del tipo de sistema energético y sus componentes.

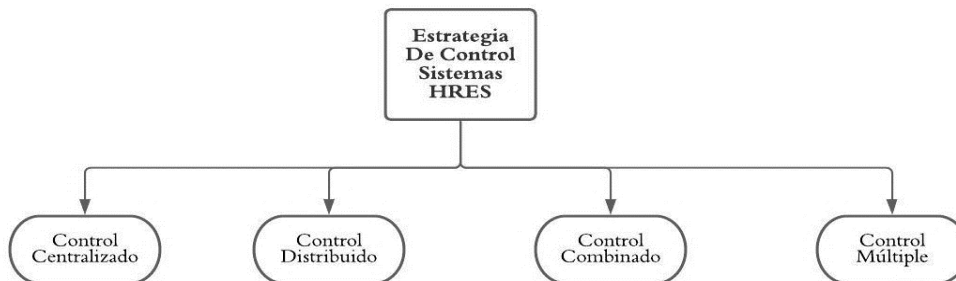
Siempre que se utiliza más de una fuente de energía para suministrar una determinada carga, surge la necesidad de una estrategia de gestión energética eficiente (EMS). En [28], los autores insisten en que una estrategia guía el flujo de energía a través del sistema de suministro. Esta necesidad no solo es esencial para un sistema híbrido autónomo, sino también para los sistemas híbridos de energía renovable que están conectados a la red principal. Los muchos roles de esta estrategia en los sistemas autónomos son asegurar la continuidad del suministro de carga en todas las condiciones, y otros objetivos como los propuestos en la figura 6, que permiten proteger a los componentes de distintos daños eléctricos y mecánicos. Por lo tanto, los autores concluyeron que adoptar una determinada estrategia de gestión energética es fundamental para controlar el flujo de energía entre los componentes del sistema HRES. En la figura 7, se pueden observar algunos de los objetivos que se pueden obtener si se aplica una determinada estrategia de gestión energética.



**Figura 7 Beneficios gestión energética eficiente (EMS) [28].**

Las estrategias de gestión energética eficiente (EMS) van integradas con estrategias de control para el sistema HRES, porque los diferentes tipos de configuraciones de estos sistemas tienen varios componentes y muchos de ellos son de naturaleza variable, como las fuentes convencionales y las fuentes de energías renovables. Por lo tanto, es fundamental controlar la naturaleza variable de cada componente del sistema. Aplicando una estrategia de control adecuada, se puede obtener una solución óptima con mayor confiabilidad y menor costo para el sistema HRES.

A raíz de lo anterior, surge el siguiente interrogante *¿Por qué implementar un controlador en un sistema HRES?* La implementación del controlador es esencial porque nos permite monitorear y controlar diferentes variables de acuerdo con los requisitos de carga y a su vez también nos permite controlar la tensión de salida, la frecuencia y la potencia activa de los diferentes elementos de potencia del sistema. En la figura 8, se muestran las cuatro categorías de controladores más implementadas que permiten controlar el funcionamiento del sistema HRES.



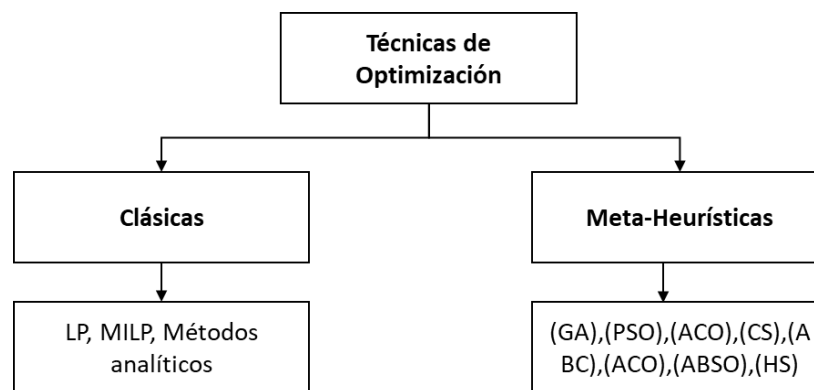
**Figura 8 Estrategias De Control Sistemas HRES, Fuente [27].**

Las principales ventajas y desventajas de las arquitecturas de control centralizado y distribuido para el sistema HRES se resumen en la tabla 5.

*Tabla 5 Ventajas y desventajas control centralizado/distribuido [28].*

Arquitectura del Controlador	Ventajas	Desventajas
<b>Control Centralizado</b>	La arquitectura es la más adecuada para la gestión de energía multiobjetivo en sistemas híbridos.	Tiempo de cálculo prolongado.
	Puede lograr una optimización global basada en la información proporcionada.	Sujeto a falla de un solo punto.
<b>Control Distribuido</b>	Se resuelve mejor con algoritmos de Inteligencia Artificial (IA)	Comunicación compleja entre los controladores locales.
	Reducción de los tiempos de cálculos.	

El sistema HRES, debe diseñarse y planificarse de forma óptima para garantizar la generación de energía con el mínimo costo, la máxima confiabilidad y una alta eficiencia. En [29], los autores difieren entre sí sobre las técnicas de optimización utilizadas para diseñar y planificar de forma óptima el sistema HRES. Estas técnicas pueden clasificarse en clásicas, meta heurísticas y programas informáticos. En la figura 9, se muestra el esquema de las diferentes técnicas de optimización utilizadas para resolver este problema.



*Figura 9 Técnicas de Optimización, Fuentes [27-29].*

Las técnicas clásicas [29], se basan en métodos iterativos como son los análisis numéricos, analíticos, construcción probabilística y gráfica. Estos métodos están basados en el cálculo diferencial para resolver el problema de forma óptima. Dentro de las técnicas que más se utilizan se encuentra la programación lineal (LP), LP entero mixto (MILP), esquema iterativo y métodos analíticos. Los métodos LP y MILP se utilizan cuando la función objetivo y sus restricciones implican expresiones lineales y las variables de decisión son continuas.

Las técnicas meta-heurísticas [29], se aplican debido a la complejidad de los sistemas basados en fuentes de energías renovables porque las técnicas clásicas no garantizan una solución para resolver estos complejos problemas de optimización. Por lo tanto, estas técnicas basadas en algoritmos meta-heurísticos se han utilizado ampliamente en la literatura, porque son una buena alternativa para problemas complejos, particularmente si son altamente no lineales y si combinan variables enteras y son capaces de dar una buena solución para sistema HRES. Dentro de las técnicas meta-heurísticas más aplicadas se encuentran los algoritmos genéticos

(GA), optimización por enjambre de partículas (PSO), optimizador de colonias de hormigas (ACO) y búsqueda de cuco (CS).

Sin embargo, en [27-29], los autores también indican que se han aplicado diversas estrategias para el modelado y control de sistema HRES. Se destacan los siguientes softwares de diseño como: HOMER, HYBRID2, RETScreen etc.

A continuación, se presentan algunos casos de estudio donde se aplicaron técnicas de optimización para el diseño óptimo y análisis económico de sistema HRES.

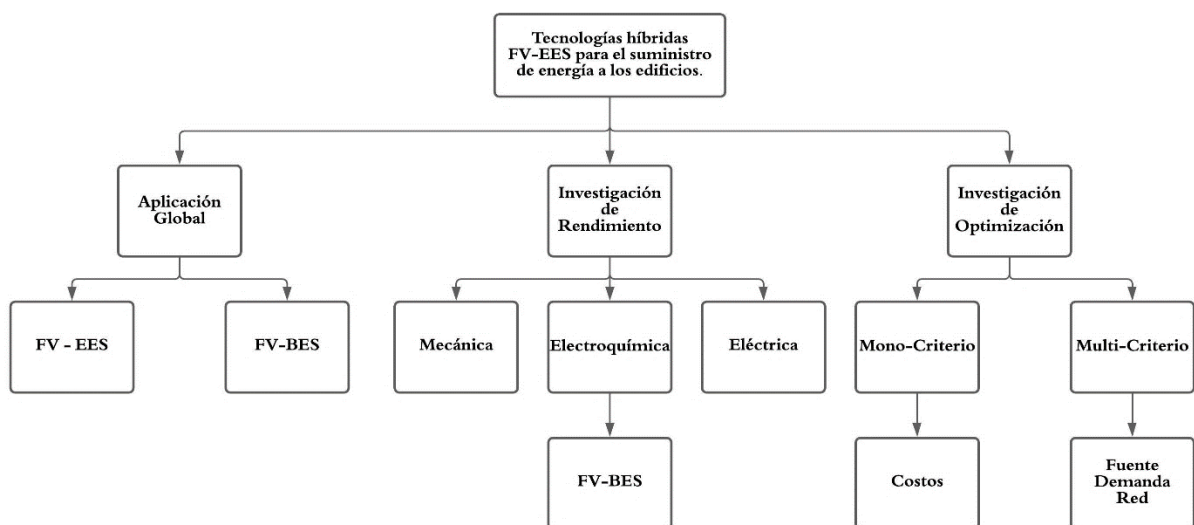
En [30], los autores propusieron modelos matemáticos para caracterizar el panel fotovoltaico, el generador eólico y la batería. El segundo paso consistió en optimizar el dimensionamiento de un sistema de acuerdo con los conceptos de probabilidad de pérdida de suministro eléctrico (LPSP) y costo nivelado de energía (LCE). La metodología desarrollada consistió en encontrar la configuración óptima, entre un conjunto de componentes del sistema, que cumplan con los requisitos de confiabilidad del sistema (LPSP) y con el valor más bajo del costo nivelado de energía (LCE). De acuerdo a las distintas simulaciones realizadas, concluyeron que la elección de los dispositivos del sistema representa un paso importante en el dimensionamiento óptimo del sistema híbrido fotovoltaico / eólico. Así mismo para reducir el exceso de energía, correspondiente al LCE más bajo, el uso de una tercera fuente de energía (diésel) puede traer beneficios al sistema.

Mientras tanto en [31], los autores validaron el diseño óptimo y la viabilidad tecno-económica de un sistema HRES para aplicaciones de electrificación en áreas rurales. El problema de optimización planteado, lo resolvieron gracias al desarrollo de una estrategia de control que fue configurada para la gestión del flujo de energía entre los diferentes módulos del sistema. La estrategia de control fue buena y mantuvo en rangos aceptables los estados de carga de las baterías y la demanda neta en cada período de tiempo de la simulación. Estas estrategias las utilizaron para controlar el encendido - apagado del grupo electrógeno y el suministro de energía continuo a la carga y también para garantizar el logro de un menor tiempo de funcionamiento del grupo electrógeno, un menor crecimiento de contaminantes en el medio ambiente a un costo de electricidad razonable. Gracias al desarrollo de esta estrategia de despacho se identificó que la compañía puede tener beneficios tanto económicos y de rendimiento, ya que el costo total del sistema (NPC) total y el costo de generación de energía fueron positivos y además el rendimiento anual de la batería fue de 36.648 kWh/año.

Otro caso de implementación de sistema HRES se presenta en [32], donde los autores investigaron el efecto de la gestión del lado de la demanda (DSM) en el tamaño del sistema híbrido propuesto. Para comprobar esto desarrollaron una metodología para el dimensionamiento óptimo de un sistema híbrido de baterías/ Turbinas eólicas. La metodología se basó en el concepto de probabilidad de pérdida de suministro eléctrico (LPSP) y el costo anual del sistema (ASC). El proceso de optimización tuvo como objetivo obtener la mejor configuración que se adapte a la carga. La configuración del sistema que puede cumplir con el LPSP deseado a un costo mínimo la obtuvieron utilizando un algoritmo de optimización; algoritmo de búsqueda de retroceso (BSA). De esta forma, los autores demostraron la influencia del perfil de carga en el factor LPSP.

En [33], los autores investigaron sobre los beneficios que aporta una mejora de la resiliencia energética que se podría conseguir instalando una microrred en un hospital alimentado por fuentes de energía renovables. El dimensionamiento del suministro de energía para cargas críticas lo abordaron desde el punto de vista económico, tratando de minimizar los costos (o incluso maximizar los beneficios de la venta de energía excedente a la red), al tiempo que analizaron la capacidad de resiliencia considerando tanto la probabilidad de interrupción como la duración en una red eléctrica moderna de un país desarrollado, que resulta mucho más realista en escenarios de la vida real. Por lo tanto, el modelo de optimización que desarrollaron lo resolvieron aplicando un programa lineal de entera mixta (MILP), cuya función objetivo es el costo del ciclo de vida (LCC), esto sujeto a una variedad de restricciones enteras y no enteras para garantizar que tanto las cargas térmicas y eléctricas se cumplan en cada paso de tiempo. Además, utilizaron el software REopt donde evaluaron la viabilidad económica del uso conjunto de la energía solar fotovoltaica, baterías de iones de litio y generadores diésel. De acuerdo con las simulaciones realizadas, los autores destacaron que la microrred podría ahorrar aproximadamente \$ USD 440,191 en promedio durante un ciclo de vida de 20 años de la instalación (considerando la mitigación de la energía proporcionada por la red eléctrica como las pérdidas evitadas durante las probables interrupciones del servicio de energía), al tiempo que aumenta el mínimo resiliencia de la instalación más de 34 h.

Un buen sistema de almacenamiento de energía puede ser beneficioso para una buena gestión de demanda de energía en un sistema HRES. En [34], los autores realizaron la revisión de los sistemas híbridos de almacenamiento de energía fotovoltaica para la generación de energía y el suministro a edificios. En la figura 10, se muestran las tecnologías híbridas FV-EES para el suministro de energía a los edificios.



**Figura 10 Tecnologías Híbridas FV-EES Para Edificaciones,[34].**

En la tabla 6 se presentan algunos artículos relacionados con esta investigación.

**Tabla 6 Artículos de referencias, Fuente Propia**

Nombre Del Artículo	Metodología Desarrollada	Técnica de Optimización	Conclusiones
<b>Modeling and Simulation of Smart Grid Integrated with Hybrid Renewable Energy Systems,[35]</b>	Modelo matemático de un esquema de integración híbrido-acoplado (CC/CA).	Clásica (LP)	La elección de la configuración adecuada depende del tipo de salida potencia de salida de la mayoría de la generación y las cargas.
<b>Modelling and performance analysis of a stand-alone hybrid solar PV/ Fuel Cell/Diesel Generator power system for university building,[36].</b>	Método de optimización que se basa en la carga de CA del edificio, las capacidades de los sistemas de generación de energía distribuida y las restricciones de diseño (reducir el costo de energía - costo actual neto).	Meta-Heurística (Algoritmo de Búsqueda)	El sistema de energía renovable híbrido (HRES) autónomo propuesto tiene una alta fracción renovable (66,1%), es económicamente factible (92 \$ / MWh) y respetuoso con el medio ambiente (24 kg CO <sub>2</sub> / MWh).
<b>Modelling and optimization of an off-grid hybrid renewable energy system for electrification in a rural áreas,[37 -38]</b>	Método de optimización para reducir el Costo Preestablecido Neto del Sistema (TNPC).	Meta-Heurística (Algoritmo Genético (GA)) y Software HOMER Pro.	Al comparar las cuatro combinaciones de HRES con HOMER y GA, la optimización basada en GA es más rentable que con HOMER con un COE mínimo de 0,163 \$ / kWh y 0%
<b>Multi-objective optimization framework of a photovoltaic-diesel generator hybrid energy system considering operating reserve,[39].</b>	Optimización Multiobjetivo para diseñar un Sistema HRES	Meta-Heurística (MO-CSA)	Los resultados simulados muestran que, al considerar la reserva operativa, el tamaño (correspondientemente el costo) la confiabilidad del sistema aumenta significativamente.
<b>Optimal Energy Management for Off-Grid Hybrid System using Hybrid Optimization Technique,[40].</b>	Estrategia óptima de gestión de la energía para microrredes o sistemas híbridos (HRES).	Meta-Heurística Jaya y Particle Swarm Optimization (PSO)	Además de satisfacer las demandas eléctricas y térmicas residenciales, se minimizan los costes anuales de operación y las emisiones de CO <sub>2</sub> , respectivamente.
<b>Optimal operation of a grid-connected hybrid PV/fuel cell/battery energy system for residential applications[41].</b>	Modelo de optimización para el sistema de energía residencial basado en Sistema FV / Pila de combustible / Batería	Clásica (MILP)	La introducción del sistema da un desempeño económico, energético y ambiental satisfactorio.

Otro tema a tener en cuenta está relacionado con las estrategias de control para sistema HRES. En [42], los autores estudiaron sobre cómo encontrar el tamaño óptimo y la estrategia de control que produzca el mínimo costo de energía. El modelo matemático desarrollado está basado en dos estrategias de control que son: La estrategia de seguimiento de carga (LF) y la de carga cíclica (CC). A partir de esto, simularon varios tamaños de componentes para los sistemas fotovoltaico y de batería utilizando ambas estrategias de control. En concordancia y a partir de distintas simulaciones realizadas, los autores destacaron que obtuvieron una reducción del 10,6% en el costo de la electricidad (COE) utilizando un Sistema FV-Batería-Diésel. Con respecto a la configuración destacaron que la mejor de todas las opciones la obtuvieron utilizando la estrategia de seguimiento de carga (LF) que está conformada por 60 kW de paneles solares fotovoltaicos y un sistema conformado por 3 baterías, y un generador diésel de 50 kW.

Sin embargo, en [43] los autores se enfocaron en desarrollar una herramienta para el control y gestión de un sistema HRES conformado por un sistema fotovoltaico y eólico con un sistema de almacenamiento alterno. Su principal aporte consistió en el desarrollo de un algoritmo de control óptimo que permita extraer la potencia máxima de las distintas fuentes de energía aplicando una estrategia de control para una gestión óptima de los flujos de energía dentro del sistema. Dentro de sus principales conclusiones, destacaron que el algoritmo desarrollado puede mejorarse adoptando otras técnicas no convencionales como las redes neuronales, la lógica difusa o los algoritmos genéticos para optimizar aún más la gestión energética del sistema.

En la tabla 7, se muestran los aspectos considerados y no considerados para identificar claramente los aspectos que aún no han sido enfrentados en el estado del arte y que son considerados en esta investigación.

*Tabla 7 Aspectos relevantes de esta investigación.*

Item	Problema Principal	Estrategias de Control	Métodos Matemáticos	Optimización Heurística	Software de Simulación
[81]	Problema de la gestión de la energía.	Sí	No	Sí	Sí
[82]	Optimización del tamaño - Sistema híbrido	Sí	No	Sí	Sí
[83]	Optimización del tamaño - Sistema híbrido	No	No	Sí	Sí
[84]	Optimización de Estrategias de Operación – Sistemas Híbridos.	Sí	Sí	Sí	Sí
<b>Metodología Propuesta</b>	<b>Optimización de Flujo de Energía</b>	No	Sí	Sí	Sí

## **CAPITULO 2.**

Este capítulo está conformado por cuatro secciones en las cuales se describe lo siguiente. En la primera sección se indaga sobre las soluciones que han implementado en otras latitudes para resolver este problema de investigación. En la segunda sección se destacan algunos métodos matemáticos utilizados por distintos investigadores. En la tercera y cuarta sección se identifican las soluciones que pueden adaptarse para resolver esta investigación teniendo en cuenta la hipótesis de investigación formulada de acuerdo con los antecedentes encontrados en la literatura y que están relacionados con sistema HRES.

### **2.1. Solución del problema en otras latitudes.**

A continuación, en esta sección se describe todo lo relacionado con la optimización y los métodos heurísticos aplicados a sistema HRES.

En [44], los autores resaltaron los métodos de resolución que permiten resolver los flujos óptimos de potencia (OPF) y su aplicación en microrredes eléctricas de baja potencia con generación fotovoltaica. Destacaron que el flujo de potencia óptimo (OPF) consiste en resolver las ecuaciones que caracterizan un sistema eléctrico ajustando los valores de las variables de control para optimizar un parámetro específico del sistema, que se obtiene maximizando o minimizando una función objetivo.

La microrred de baja potencia que propusieron para el caso estudio se destaca por su sencillez y por la presencia de un generador no convencional. Su potencia era de 800 W, con alimentación directa a través de la red principal y de un generador fotovoltaico, que a una temperatura e irradiación determinadas generaban 450 W (microrred interconectada) [44]. Basado en lo anterior, los autores propusieron un algoritmo matemático basado en método del gradiente para la solución del flujo óptimo de potencia (OPF) en microrredes de baja potencia, con el fin de mejorar los perfiles tensión y reducir las pérdidas de potencia activa. Finalmente, uno de los resultados de la aplicación del método de gradiente es la obtención de una microrred de baja potencia con generación fotovoltaica.

En [45], los autores validaron el diseño óptimo y la viabilidad técnico-económica de un sistema HRES para aplicaciones de electrificación en áreas rurales. En este caso la aplicación de esta investigación consistió en un sistema de energía para una microrred instalada en la aldea de Korkadu, región de Puducherry, India. Basados en los datos históricos de carga, los autores realizaron la predicción de la demanda futura del pueblo a través de la técnica ANN. Luego diseñaron la estructura del sistema HRES de acuerdo a la disponibilidad de recursos, cuyo objetivo principal es el de satisfacer la demanda desarrollada a través del dimensionamiento óptimo. El sistema HRES seleccionado logró satisfacer las necesidades eléctricas de manera óptima porque consta de una matriz fotovoltaica solar, una turbina eólica, un generador de energía de biomasa y un sistema de batería de respaldo de manera efectiva que logra satisfacer la demanda esperada de la aldea de 179,32 kWh/día.



## 2.2. Métodos matemáticos aplicados.

Los problemas de optimización pueden dividirse en las siguientes categorías generales [46]:

- Según el tipo de variables de decisión.
- De acuerdo a la(s) función(es) objetivo.
- De acuerdo a las restricciones.

En la figura 11, se muestran los tipos de problemas de optimización más estudiados e implementados en la literatura.

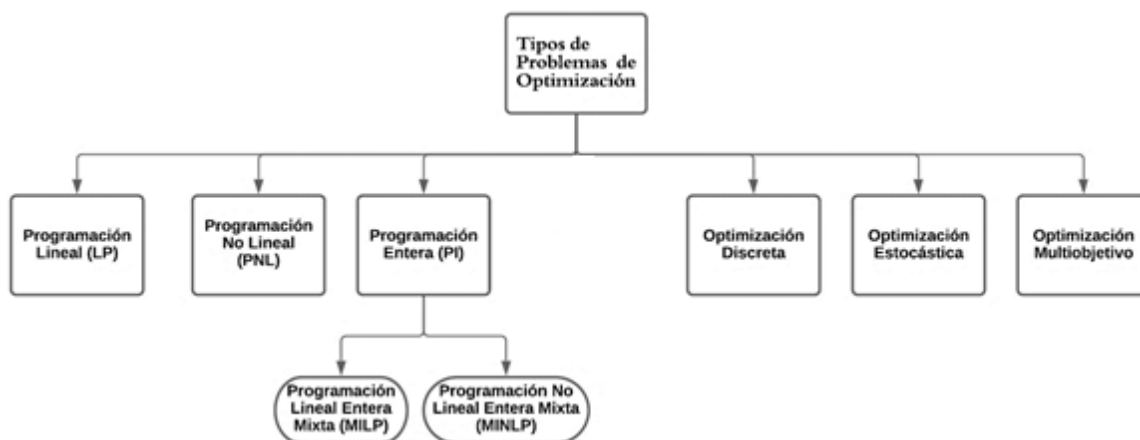


Figura 11 Tipos de Problemas de Optimización, Fuente Propia.

A continuación, se describen los tipos de problemas de optimización más estudiados en la literatura estos son [46]:

- **Programación Lineal (LP):** La función objetivo y las restricciones son lineales. Las variables de decisión implicadas son escalares y continuas.
- **Programación No Lineal (NLP):** La función objetivo y/o las restricciones son no lineales. Las variables de decisión son escalares y continuas.
- **Programación Entera (PI):** Las variables de decisión son escalares y enteros.
- **Programación Lineal Entera Mixta (MILP):** La función objetivo y las restricciones son lineales. Las variables de decisión son escalares; algunas de ellas son enteras mientras que otras son variables continuas.
- **Programación No Lineal Entera Mixta (MINLP):** Un problema de programación no lineal que incluye variables de decisión tanto enteras como continuas.
- **Optimización Discreta:** Problemas que implican variables de decisión discretas.
- **Programación Estocástica u Optimización Estocástica:** También denominada optimización bajo incertidumbre. En estos problemas, la función objetivo y/o las restricciones tienen variables inciertas (aleatorias). A menudo incluye las categorías anteriores como subcategorías.
- **Optimización Multiobjetivo:** Problemas que implican más de un objetivo. A menudo incluye las categorías anteriores como subcategorías.

La optimización implica varios pasos. Estos son los siguientes:

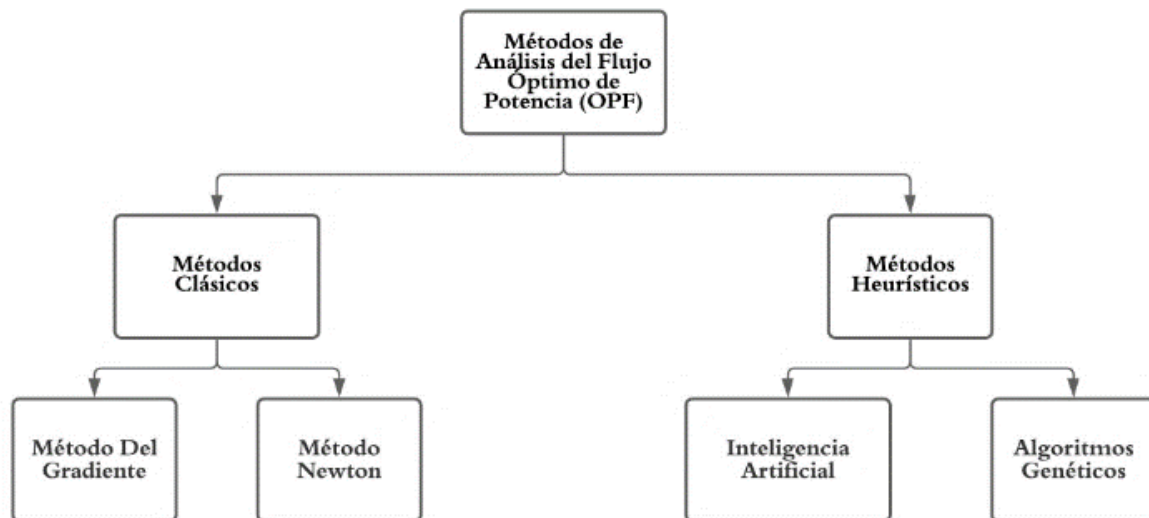
1. Comprender el sistema.
2. Encontrar una medida de la eficacia del sistema.
3. Analizar los grados de libertad y aplicar un algoritmo de optimización adecuado para encontrar la solución.

En resumen, la optimización es un proceso sistemático de toma de decisiones.

*¿Como resolver los Flujos Óptimos de Potencia en sistema híbridos de energía renovable (HRES)?*

Una solución óptima para los flujos de potencia, proporciona información importante para la planificación, programación económica, control y la futura expansión del sistema híbrido de energía renovable (HRES).

A continuación, se presenta una recopilación sobre los métodos de análisis del flujo óptimo de potencia (OPF) aplicados en sistema HRES y microrredes eléctricas. Dentro de estos, se destacan los métodos de optimización clásicos y los métodos de optimización heurísticos. Esto se puede observar en la figura 12.



*Figura 12 Métodos de Análisis del Flujo Óptimo de Potencia (OPF) [46].*

Los métodos clásicos (Método del Gradiente y el Método de Newton) se utilizan en forma general para resolver problemas de optimización no lineales sin restricciones. Sin embargo, para la formulación de un flujo óptimo de potencia (OPF) se deben tener en cuenta algunas restricciones, lo cual aumenta la complejidad del problema y hace necesaria que se implementen otros métodos como los heurísticos.

La técnica de optimización basado en los enfoques deterministas nos ayudas a evaluar posibles soluciones factibles de un problema planteado y formulado entre muchos, hasta lograr obtener la solución óptima. Mientras tanto la técnica de optimización basada en

enfoques estocásticos busca la solución en un escenario que depende del azar. En concreto, cuando se utiliza este tipo de enfoques se busca generar una solución para varios escenarios que se pueden establecer bajo una condición probabilística. En la tabla 8, se presentan las ventajas y desventajas entre las técnicas de optimización que utilizan enfoques deterministas y estocásticos [46].

*Tabla 8 Ventajas y Desventajas entre las Técnicas de Optimización, Fuente Propia.*

<b>Técnica de Optimización</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Enfoques Deterministas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eficiente en sistemas de potencia únicos.</li> <li>- No es costoso computacionalmente.</li> <li>- Requieren menos funciones objetivo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No es eficiente en sistemas de energía múltiple.</li> <li>- Gran dependencia de la solución inicial.</li> </ul>
<b>Enfoques Estocásticos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta eficiencia en sistemas de potencia única y múltiple.</li> <li>- Evita soluciones locales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Computacionalmente costoso.</li> <li>- No tiene una rápida convergencia.</li> </ul>

### **2.3. Caracterización de los sistemas híbridos de energía renovables (HRES).**

En esta sección se describe la mejor solución que se adoptó al problema de investigación. En específico se abordó todo lo relacionado con los sistemas HRES cuya sigla en inglés es (Hybrid Renewable Energy Systems (HRES)). La clasificación realizada está basada en la potencia suministrada, en los diferentes tipos de configuraciones que se pueden implementar y los componentes que generalmente conforman estos sistemas.

#### **2.3.1. Definición sistemas HRES.**

Los sistemas HRES pueden encontrarse en la literatura bajo diferentes términos y definiciones que integran el concepto general de recursos energéticos distribuidos (DER) o generación distribuida (DG).

Por un lado en [47], proponen que "*Los sistema híbrido de energía renovable (HRES) consisten en dos o más fuentes de energía, con al menos una de ellas renovable e integrada con equipo de control de potencia y un sistema de almacenamiento opcional*" y por otro lado en [48], proponen que "*Los sistema híbrido de energía renovable (HRES) se definen como la integración de varios tipos de equipos de generación de energía, como generadores de energía eléctrica, sistemas de almacenamiento de energía eléctrica y fuentes de energía renovable*". Se puede utilizar cualquiera de las dos definiciones presentadas para referirse al sistema (HRES).

A continuación, en la figura 13 se presenta un análisis de las áreas del conocimiento donde más se han publicado investigaciones relacionados con los sistemas HRES en el periodo comprendido entre los años 2015 - 2020.

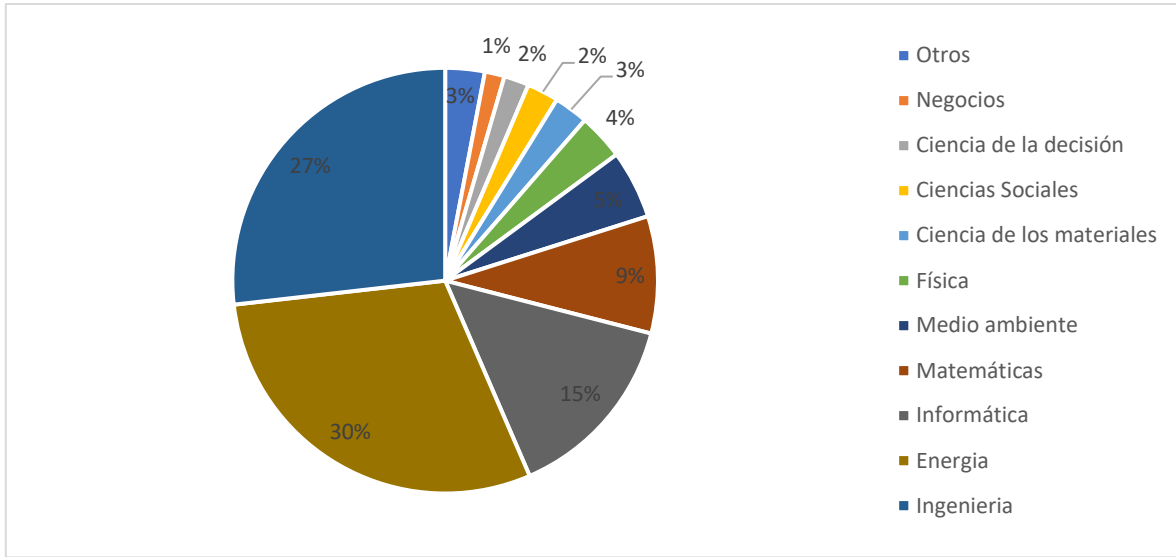


Figura 13 Áreas académicas asociadas a los sistemas HRES, Fuente Scopus.

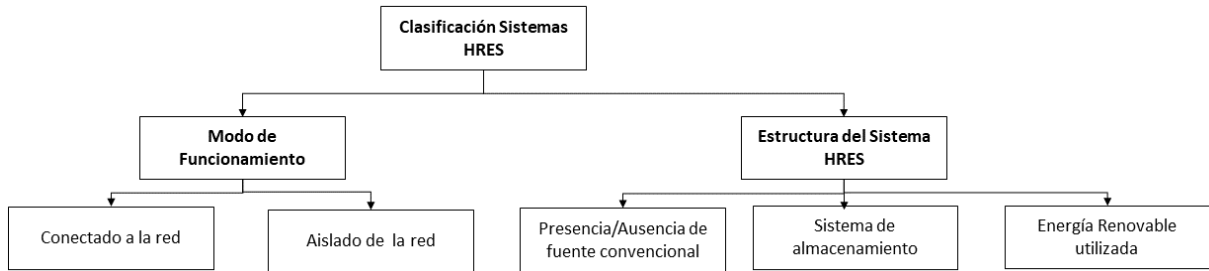
### 2.3.2. Clasificación de los sistemas HRES.

La potencia suministrada por el sistema híbrido puede variar desde unos pocos vatios (W) para aplicaciones domésticas hasta unos pocos megavatios (MW) para los sistemas utilizados en la electrificación de las islas pequeñas. Finalmente, en [49 -50], de acuerdo a la tabla 9 realizaron la clasificación de estos sistemas de acuerdo a la escala de su potencia e indicaron algunas aplicaciones para estos mismos.

Tabla 9 Clasificación de los sistemas HRES [49-50].

Potencia del sistema híbrido	Potencia (kW)	Aplicaciones
<b>Baja Potencia</b>	<5	Sistemas autónomos: bombeo de agua, estaciones de telecomunicación
<b>Potencia media</b>	10 -250	Sistemas micro aislados, pueblos rurales pequeños
<b>Gran poder</b>	>500	Grandes sistemas aislados, por ejemplo: islas

En [49] realizaron una revisión sobre los sistemas HRES utilizados para la generación de electricidad. En la figura 14, se realiza una clasificación de los sistemas (HRES) de acuerdo a su modo de funcionamiento y al tipo de estructura.



**Figura 14 Clasificación sistemas HRES [49].**

De acuerdo a la figura 14, los sistemas HRES pueden agruparse en dos categorías. La primera categoría incluye los sistemas híbridos que están conectados a la red y que funcionan en paralelo con la misma. En la segunda categoría, se encuentran los sistemas híbridos autónomos. Estos sistemas están aislados de la red.

La estructura del sistema híbrido puede dividirse en tres tipos de sistemas [51]:

- **La presencia o ausencia de una fuente de energía convencional**

El sistema HRES puede contener una fuente de energía convencional, como un generador diésel o simplemente una planta completa para los sistemas híbridos conectados a la red.

- **La presencia o ausencia de capacidad de almacenamiento**

Para los sistemas HRES autónomos, es necesaria la presencia de un dispositivo de almacenamiento. En caso de insuficiencia de la fuente primaria, el almacenamiento satisface la carga.

- **La fuente de energía renovable utilizada**

La estructura de un sistema HRES debe incluir una fuente de energía renovable, ya sea un generador fotovoltaico o una turbina eólica, o incluso una combinación de sus fuentes. El potencial energético disponible (irradiación solar, velocidad del viento, etc.) es muy importante para la elección de la fuente.

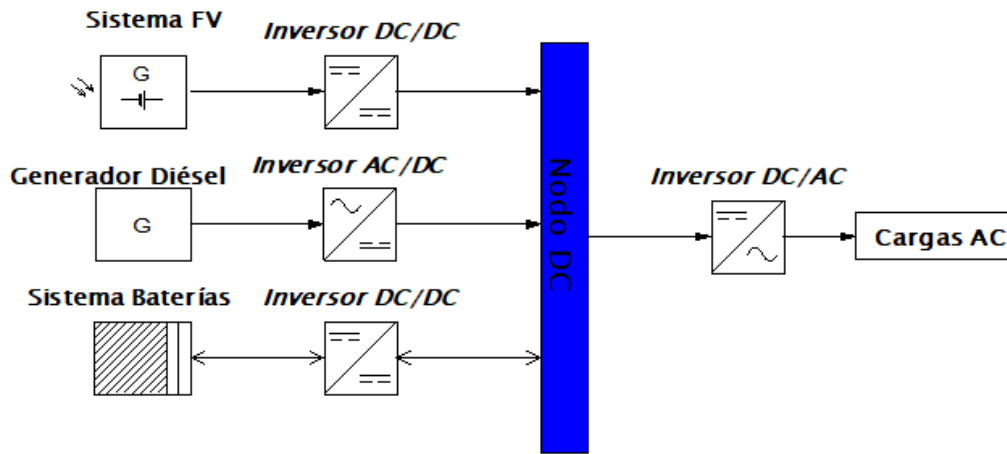
### **2.3.3 Configuraciones de los sistemas híbridos.**

La primera y más básica decisión a la que se enfrenta un diseñador de sistemas de energía es qué arquitectura utilizar. A continuación, se resaltan las principales configuraciones de los sistemas HRES [50,51,52].

#### **2.3.3.1 Configuración HRES acoplada en DC.**

En el sistema HRES que se presenta en la figura 15, la energía suministrada por cada fuente está centralizada en un nodo de corriente directa (DC). Por lo tanto, el sistema de conversión de energía para proporcionar energía de corriente alterna (AC) está conformado por tres inversores DC/AC. Los generadores se conectan en serie con los inversores para alimentar las cargas alternativas. Los inversores deben suministrar las cargas alternativas desde el nodo de DC y debe seguir el punto de ajuste de la amplitud y la frecuencia. Las baterías están dimensionadas para suministrar las cargas de pico. La ventaja de esta topología es la

simplicidad de funcionamiento, y la demanda de carga se satisface sin interrupción incluso cuando los generadores cargan las unidades de almacenamiento a corto plazo [50 -51].



*Figura 15 Configuración HRES acoplada en DC [50-51].*

### 2.3.3.2 Configuración HRES acoplada en AC.

En esta topología, todos los componentes del sistema HRES están relacionados con las cargas AC, como se muestra en la figura 16. Esta configuración proporciona un rendimiento superior en comparación con la configuración anterior, ya que cada inversor puede sincronizarse con el generador de manera que pueda suministrar la demanda de forma independiente y simultánea con otros inversores. Esto proporciona flexibilidad a las fuentes de energía que suministran la demanda. En el caso de una demanda baja, el generador diésel y sistemas de baterías no suministran energía y solamente se utiliza el sistema fotovoltaico para cubrir la demanda. Sin embargo, durante las demandas de carga pesadas o durante las horas punta, los generadores y el sistema de baterías funcionan en paralelo para cubrir las demandas altas. La realización de este sistema es relativamente complicada debido al funcionamiento en paralelo, al sincronizar los voltajes de salida con los voltajes de carga. Esta topología tiene varias ventajas en comparación con la topología acoplada en DC, dentro de las cuales se destacan una mayor eficiencia, tamaños más pequeños de la unidad de acondicionamiento de energía mientras se mantiene un alto nivel de la disponibilidad de energía, y el funcionamiento óptimo del generador diésel debido a la reducción su tiempo de funcionamiento y por consiguiente su costo de mantenimiento [50 - 51].

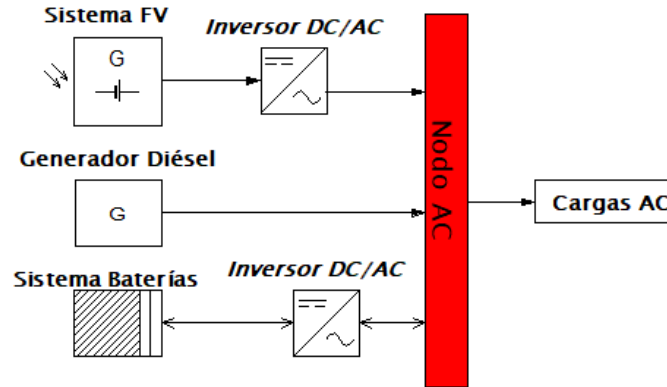


Figura 16 Configuración HRES acoplada en AC [50 - 51].

### 2.3.3.3 Configuración HRES acoplada en AC/DC.

La configuración del sistema HRES mediante los nodos de AC y DC se muestra en la figura 17. Estos tienen un rendimiento superior en comparación con las configuraciones anteriores. En este caso, los generadores de energía renovable y diésel pueden alimentar una parte de la carga directamente a AC, lo que puede aumentar el rendimiento del sistema y reducir la potencia nominal del generador diésel y del inversor. El generador diésel y el inversor pueden funcionar de forma independiente o en paralelo sincronizando sus tensiones de salida. Los convertidores situados entre dos buses (el convertidor y el inversor) pueden ser sustituidos por un convertidor bidireccional que, en funcionamiento normal, realiza la conversión DC/AC (funcionamiento del inversor). Cuando hay un excedente de energía del generador diésel, también puede cargar las baterías (funcionando como convertidor). El inversor bidireccional puede suministrar la carga máxima cuando el generador diésel se sobrecarga [50-51].

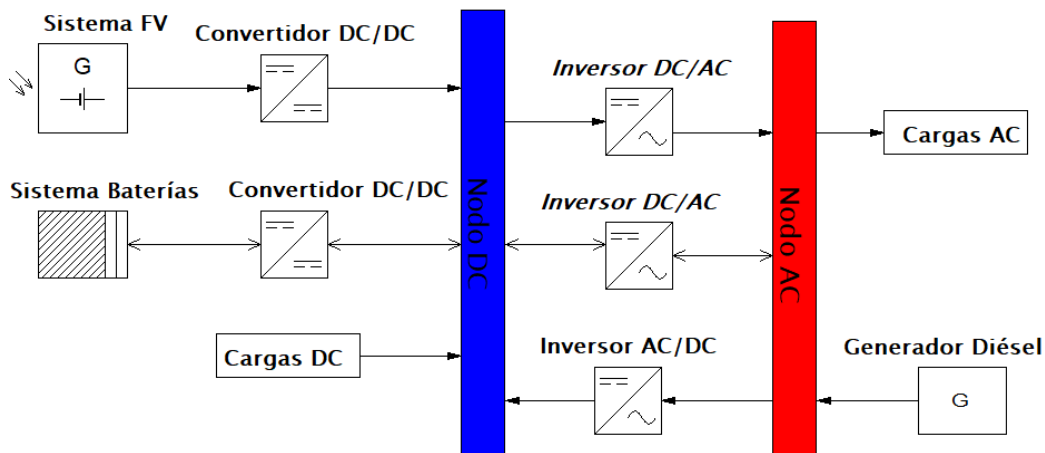


Figura 17 Configuración HRES acoplada en AC/DC [50 - 51].

A continuación, en la tabla 10 se muestra las ventajas y desventajas para las configuraciones estudiadas para los sistemas HRES [52].

*Tabla 10 Ventajas y Desventajas de los sistemas HRES [52].*

<i>No.</i>	<i>Tipo de esquemas</i>	<i>Recursos AC</i>	<i>Recursos DC</i>	<i>DG</i>	<i>Convertidores</i>	<i>Inversores</i>	<i>Sistema de Almacenamiento</i>	<i>Méritos</i>	<i>Desméritos</i>
<i>1</i>	<i>Acoplado DC</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>No</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>La configuración es simple y no hay sincronización. Uno de los convertidores debe encargarse del control de tensión en el nodo común.</i>	<i>Si el convertidor DC/AC falla, todo el sistema no podrá suministrar energía de AC a las cargas de AC.</i>
<i>2</i>	<i>Acoplado CA</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>No</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>Este esquema es muy adecuado para aplicaciones en áreas rurales y urbanas, incluyendo hogares, comunidades y cargas comerciales e industriales de pequeña escala.</i>	<i>La sincronización se requiere para que coincida con la línea del nodo de AC y la salida entrante del generador que se deriva de los recursos de energía renovable de DC/AC.</i>
<i>3</i>	<i>Híbrido - acoplado con un generador diésel</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>Sí</i>	<i>El sistema híbrido con configuración diésel puede aumentar la disponibilidad de la fuente de energía y el ahorro de diésel.</i>	<i>Causa el calentamiento global debido a la emisión de gases de efecto invernadero. El control del sistema combina el control de tensión en dc y la sincronización en AC requeridas en los esquemas anteriores.</i>

### **2.3.4. Componentes sistemas HRES.**

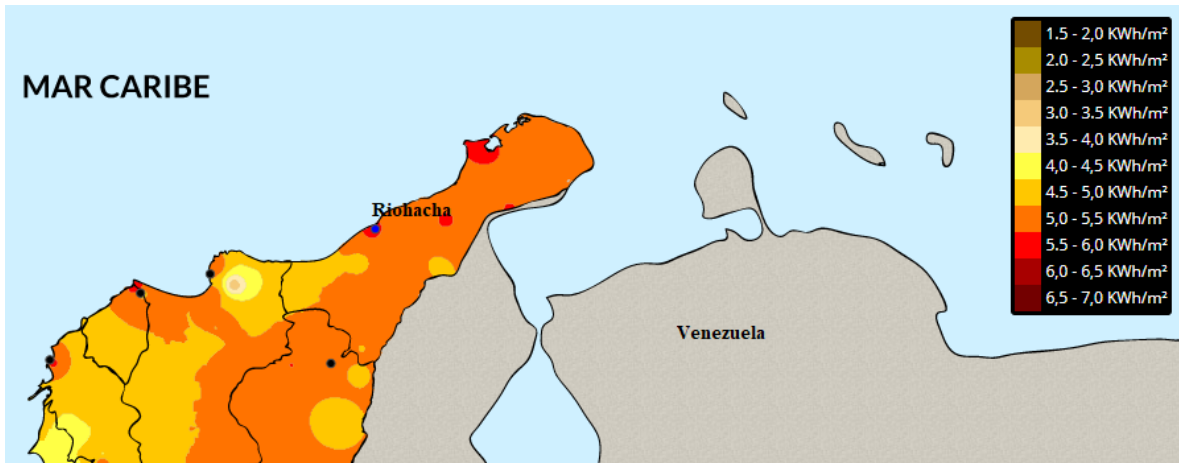
En esta sección se presenta la propuesta de solución con la descripción de sus sistemas de generación y componentes que conforman el sistema HRES cuya configuración seleccionada es acoplada en AC/DC la cual fue descrita en la sección 2.3.3.3.



### 2.3.4.1 Sistema fotovoltaico (FV).

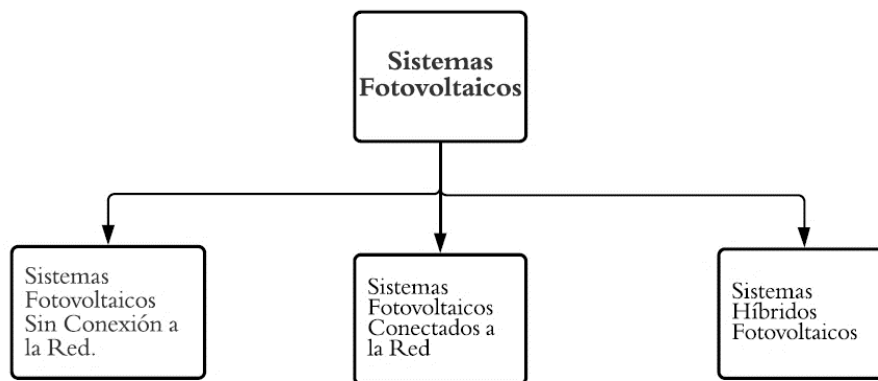
Para obtener energía solar se requiere convertir la energía radiante del sol en electricidad mediante la implementación de sistemas fotovoltaicos o de concentración. Este proceso se presenta cuando la luz solar incide en la superficie de la célula fotovoltaica, donde algunos de los fotones son absorbidos y la célula fotovoltaica libera electrones que se utilizan para generar corriente eléctrica, obteniendo de esta forma electricidad [52].

En la figura 18, se puede observar que la irradiación global horizontal media horaria del departamento de La Guajira oscila en el rango de 4,5 – 6,0 kWh/m<sup>2</sup>.



*Figura 18 Irradiación global horizontal media diaria, Departamento De La Guajira [54].*

Un sistema fotovoltaico permite realizar un proceso de conversión de los fotones de la radiación solar en electricidad. A continuación, en la figura 19, se presentan la clasificación de estos sistemas según el tipo de conexión [55].



*Figura 19 Clasificación Sistemas Fotovoltaicos [55].*

### 2.3.4.2 Generadores diésel.

Los grupos electrógenos conectados a motores diésel son muy utilizados por diversas categorías de consumidores. Si el suministro de la red falla con o sin previo aviso, estos grupos toman el relevo y siguen suministrando electricidad. Los hay de diferentes tamaños y pueden activarse en muy poco tiempo, de forma manual o automática. Su eficiencia de conversión es muy pobre, pero esta eficiencia mejora con el tamaño.

Sus tensiones pueden controlarse, pero las frecuencias generalmente no pueden controlarse con precisión por requisitos de protección ante flujos bidireccionales. Por ello, no se permite su conexión a la red [55].

### 2.3.4.3 Sistema de baterías.

Las baterías son un dispositivo recargable que convierte la energía química potencial en energía eléctrica, almacenando la energía obtenida durante las horas de luz solar para ser utilizada en las horas nocturnas. Los parámetros típicos que se tienen en cuenta a la hora de elegir las baterías son el voltaje, la capacidad de carga, la capacidad de ciclo y la profundidad de descarga. El voltaje (V) y la capacidad de carga (Ah) se utilizan para determinar el potencial de almacenamiento/recuperación de energía de la batería. La capacidad también depende de la corriente de descarga, la temperatura y la tensión de fin de descarga definida [52]. Otro parámetro a tener en cuenta es la tasa (C), que es la carga o descarga que se correlaciona con la tasa de litación o des-litación del material del electrodo.

El almacenamiento de energía es importante, porque puede reducir las fluctuaciones de energía, mejorar la flexibilidad del sistema y permitir el almacenamiento y el despacho de la electricidad generada por fuentes de energía renovables variables, como la eólica y la solar.

En la figura 20, se indica un resumen de las tecnologías de almacenamiento más utilizadas en sistemas (HRES)

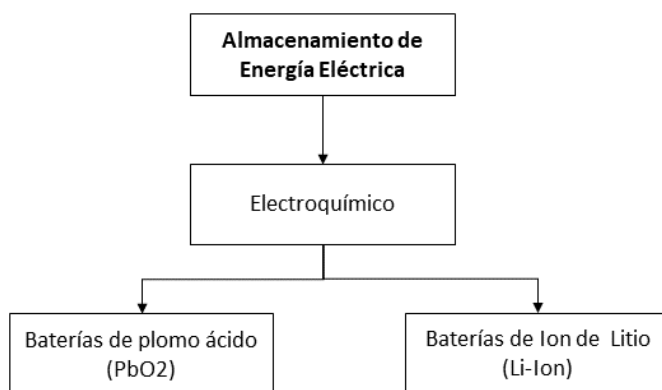


Figura 20 Tipos de Sistemas de Almacenamiento de Energía [52].

Algunos de los parámetros claves que deben tenerse en cuenta para seleccionar un sistema de baterías se encuentran relacionados en la tabla 11.

*Tabla 11 Parámetros claves sistema de baterías [52].*

<b>Parámetros</b>	<b>Descripción.</b>
<b>Tensión</b>	Presentan una tensión nominal que suele ser de 2, 6, 12 ó 24 V
<b>Profundidad de descarga: (DOD- Depth Of Discharge).</b>	Es el valor en porcentaje de la energía que se extrae de la batería en una sola descarga respecto a la energía que posee la misma en estado de plena carga.
<b>Estado de Carga (SOC – State Of Charge)</b>	Es la cantidad de energía en porcentaje que tiene la batería en un momento dado. Así con plena carga el SOC=100%.
<b>Eficiencia de carga</b>	Suele estar comprendido entre el 60% y el 85%.
<b>Auto descarga</b>	Es el proceso por el cual la batería pierde parte de su carga almacenada independientemente de que esté siendo utilizada o no.
<b>Efectos de la temperatura</b>	La capacidad y el tiempo de vida de la batería dependen de la temperatura de operación. Por lo general la temperatura óptima es de 25 °C.
<b>tasa (C)</b>	Es la tasa de carga o descarga que se correlaciona con la tasa de litación o des-litación del material del electrodo. (C), representa la capacidad de una batería generalmente medida en amperios hora (Ah).
<b>Estado de Salud (SOH -State of Health)</b>	El SOH se define como la relación entre la carga máxima de la batería y su capacidad nominal, que es la capacidad original dada por el fabricante y se expresa en porcentaje.
<b>Vida útil</b>	Se considera que las baterías agotan su vida útil cuando su capacidad se reduce al 80% del valor original

- **Controlador de carga.**

Es un dispositivo que dirige la salida de energía desde el sistema fotovoltaico a la carga y también permite recargar la batería cuando se genera electricidad; de esta forma, cuando el sistema no está generando, extrae energía eléctrica de la batería para alimentar a la carga. También permite dirigir la energía de la batería a un inversor para las cargas de corriente alterna (CA) [52].

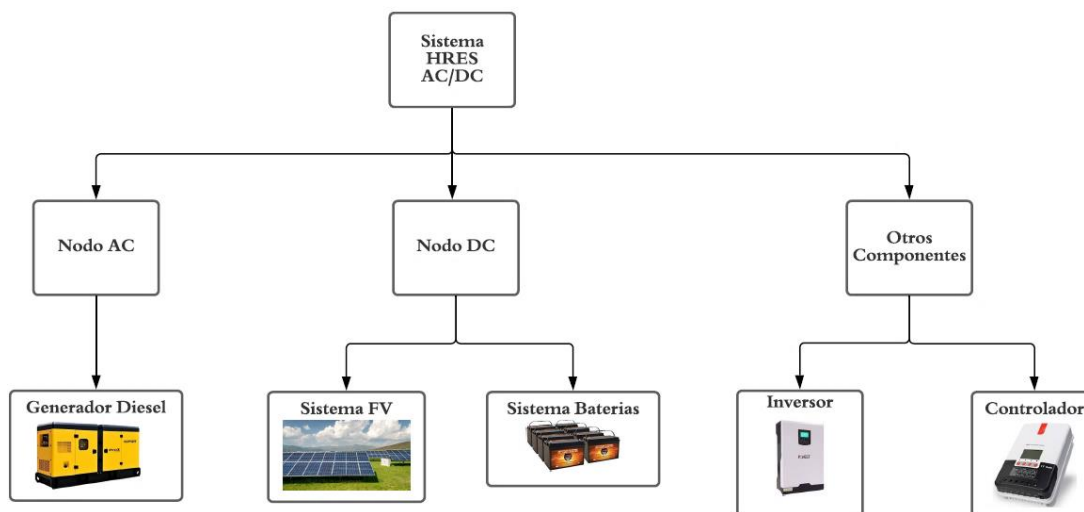
Este dispositivo es importante para un funcionamiento seguro y fiable del sistema de batería, ya que protege al sistema contra las descargas profundas, evitan el envejecimiento prematuro y son responsables de la estrategia de carga evitando la sobrecarga [48].

- **Inversor.**

Este dispositivo convierte la corriente continua (CC) en la corriente alterna (CA) que permite alimentar a las cargas de corriente alterna (CA) instaladas en el sistema. Para seleccionar correctamente un inversor para un sistema solar fotovoltaico, es necesario conocer la cantidad

de energía de (CC) necesaria al día para suministrar la carga de (CA) y esto viene determinado por la capacidad de los paneles fotovoltaicos. Por lo tanto, es importante que el inversor no sólo sea fiable, sino también de alta eficiencia, es decir, entre el 95% y el 98% [52].

En la figura 21, se muestran los componentes que se estudiarán para realizar el modelamiento y la optimización del sistema HRES estudiado.



*Figura 21 Componentes Sistema HRES AC/DC, Fuente Propia.*

El sistema HRES seleccionado se compone de un sistema de energía solar fotovoltaica, generador diésel, sistema de baterías y algunos componentes adicionales como el inversor y controlador de carga. El funcionamiento de este sistema consiste en que si la energía generada por los recursos de energía renovable (ER) excede la demanda de carga requerida, entonces se entrega el excedente de energía para cargar la unidad del banco de baterías. A partir de entonces, la batería entra en juego cuando la generación de (ER) es insuficiente para satisfacer la demanda de carga. Si el sistema de baterías no puede satisfacer la totalidad de la carga entraría en funcionamiento el generador diésel. De esta forma el funcionamiento del sistema HRES depende del rendimiento de cada componente.

En el apartado 1 de la sección anexos, se describen algunas recomendaciones de acuerdo a la normativa colombiana que se deben tener en cuenta cuando se decide implementar un sistema fotovoltaico en instituciones médicas.

#### **2.4. Hipótesis investigación.**

En la sección de introducción se planteó la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo disminuir los costos de generación de las fuentes de energías no renovables en las instalaciones de asistencia médica? De acuerdo al modo de operación, la sostenibilidad de las instalaciones de asistencia medicas está asociada a diferentes rubros y uno de ellos es el energético, porque este sector abarca una diversidad de instalaciones y su consumo

energético depende del tipo de servicios que ofrecen a sus usuarios como, por ejemplo: Consultas médicas, servicio de urgencias, quirófanos, oficinas, laboratorios etc. Esta investigación brinda una solución tecnológica que consiste en la instalación de un sistema HRES que permitiría obtener unos beneficios tanto energéticos como económicos, porque se brindaría una alternativa para la operación energética de estas instalaciones [56].

De esta forma se podría reducir los costos energéticos a través de la implementación de un sistema HRES y de medidas de uso racional y eficiente de la energía lo cual permitiría a estas instalaciones ser más competitivas porque tendrán un sistema eléctrico esencial diversificado. Para demostrar lo anteriormente mencionado se formuló la siguiente hipótesis de investigación: “Con una buena gestión del sistema de baterías (BAT) menor será la utilización del generador diésel”.

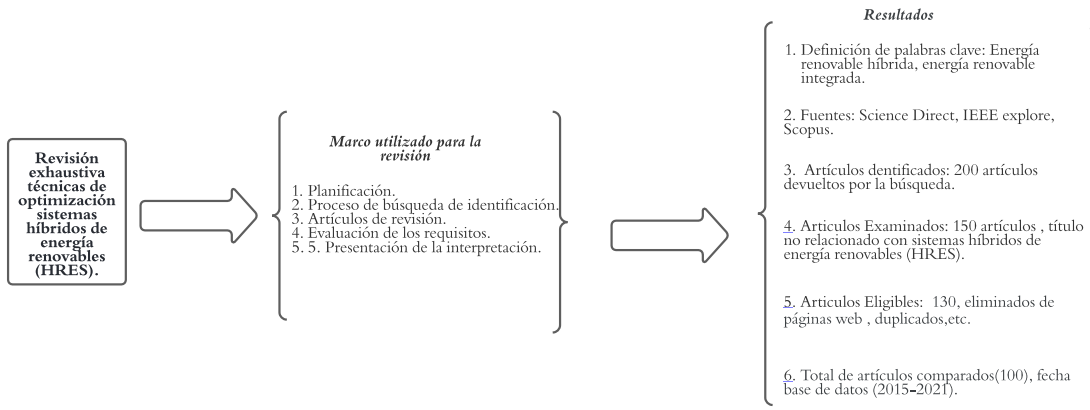
En el capítulo 3 se profundizará sobre cómo se resolvió la hipótesis de investigación propuesta en esta sección.

### CAPITULO 3.

Este capítulo está conformado por cuatro secciones en las cuales se describe lo siguiente. En la primera sección se realiza una descripción epistemológica. En la segunda sección se presenta el desarrolló de cada una de las fases de investigación, destacando que se utilizó la metodología de investigación cuasi-experimental. En la tercera sección se realiza un análisis comparativo de los métodos de investigación tomados como referencia y se especifica cuál método fue seleccionado. Por último, la cuarta sección se hace referencia a las contribuciones y novedades de esta investigación relacionada con la implementación del sistema HRES.

#### 3.1 Descripción epistemológica de la investigación.

En esta investigación se desarrolló una búsqueda bibliográfica exhaustiva sobre el sistema HRES. Se consultaron diferentes bases de datos bibliográficas como Science Direct, IEEE explore, Scopus etc. En la figura 22, se muestra en detalle cómo se seleccionaron los artículos académicos relacionados con esta investigación. Se destaca el marco utilizado para realizar la revisión y los resultados obtenidos en la consulta realizada en distintas fuentes bibliográfica como: Science Direct, IEEE explore, Scopus



*Figura 22 Enfoque metodológico para la selección de los estudios revisados, adaptado de [94].*

El sistema HRES pueden constar de una variedad de componentes, como generadores de energía renovable y no renovable. La integración de estos generadores con un sistema de almacenamiento de energía (ESS) también puede tener en cuenta las cargas y la utilidad si se trata de un sistema conectado a la red [94]. De acuerdo a esto, en esta investigación se indago sobre la siguiente hipótesis de investigación “*Con una buena gestión del sistema de baterías (BAT) menor será la utilización del generador diésel*”.

En la tabla 12, se muestran las ventajas y desventajas de las técnicas que han sido implementadas en la literatura para resolver los problemas relacionados con la operación en los sistemas HRES. Con la técnica basada en lo probabilístico se puede generar escenarios sintéticos para resolver problemas de optimización estocástica. Mientras tanto que con la técnica basada en lo analítico se puede realizar el cálculo y la simulación de forma repetida

con intervalos fijos. Luego de mencionar estas dos técnicas clásicas abordamos la técnica de optimización matemática implantada para resolver problemas de programación lineal, entera mixta y cuadrática. Por lo general, se recurre a este tipo de técnica se implementa cuando el problema de optimización se puede resolver a partir de métodos numéricos. Por último, se hace referencia a la técnica heurística aplicadas específicamente en problemas de optimización no lineal.

**Tabla 12 Técnicas de resolución para problemas relacionados con los sistemas HRES, tomado de [94].**

<b>Técnica (Horizonte de tiempo)</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Probabilístico</b>	Genera escenarios sintéticos para optimización estocástica.  Da resultados con niveles de confianza.	La precisión depende de la disponibilidad de datos históricos.  Puede requerir amplios recursos computacionales.
<b>Analítico</b>	Cálculo directo basado en criterios intuitivos.  Cálculo/simulación repetidos con intervalos fijos.	Cálculo directo basado en criterios intuitivos.  Análisis de sensibilidad.
<b>Optimización matemática</b>	Gran capacidad para encontrar el óptimo global.  Convergencia rápida y alta robustez para problemas lineales.	Alta eficiencia limitada a problemas de programación lineal/enteros mixtos/cuadráticos.  Se requiere una formulación matemática explícita.
<b>Heurística</b>	Gran flexibilidad para resolver todos los problemas de optimización.  Gran variedad de algoritmos.	Puede converger en un óptimo local en lugar de un óptimo global.  Menos robustez y precisión para problemas lineales.

Se resalta que la hipótesis de investigación planteada en esta investigación será resuelta en el próximo capítulo a través de una técnica heurística porque se utiliza especialmente para aplicaciones de optimización horaria, intradiaria o diaria.

### 3.2 Descripción de las fases de investigación.

En esta sección se describe la metodología y cada una de las cuatro fases implementada en el desarrollo de este proyecto.

#### 3.2.1. Metodología de investigación.

De acuerdo a la naturaleza del problema de esta investigación, se seleccionó la metodología cuasi-experimental: *“Los diseños cuasi-experimentales tienen el mismo propósito que los estudios experimentales: probar la existencia de una relación causal entre dos o más variables. Cuando la asignación aleatoria es imposible, los cuasi-experimentos (semejantes a los experimentos) permiten estimar los impactos del tratamiento o programa, dependiendo de si llega a establecer una base de comparación apropiada”* [57].

La metodología cuasi-experimental se seleccionó porque es muy versátil y nos permite obtener una aproximación al experimento aleatorio cuando la aleatoriedad no es posible. De acuerdo a lo anterior para esta investigación este tipo de metodología es adecuada para resolver el problema de esta investigación debido a diversas situaciones donde no se pueden controlar todas las variables que tienen relevancia. En la tabla 13, se resaltan las características de los diseños desarrollados bajo la metodología cuasi-experimental.

*Tabla 13 Característica de los diseños cuasi-experimentales [57]*

<b>Característica de los Diseños cuasi-experimentales</b>	
<b>Objetivos</b>	Estudio del impacto de los tratamientos y de los procesos de cambio intra e interindividuales
<b>Efectos Inferidos</b>	Mayor riesgo de espuriedad en los diseños transversales
<b>Factores Extraños</b>	Escaso Control
<b>Selección de las Unidades</b>	Sesgada
<b>Validez Enfatizada</b>	Validez externa
<b>Alcance de los Resultados</b>	Muy generalizable

Además, es importante tener en cuenta que los diseños cuasi-experimentales también manipulan deliberadamente, al menos, una variable independiente para observar su efecto sobre una o más variables dependientes. En este tipo de diseño, los sujetos no se asignan al azar a los grupos ni se emparejan, sino que dichos grupos ya están conformados antes del experimento: son grupos intactos (la razón por la que surgen y la manera como se integraron es independiente o aparte del experimento) [58].

A continuación, se resaltan los principales pasos metodológicos que se tuvieron en cuenta para el desarrollo de las diferentes fases de esta investigación bajo la metodología cuasi-experimental [58].

**Paso 1:** Decidir cuántas variables independientes y dependientes deberán incluirse. Se incluyeron las variables que fueron necesarias para probar las hipótesis, alcanzar los objetivos y responder las preguntas de investigación.



**Paso 2:** Elegir los niveles o modalidades de manipulación de las variables independientes y traducirlos en tratamientos experimentales.

**Paso 3:** Desarrollar el instrumento o instrumentos para medir las variables dependientes.

**Paso 4:** Seleccionar una muestra de casos que nos interesa.

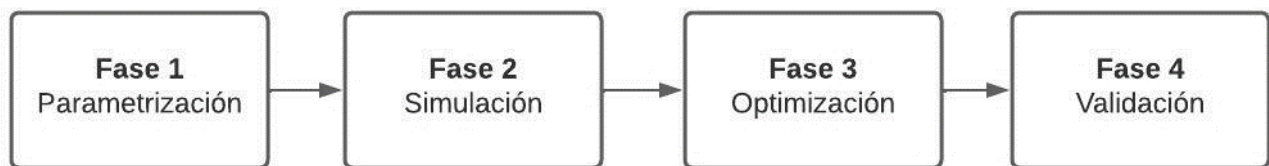
**Paso 5:** Seleccionar el diseño cuasi-experimental apropiado para las hipótesis, objetivos y preguntas de investigación.

**Paso 6:** Planear cómo se van a manejar los casos.

**Paso 7:** En el caso de cuasi-experimentos, analizar cuidadosamente las propiedades de los grupos intactos.

**Paso 8:** Aplicar las pre-pruebas (cuando las haya), los tratamientos y las pos-pruebas.

Basado en lo anterior, en la figura 23 se puede observar las fases de investigación diseñada bajo la metodología cuasi-experimental.



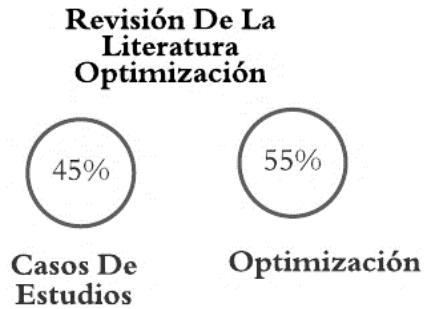
*Figura 23 Fases de investigación diseñada.*

En la figura 23, se describen las cuatro fases correspondientes a la metodología con la cual se desarrolló el modelo de optimización propuesto en el capítulo 4. En la primera fase (Parametrización), se definen el perfil de demanda y los parámetros asociados al sistema HRES. En la segunda fase (Simulación), se realizó la simulación del flujo de energía en el horizonte de un día. En la tercera fase (Optimización), se realizó la optimización del flujo de energía (kW/h), donde se evaluó la función objetivo. En la cuarta fase (Validación), se realizó la validación estadística de los resultados obtenidos. En el siguiente capítulo se ampliará en detalle cada una de estas fases.

### **3.3 Métodos matemáticos de solución.**

En esta sección se realizó un análisis comparativo de los métodos de investigación tomados como referencia y se especificó cuál método fue seleccionado para resolver el problema de optimización esta investigación.

En la figura 24, los artículos [59]-[70] equivalen a un 55% de la búsqueda bibliográfica realizada y están relacionados con los métodos, técnicas y algoritmos de optimización. Mientras tanto los artículos [71]-[80] están relacionados con las aplicaciones de los métodos y técnicas de optimización en casos de estudios desarrollados y aplicados.

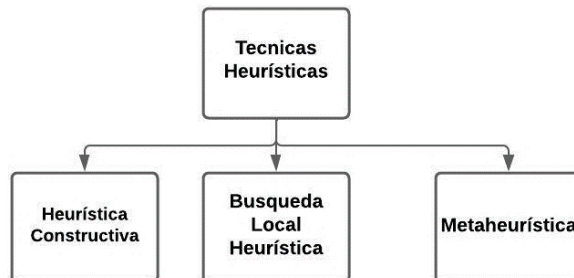


*Figura 24 Revisión De La Literatura Optimización, Fuente Propia.*

### 3.3.1 Técnicas heurísticas aplicadas a los sistemas HRES.

Una clasificación mejorada de la heurística que sirve de base para que los futuros investigadores realicen un desempeño heurístico justo la presentan en [76], donde los autores desarrollaron un diagnóstico exhaustivo de los esquemas de clasificación heurística para encontrar características únicas que puedan ayudarnos a distinguir cada heurística entre sí. Los autores recalcan que el éxito de la implementación de una heurística depende de una comprensión clara de sus características y comportamiento de búsqueda.

En la figura 25, se presenta un resumen de la clasificación para las técnicas heurísticas.



*Figura 25 Clasificación de técnicas heurísticas, tomado de [76].*

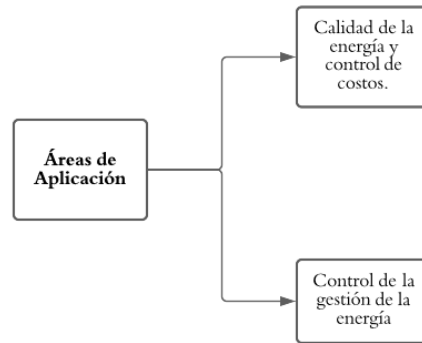
La técnica heurística constructiva (CH) es típicamente el método de aproximación más rápido. Mientras tanto las técnicas heurísticas de búsqueda local (LSH) son las soluciones más lentas, pero producen mejor calidad que las técnicas heurísticas Constructivas (CH). En el último tiempo han surgidos nuevos tipos de algoritmos de aproximación que básicamente tratan de combinar métodos heurísticos básicos en marcos de alto nivel destinados a explorar de manera eficiente y efectiva un espacio de búsqueda.

De acuerdo a lo anterior, los autores resaltan que para reducir los desafíos que se experimentan cuando se trata de clasificar la heurística, es necesario que cada fundador de una heurística explique claramente las características heurísticas más importantes que deben usarse en la clasificación.

En problemas de ingeniería y diseño, varios problemas ruidosos de optimización matemática no lineal no pueden resolverse eficazmente utilizando técnicas de optimización

convencionales. Pero los algoritmos metaheurísticos parecen muy eficientes para abordar estos problemas y se hicieron muy populares, como el Algoritmo genético (GA), la Optimización de enjambre de partículas (PSO).

En la figura 26, se pueden observar las áreas de aplicación de estas técnicas de optimización en sistema HRES.



**Figura 26.** Áreas de aplicación técnicas de optimización en sistemas (HRES), [81].

En la tabla 14, se muestra la aplicación de algunos algoritmos de optimización aplicados en sistema HRES que permiten resolver problemas asociados a la gestión de la energía, tamaño del sistema, y estrategias de operación para estos sistemas.

*Tabla 14 Aplicación de algoritmos de optimización en sistemas HRES.*

ARTICULO	PROBLEMA PRINCIPAL	ALGORITMOS IMPLEMENTADOS
[82]	Problema de la gestión de la energía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enfoque heurístico (HS).</li> <li>• Enfoque basado en agentes.</li> <li>• Enfoque evolutivo.</li> <li>• Enfoque de control predictivo de modelos (MPC), enfoque de redes neuronales (ANN), enfoque de Round robin, enfoque de Gauss Seidel (GS), enfoque de ecuación de Riccati SD</li> </ul>
[83][84]	Optimización del tamaño – Sistema híbrido.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Algoritmo genético de ordenación no dominante (NSGA-II).</li> <li>• Optimización multiobjetivo por enjambre de partículas (MOPSO).</li> <li>• Algoritmo de evolución diferencial multiobjetivo autoadaptativo</li> </ul>
[85][86]	Optimización de Estrategias de Operación – Sistemas Híbridos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Algoritmo genético (GA).</li> <li>• Optimización por enjambre de partículas. (PSO).</li> </ul>

Para tratar sobre la optimización de las estrategias de operación para los sistemas HRES se recurre a [84,85,86].

En [84] investigan sobre las diferentes estrategias que permiten gestionar la operación de los sistemas híbridos mediante la utilización de un Algoritmo Genético jerárquico (GA) cuyo objetivo es el de maximizar el beneficio generado por el intercambio de energía con la red. Los parámetros de optimización de EMS los agruparon en cuatro subconjuntos que representaban la asociación de las consecuencias de las reglas, la forma de los generadores, los pesos de las reglas y la desactivación de los conjuntos difusos de entrada. Este último tiene la función de eliminar los conjuntos difusos de entrada que se organizaron de manera ineficiente y, por lo tanto, de simplificar la base de reglas del sistema de energía. Los resultados muestran que el rendimiento de las estrategias que evaluaron están sólo un 10% por debajo de la solución de referencia ideal (óptima), incluso cuando la base de la estrategia del sistema se reduce a menos de 30 reglas de operación.

En [85] proporcionan una revisión integral sobre las últimas investigaciones relacionadas con la planificación de una microrred donde indican que es un proceso complejo debido a las alternativas, los objetivos, las limitaciones y las incertidumbres existentes que se deben tener en cuenta. En general presentan un contexto sobre las técnicas de optimización aplicadas a la planificación de las microrredes y definen las directrices que se deben tener en cuenta para desarrollar metodologías de planificación innovadoras centradas en la viabilidad económica. De acuerdo a su revisión, concluyeron que los métodos técnicos aplicados a la planificación de las microrredes pueden ser útiles para los planificadores de microrredes y distintos profesionales dedicados a la aplicación de esta tecnología.

En [86] destacaron unos estudios relacionados con los enfoques de control utilizados para la integración de las fuentes de energías renovables en las microrredes basados en su tipo de configuración. También destacaron los algoritmos de optimización avanzados y convencionales utilizados en las aplicaciones de microrredes e indicaron que pueden implementarse diferentes estrategias de optimización de control que pueden mejorar el funcionamiento y la integración de las fuentes de energías renovables en las microrredes utilizando estas técnicas. Cabe destacar que la mayoría de los métodos existentes son restringido al análisis de la simulación. Por último, basado en la operación autónoma de los sistemas de microrredes estos necesitan un complejo sistema de control para mejorar su funcionamiento.

Gracias a esta revisión los autores destacaron que los métodos tradicionales están siendo reemplazados gradualmente por métodos de Inteligencia Artificial y métodos híbridos con una complejidad de problemas creciente. El algoritmo genético natural (GA) está siendo ampliamente empleado para optimizar la capacidad del sistema, y su proporción de aplicación alcanza el 40%. Los métodos híbridos pueden superar las deficiencias de los métodos individuales, como la convergencia local y el largo tiempo de cálculo.

La confiabilidad de los sistemas híbridos aumenta cuando los sistemas de generación se combinan con los dispositivos de almacenamiento. Por lo tanto, la ubicación óptima de los componentes se asigna a las partes requeridas de la microrred híbrida. En [87] revisaron nuevas formas de práctica energética de fuentes híbridas. Presentaron el modelado físico de los recursos energéticos renovables con numerosas metodologías y principios de optimización para los sistemas híbridos. Dentro de las metodologías o métodos que se utilizan en la planificación de los sistemas híbridos aislados y conectados a la red destacan aquellas enfocadas en los análisis de confiabilidad, mejoramiento y enumeración. Mientras tanto que para las técnicas de optimización destacan aquellos que permiten obtener el tamaño óptimo de los componentes del sistema híbrido dentro de los cuales destacan: el Método de Construcción Gráfica, Técnica de Aproximación Probabilística, Métodos de enfoque determinista, Método de aproximación iterativa y Modelos de Técnicas de Inteligencia Artificial.

De acuerdo con esto, los autores destacaron que existen numerosas técnicas de optimización y criterios de diseño que han sido utilizadas como herramientas por los investigadores en varias décadas para mejorar los sistemas híbridos, independientemente de si la red está conectada o no.

En la tabla 15 se presentan los algoritmos heurísticos implementados para optimizar un sistema híbrido.

*Tabla 15 Algoritmos Heurísticos Implementados, [78-83].*

Artículo de Investigación	Algoritmos Heurístico Implementado		
	Evolución Diferencial (DE)	Enjambre de Partículas (PSO)	de Algoritmo Genético (GA)
[78]	Si	-	-
[79]	-	Si	-
[80]	-	-	Si
[81]	-	Si	Si
[82]	-	Si	-
[83]	-	Si	-

En [87] los autores revisaron el algoritmo básico de evolución diferencial (DE) y algunas de sus modificaciones con varias mejoras para encontrar varios tipos de diseños óptimos en las ciencias químicas. Discutieron sobre las ideas fundamentales del algoritmo y los métodos e ideas específicos detrás de ajustar cada parámetro. Luego implementaron códigos (DE) y demostraron la capacidad de (DE) para resolver problemas de diseño para modelos estadísticos con diferentes números de parámetros. Con esto descubrieron que (DE) puede encontrar diseños óptimos aproximados y exactos en unos segundos para estimar algunos o todos los parámetros en modelos lineales y no lineales. Además, destacaron que (DE) o sus variantes también pueden ser efectivos para resolver problemas de diseño complejos de alta dimensión.

Mientras tanto en [88] realizaron el despacho óptimo de energía mediante la optimización de enjambre de partículas (PSO). Optaron por utilizar la optimización del enjambre de partículas porque les permitió asignar el programa de generación de energía activa entre las estaciones generadoras considerando las restricciones del sistema para minimizar el costo de la energía total generada. El método propuesto lo analizaron en el sistema de prueba IEEE 39 barras y compararon los resultados obtenidos con el flujo de potencia óptimo convencional, destacando que los resultados muestran una reducción en las pérdidas totales del sistema y una reducción en la generación total con límites de flujo de línea de transmisión retenidos.

En [89], los autores utilizaron un algoritmo genético (GA) para resolver un problema de flujo de energía óptimo. Basados en que el flujo de energía óptimo (OPF) tiene como objetivo optimizar un determinado objetivo sujeto a las restricciones de igualdad y desigualdad formadas por las ecuaciones de flujo de energía de la red y los límites operativos,

respectivamente. La minimización del costo de generación mediante la programación óptima de las estaciones generadoras y la minimización de pérdidas se considera la función objetivo múltiple de interés. Consideraron los sistemas estándar IEEE 6, 14 y 30 barras para el análisis y lograron una solución de potencia óptima para una función de objetivo múltiple que consiste en minimizar tanto el costo de generación como la pérdida del sistema. Además, también destacaron la ventaja del algoritmo genético que se encuentra en el enfoque de objetivos múltiples. Por lo tanto, este método puede ser confiable al asignar el programa de generación a diferentes estaciones generadoras en una red práctica de sistema de energía para minimizar el costo general de generación y minimizar las pérdidas de transmisión.

En [90] los autores realizaron una comparación de la optimización de los enjambres de partículas (PSO) y el algoritmo genético (GA), dos técnicas de optimización similares, en el sentido de que estas dos heurísticas son métodos de búsqueda basado en la población. El objetivo de esta investigación es probar la hipótesis que establece que, aunque PSO y el GA en promedio producen la misma eficacia (calidad de la solución), PSO es más eficiente desde el punto de vista computacional (utiliza menos cantidad de evaluaciones de la función) que el GA. Para investigar esta afirmación, establecieron dos pruebas estadísticas para examinar los dos elementos de esta afirmación, igual efectividad, pero mayor eficiencia para PSO que para el GA. Identificaron dos métricas para las dos pruebas t, y de acuerdo a los resultados obtenidos de las pruebas t comprobaron la hipótesis de que tanto PSO como GA obtienen soluciones de alta calidad, con índices de calidad del 99% o más con un nivel de confianza del 99% para la mayoría de los problemas de las pruebas. El esfuerzo computacional requerido por PSO para llegar a esas soluciones de alta calidad es menor que el esfuerzo requerido para llegar a la misma solución de alta calidad del AG.

En [91] los autores realizaron un diseño óptimo de una microrred híbrida PV – CSP – LPG con la técnica de optimización de enjambre de partículas (PSO). Utilizaron el PSO como un optimizador global dentro del contexto del problema y de acuerdo a los resultados obtenidos destacaron que el método PSO es una técnica eficiente que tiene la capacidad de determinar una solución de diseño de alta calidad para una microrred optimizada con un costo computacional relativamente bajo.

Pero en [92], los autores utilizaron una Optimización de enjambre de partículas de objetivos múltiples para el sistema híbrido de una microrred ubicada en Suecia. Utilizaron una optimización de enjambre de partículas multi objetivo para encontrar la configuración óptima del sistema y el tamaño óptimo de los componentes para cada ubicación. Mediante esta técnica de optimización obtuvieron el tamaño y la configuración óptima del sistema y estudiaron tres objetivos que afectan la inversión técnica y económica de los sistemas híbridos; La Probabilidad de pérdida de suministro de energía (LPSP), el Costo de Energía (COE) y el RF. Descubrieron que, durante la temporada cálida, los sistemas híbridos logran un rendimiento óptimo con el LPSP más bajo y el PRG más alto. El LPSP oscila entre 0.01 como valor mínimo y 0.22 como valor máximo. Según estos resultados, se podría concluir el importante potencial de HMGS como alternativa para las áreas rurales e isleñas en Suecia desde el punto de vista técnico y económico. Esto está de acuerdo con el programa de desarrollo de las zonas rurales y la política energética sueca a corto y largo plazo.

En la tabla 16, se resaltan las ventajas y desventajas de los algoritmos heurísticos que se han utilizados para resolver problemas asociados a los sistemas (HRES). Para esta investigación se seleccionó un algoritmo genético (GA) para resolver el problema de optimización planteado. En la próxima sección se especificará sobre este algoritmo.

**Tabla 16 Ventajas/Desventajas Algoritmos Heurísticos [93- 94]**

<b>Algoritmos</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Algoritmo Genético (AG)</b>	<p>Implica un alto grado de aleatoriedad.</p> <p>Buena diversidad de las soluciones para evitar quedar atrapado en un óptimo local.</p> <p>Fácil de usar.</p>	<p>Tasa de convergencia lenta.</p> <p>No hay garantía de que GA encuentre un óptimo global.</p> <p>Depende en gran medida de las tasas de cruce y mutación.</p>
<b>Algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO)</b>	<p>Sencillo en concepto.</p> <p>Velocidad de convergencia adecuada.</p> <p>Menos dependiente de los puntos iniciales.</p>	<p>Tasa de convergencia lenta.</p> <p>Depende del peso de inercia y de las constantes de aprendizaje.</p> <p>Uso de ensayo y error para inicializaciones de parámetros.</p>
<b>Evolución diferencial (DE)</b>	<p>Puede encontrar una solución casi óptima independientemente de los valores de los parámetros iniciales.</p> <p>Método eficiente que no queda atrapado fácilmente en mínimos locales.</p>	<p>La eficiencia es muy sensible al ajuste de los parámetros de control. Depende de tres parámetros principales que son el tamaño de la población (<math>N_p</math>), la tasa de mutación (<math>F</math>) y la tasa de cruce (<math>CR</math>).</p> <p>Ajuste de parámetros principalmente por prueba y error.</p> <p>La convergencia es inestable con un tamaño de población pequeño.</p>
<b>Algoritmo de colonia de abejas artificiales (ABC)</b>	<p>Es tan simple como PSO y DE con pocos parámetros de control, como el tamaño de la colonia y el número máximo de ciclos.</p> <p>Es robusto contra la inicialización.</p> <p>Tiene la capacidad de explorar soluciones locales.</p>	<p>ABC tiene malas características de explotación.</p> <p>Su velocidad de convergencia también es un problema en algunos casos.</p> <p>Puede quedarse atascado en el óptimo local.</p>



## CAPITULO 4.

Este capítulo está conformado por seis secciones en las cuales se desarrolla lo siguiente. En la primera sección se describe el modelo matemático. En la segunda sección se presenta el diagrama de bloques del algoritmo desarrollado. En la tercera sección se detallan las ecuaciones matemáticas utilizadas. En la cuarta sección se introduce el funcionamiento del algoritmo genético (GA) seleccionado. En la quinta sección se destacan los resultados obtenidos de las distintas simulaciones realizadas para analizar la implementación del sistema HRES en la institución hospitalaria.

### 4.1 Descripción del modelo matemático

En la figura 27, se puede observar el sistema HRES propuesto para una institución de asistencia médica. Está conformado por un sistema fotovoltaico ( $E_{PV(t)}$ ), sistema de baterías ( $E_{bat(t)}$ ), generador diésel ( $E_{DEG(t)}$ ), controlador de carga que regula el control de energía proveniente desde el sistema fotovoltaico hacia el sistema de baterías. Para el flujo de energía desde el nodo de generación DC hacia el nodo AC se utiliza un inversor de carga, que permitirá controlar el flujo de energía desde los sistemas asociados al nodo DC. En el nodo AC se encuentran el consumo kWh de las cargas hospitalarias.

En el apartado 3 de la sección anexos se puede validar como se realizó el dimensionamiento para obtener un generador diésel (24 kVA- 19 kW), sistema fotovoltaico conformado por 37 paneles fotovoltaicos de 200 W para una potencia máxima de (7.4 kWp-24V) y un sistema de almacenamiento conformado por 4 baterías cuya capacidad nominal es de (486Ah-24 V).

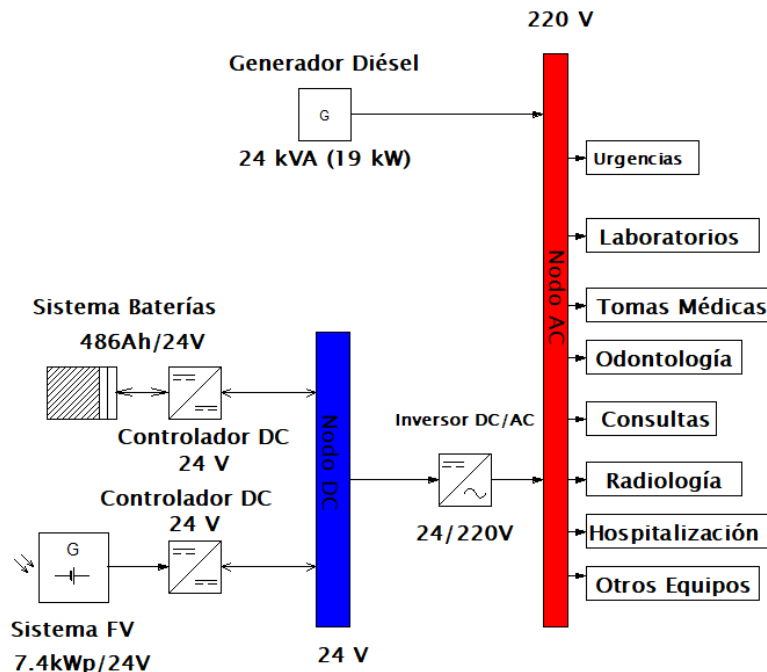


Figura 27 Sistema HRES, Propuesto.

A continuación, se explican las razones para no considerar a la red de MT en el modelo matemático de esta investigación que permite optimizar el flujo de energía en un sistema HRES diseñado para operar de forma OFF-GRID.

1. Los sistemas HRES son sistemas que en su composición combinan dos o más fuentes de generación eléctrica, en donde alguna es una fuente de energía renovable no convencional, y la otra es una fuente de energía no renovable o corresponde a la alimentación proveniente de la red de distribución eléctrica de la región. Esta definición nos planteó varias soluciones posibles:
  - **Sistema On grid:** Sistema HRES constituido por generación NCE (Paneles fotovoltaicos) + conexión a la red de distribución.
  - **Sistema Off grid:** Sistema HRES constituido por generación NCE (Paneles fotovoltaicos) + generador eléctrico con diesel.

Con estos sistemas HRES se pretende aprovechar al máximo sus características de funcionamiento y obtener eficiencias superiores a las que podrían obtenerse con una sola fuente de energía (red MT), estos sistemas pueden resolver las limitaciones en cuanto a flexibilidad del combustible, eficiencia, emisiones y economía.

Los indicadores de calidad de suministro de energía en La Guajira no son muy alentadores. Para el año 2020 el SAIDI fue de 95.84 horas, mientras tanto el SAIFI fue de 91 veces. De acuerdo a la cantidad de horas sin energía y a la frecuencia de ocurrencia de este fenómeno, se seleccionó la opción de operación del sistema HRES en modo off-grid. Realizar el estudio para las condiciones On - Grid, no corresponde a la realidad actual de las instalaciones hospitalarias en el Departamento.

2. En esta investigación se desarrolla un modelo matemático para resolver el problema de la gestión óptima del flujo de energía en un sistema HRES. El sistema está conformado por fuentes de energía renovables (Sistema Fotovoltaico) y no renovables (Generador Diésel). Debido a que la producción de energía de las fuentes renovables es intermitente y depende de varias condiciones no controladas se consideró también la implementación de un sistema de almacenamiento basado en baterías. De ahí que las baterías se utilicen en estos sistemas HRES para suplir los déficits de potencia y actuar como medio de almacenamiento de energía a corto plazo. Es por esto que la interacción dinámica entre las distintas fuentes de energía y las cargas requiere una estrategia de gestión de la energía que permita minimizar el costo de generación de energía una institución hospitalaria.
3. La implementación de un sistema HRES implica ciertos problemas de protección, por lo que es necesario instalar dispositivos de protección adecuados para garantizar la seguridad. Además, la introducción de estos generadores distribuidos exigirá una mejora en los sistemas de protección existentes. Basado en esta razón, si en el planteamiento del problema de esta investigación se consideraba a la red de MT como una fuente de alimentación se requeriría agregar unas restricciones o ecuaciones relacionados con estudios de coordinación de protecciones, pero esto se escapa de la problemática resuelta en esta investigación.

En conclusión, se recomienda en primera instancia la implementación de los sistemas HRES en modo OFF-GRID porque estos sistemas autónomos son menos adaptables a las fluctuaciones de carga. Una gran variación de la carga podría incluso provocar el colapso de todo el sistema. Es por esto, que la estabilidad del sistema dependerá de los controladores de carga asociados a cada uno de los generadores del sistema HRES.

En la tabla 17, se muestran los componentes del sistema HRES.

*Tabla 17 Componentes del sistema HRES.*

<b>Componentes del sistema HRES</b>	
<b>Sistema Renovable</b>	Sistema Fotovoltaico (FV)
<b>Sistema No Renovable</b>	Generador Diésel (GD)
<b>Sistema Almacenamiento</b>	Sistema de Baterías (BAT)
<b>Carga Abastecer</b>	Institución Hospitalaria que actúa como carga del Sistema HRES

Basado en la tabla 17, se consideraron a los componentes del sistema HRES como unidades despachable o no despachable. Las unidades despachables, son aquellas que permiten ajustar la potencia de salida de manera arbitraria, dentro de unos límites de operación. Para este caso, se consideró como unidades despachable al generador diésel (GD) porque permite regular la potencia de salida controlando un flujo de entrada de combustible. También podría considerarse como unidad despachable el sistema de baterías siempre y cuando cumpla con el límite de operación para el estado de carga (SOC). Mientras tanto, las unidades no despachable son aquellas en las que la producción de energía vendrá determinada por las condiciones meteorológicas. Para este caso, se consideró como unidad no despachable al sistema fotovoltaico (FV).

En la tabla 18, se muestra la función objetivo que se optimiza, la forma de operación y el aspecto fundamental de funcionamiento propuesto para el sistema HRES.

*Tabla 18 Consideraciones Sistema HRES.*

<b>Objetivo Sistema HRES</b>	Reducir Costos de generación del generador diésel (GD).
<b>Operación Sistema HRES</b>	De forma Aislada (Off-Grid)

En la tabla 19, se describen los aspectos fundamentales del problema de optimización propuestos para el sistema HRES.

**Tabla 19 Descripción Del Problema De Optimización**

<b>Descripción Del Problema De Optimización</b>	
<b>Descripción</b>	Se abordó el problema de optimización del flujo de energía en sistemas HRES mediante el uso de algoritmos genéticos evolutivos.
<b>¿En qué consiste el problema?</b>	Determinar a corto plazo (1 día) la producción óptima de varios sistemas de generación de energía.
<b>¿Función Objetivo del Problema?</b>	Se realizó la optimización desde el punto de vista de un único objetivo, minimizar el costo de producción de energía ( $C_{GD}$ ) de las unidades despachables, en este caso del generador diésel (GD) para abastecer la demanda eléctrica de las cargas hospitalarias.

Otras consideraciones que no se consideraron en la formulación del problema fueron las siguientes:

- Por lo tanto, el objetivo principal del problema será el de cubrir para cada instante de tiempo la demanda de potencia de la carga hospitalaria mediante una gestión óptima de los generadores considerados y del sistema de almacenamiento de energía.
- Toda la potencia generada debe ser consumida de forma instantánea por las cargas o almacenada en sistemas de almacenamiento.
- Se realizará la optimización del funcionamiento del sistema HRES durante un período de un día entero. Esto a partir de los datos de la demanda (kWh) y la generación en cada hora de los sistemas.
- No se tuvo en cuenta la estabilidad eléctrica del sistema HRES, porque se consideró que tanto los generadores como las cargas y sistema de almacenamiento trabajan a la misma tensión y que además las pérdidas a través de las líneas son despreciables.

**Nota:**

La estrategia de control implementada para este sistema HRES fue la estrategia de control del lado de la fuente. Esta estrategia busca obtener la mayor cantidad de energía de la fuente primaria, dentro de esta tarea de control se incluye la protección en el lado de la fuente en caso de funcionamientos anormales, este funcionamiento es automático de cada unidad y no requiere coordinación con ningún generador, se basa en la lógica programada en cada generador. Como tareas principales se garantizará lo siguiente: Control primario de tensión y frecuencia, máximo aprovechamiento del recurso primario, control de reactivos mediante los convertidores electrónicos manteniendo el factor de potencia lo más cerca de la unidad y desconexión de la fuente en caso de detectarse una falla en la red.

**4.2 Diagrama de bloques algoritmo desarrollado.**

En la figura 28 se describen las cuatro fases correspondientes a los diagramas de bloques que conforman el modelo de optimización propuesto. En la primera fase (Fase 1), se definen el perfil de demanda y los parámetros asociados al escenario de simulación propuesto para el sistema HRES. Antes de pasar a la segunda fase existe un condicional donde se evalúa que

la energía generada por el generador diésel (GD) se encuentren dentro del rango de generación establecido en los parámetros técnicos de los generadores. En la segunda fase (Fase 2), se procede a realizar la simulación del flujo de energía en el horizonte de un día. En la tercera fase (Fase 3), se realiza la optimización del flujo de energía (kW/h), donde se evalúa la función objetivo que busca minimizar el costo de producción de energía ( $C_{GD}$ ) de las unidades despachables, en este caso del generador diésel (GD). En esta misma fase, se buscará a través de la implementación de una técnica heurística identificar los rangos de generación y costos de operación donde se garantice la operación óptima del sistema. En la cuarta fase (Fase 4), se realizará la validación estadística de los resultados obtenidos.

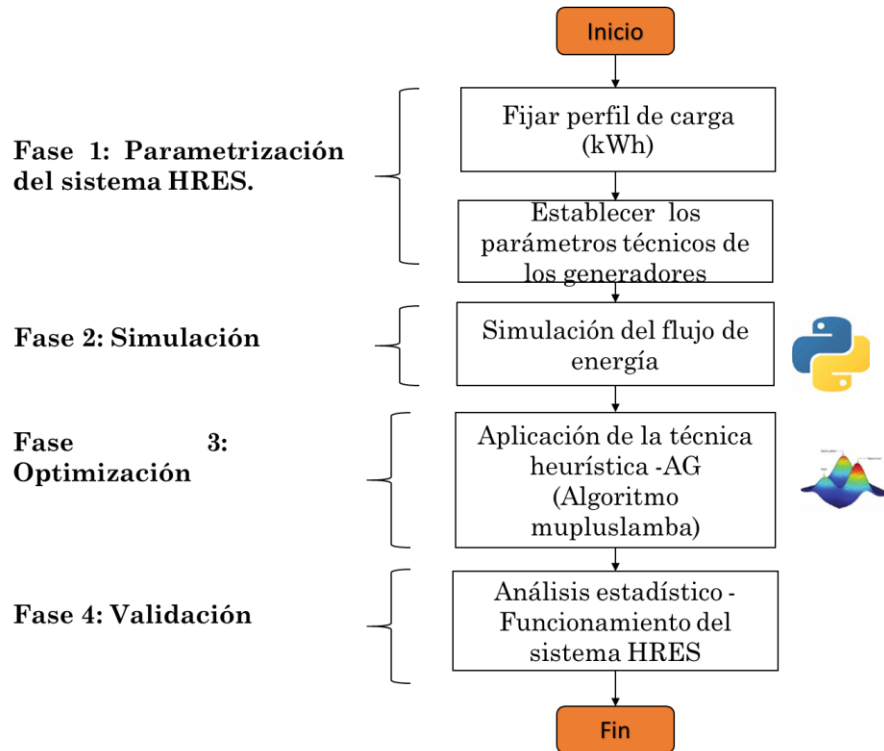


Figura 28 Diagrama de Flujo Modelo Matemático, Fuente Propia.

### 4.3 Ecuaciones matemáticas.

De acuerdo a la revisión realizada en la literatura a continuación se indican las ecuaciones utilizadas para realizar el modelo matemático.

#### 4.3.1 Sistema fotovoltaico (FV).

La potencia de salida (kW) de una celda fotovoltaica en un tiempo  $t$  se define mediante la siguiente ecuación 9 [95].

$$P_{PV(t)} = N_{PV} \times n_{PV} \times P_{STC} \times \frac{GA(t)}{G_{STC}} \times (1 + (T_c(t) - T_{STC}) \times C_T), \quad (9)$$

Donde:

- $N_{PV}$ , Numero de Paneles FV.

- $n_{PV}$ , Eficiencia del Panel FV.
- $P_{STC}$ , Potencia Nominal del Panel FV.
- $GA(t)$ , Radiación global recibida por los paneles FV (kW/m<sup>2</sup>).
- $G_{STC}$ , Radiación Solar bajo STC (GSTC=1 kW/m<sup>2</sup>).
- $T_c$ , Temperatura del Panel FV.
- $T_{STC}$ , temperatura estándar STC.
- $C_T$ , es el coeficiente de temperatura del panel FV.

Para calcular la energía producida por el sistema fotovoltaico (FV), se implementó la ecuación 10:

$$E_{PV(t)} = P_{PV(t)} \times t, (10)$$

Por otra parte, mediante la ecuación 11 permitió modelar la temperatura del panel FV como un vector de perturbación del sistema debido a la naturaleza estocástica del clima.

$$T_c(t) = T_{amb} + \frac{GA(t)}{G_{STC}} \times (NOCT - 20), (11)$$

Donde:

- $NOCT$ , Es la temperatura de operación normal de la celda en °C.

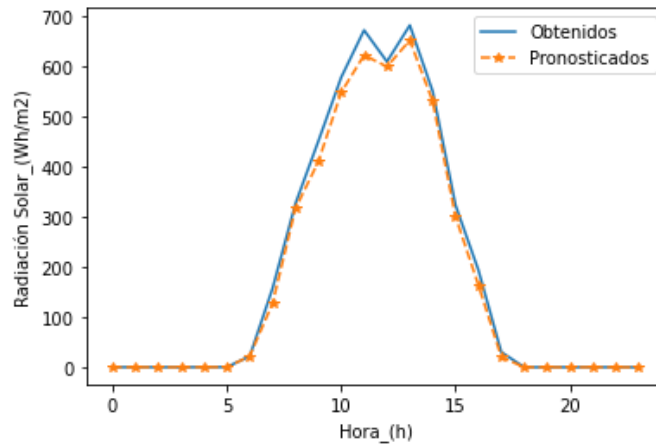
En la tabla 20, se definen los parámetros referentes al sistema fotovoltaico.

*Tabla 20 Parámetros Sistema FV*

Definición	Símbolo	Unidad
Numero de Paneles FV	$N_{PV}$	[Unidad]
Eficiencia del Panel FV	$n_{PV}$	[ %]
Potencia Nominal del Panel FV	$P_{STC}$	[W]
Radiación global recibida por los paneles FV	$GA(t)$	[kW/m <sup>2</sup> ]
Radiación Solar bajo STC (GSTC=1 kW/m <sup>2</sup> )	$G_{STC}$	[kW/m <sup>2</sup> ]
Temperatura Ambiente	$T_{amb}$	°C
Temperatura del Panel FV	$T_c$	°C
Temperatura estándar STC	$T_{STC}$	°C
Tiempo de utilización Sistema FV	$t$	[h]

En [96], los autores resumieron un esquema simple para ajustar un modelo ARMA a datos históricos de energía solar. El modelo que propusieron proporciona una herramienta lineal fácil de implementar para pronosticar futuros escenarios por hora o para integrarse en modelos de toma de decisiones. En resumen, la metodología de este modelo se aplicó en los datos históricos de la radiación solar asociados a una fuente fotovoltaica, para crear escenarios futuros para el modelo de optimización planteado que permite realizar la operación y planificación del sistema HRES. En la figura 29, se muestra la gráfica de los

datos de radiación solar obtenidos desde la fuente meteorológica del IDEAM y la gráfica de los datos pronosticados mediante el modelo ARMA propuesto en [96].



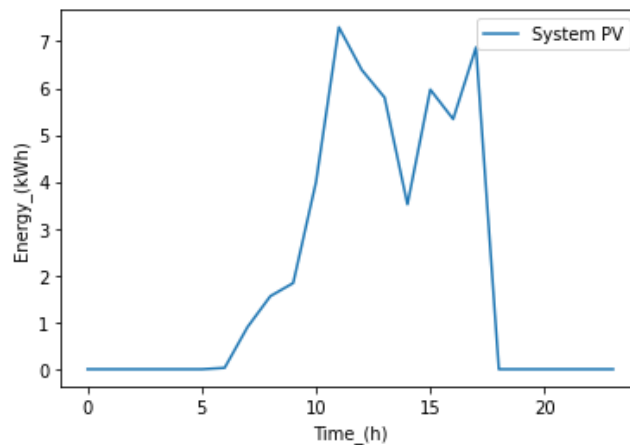
*Figura 29 Radiación Solar Datos Obtenidos Vs Pronosticados.*

En la tabla 21, se muestra la variable creada referente a la energía aprovechada por el sistema fotovoltaico.

*Tabla 21 Variables Sistema FV.*

Definición	Símbolo	Unidad
Potencia Producida Sistema FV	$P_{PV(t)}$	[kW]
Energía Producida Sistema FV	$E_{PV(t)}$	[kWh]

En figura 30, se muestra la generación de energía ( $E_{PV(t)}$ ), de un sistema fotovoltaico conformado por 37 paneles solares de 200W /24V policristalino, marca ERA.



*Figura 30 Energía Producida Sistema Fotovoltaico ( $E_{PV(t)}$ ), - Paneles Solares de 200W.*

#### 4.3.2. Generador diésel (GD).

Los generadores convencionales son normalmente motores diésel acoplados a un generador. Los generadores diésel suministran energía de dos formas. La primera forma, consiste en que generan solo la energía que necesita la carga (seguidor de carga), o generan a la potencia

nominal y la energía excedente (si la hubiera) se utiliza para cargar el banco de baterías. En este estudio se considera un generador diésel que funciona de acuerdo al esquema seguidor de carga. El modelo de generador está diseñado de tal manera que el generador diésel siempre funciona entre el 80 y el 100% de su potencia nominal de kW, mientras funciona junto con el banco de baterías y otros generadores renovables. La energía generada por un generador diésel en un periodo de tiempo (t) se define mediante la siguiente ecuación 12,[97].

$$E_{DEG}(t) = P_{DEG}(t) \times \eta_{DEG} \times t, (12)$$

Donde:

- $P_{DEG}$ , Potencia nominal.
- $\eta_{DEG}$ , Eficiencia del generador diésel.
- t, tiempo de utilización del generador diésel.
- $E_{DEG}(t)$ , salida de energía por hora del generador diésel.

Los generadores diésel se utilizan como fuente de energía de reserva en sistemas de energía híbridos. Cuando no hay potencia de salida del panel fotovoltaico y el banco de baterías ha descargado toda la energía almacenada dentro de su profundidad permitida, el generador diésel comenzará a funcionar y su potencia nominal debe ser al menos igual a la carga máxima de pico en la curva de carga anual. El consumo de combustible del generador diésel ( $FC_G$ ) puede calcularse mediante la siguiente ecuación 13:

$$FC_G = A_G \times E_{DEG} + B_G \times E_{DEG}, (13)$$

Donde:

- $FC_G$ , Consumo de combustible generador diésel (l/h).
- $E_{DEG}$ , Energía de salida generador diésel (kWh).
- $A_G, B_G$  son los coeficientes de la curva de consumo de combustible.

En la tabla 22, se definen los parámetros referentes a la planta de generación diésel.

**Tabla 22 Parámetros generador diésel.**

<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>
Eficiencia del generador diésel	$\eta_{DEG}$	[ % ]
Tiempo de uso generador diésel	t	[h]
Tipo de generador utilizado	$R_2$	[kW]
Coefficientes de la curva de consumo de combustible 1	$A_G$	[l /kWh]
Coefficientes de la curva de consumo de combustible 2	$B_G$	[l /kWh]

En la tabla 23, se muestra la variable creada referente a la energía aprovechada por el generador diésel y el consumo de la misma.



*Tabla 23 Variables generador diésel*

Definición	Símbolo	Unidad
Energía Producida generador diésel	$E_{DEG}(t)$	[kWh]

### 4.3.3 Sistema de baterías.

La batería pasará al modo de carga, cuando la energía producida por el sistema fotovoltaico sea mayor que la demanda de la carga. Mientras que, en caso de déficit de energía por partes del sistema fotovoltaico, la batería se someterá a un modo de descarga para satisfacer la demanda [98].

El flujo de energía (kWh) a través de la batería viene dado por la ecuación 14.

$$E_{bat(t)} = \sum E_{PV(t)} + \sum E_{DEG(t)} - \frac{E_{L(t)}}{\eta_{Inv}}, \quad (14)$$

Donde:

- $E_{L(t)}$ , Energía consumida por la carga, "kWh".
- " $\eta_{inv}$ " es la eficiencia del inversor.
- $E_{PV(t)}$ , Energía del sistema FV.
- $E_{DEG(t)}$ , Energía generador diésel.

Un valor positivo de la ecuación 14 significa el modo de carga de la batería y un valor negativo indica el modo de descarga de la batería. La operación de carga y descarga de la batería cambia el estado de carga de la batería (SOC) y se puede calcular con la ecuación 15:

$$SOC^{t+1} = SOC^t + \frac{E_{batt}^t}{E_{cap}}, \quad (15)$$

Donde:

- $SOC^t$ , estado de carga inicial.
- $E_{batt}$ , es el valor de la energía almacenada en el sistema de baterías.
- $E_{cap}$ , capacidad sistemas de baterías [kWh].

La mayoría de los modelos de baterías imponen "reservas de giro" tanto para la carga como para la descarga. Los valores típicos son  $0.2 < SOC < 0.8$ .

En la tabla 24, se muestra la variable creada referente a la energía almacenada por el sistema de baterías, número de baterías y estado de carga del sistema de baterías.

**Tabla 24 Variables Sistema Baterías**

<b>Definición</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>
Energía Almacenada Sistema de Baterías	$E_{bat}(t)$	[kW/h]
Estado de Carga Sistema de Baterías	$SOC(\%)$	[%]

En las referencias [99 – 106], se muestran algunos artículos de investigación considerados para analizar, evaluar y optimizar el rendimiento de los sistemas HRES. A continuación, se describe cada uno de ellos:

En [99], los autores propusieron un método de optimización para los sistemas solares autónomos integrando ultracondensadores para responder a la exigencia de potencia de pico. El programa de optimización tiene un paso de tiempo capaz de recoger las fluctuaciones de la carga y perfiles de radiación solar y genera la mejor orientación según el sitio para que el panel fotovoltaico genere la máxima potencia anual. Además, estudiaron sobre el sistema de gestión de la energía para el sistema completo con la restricción impuesta de la carga completa de los ultracondensadores entre las potencias máximas.

En [100], los autores desarrollaron un modelo matemático para optimizar un sistema híbrido de energía solar-eólica con almacenamiento para una isla remota mediante un algoritmo genético (AG). Evaluaron cuatro casos diferentes y los resultados lo compararon con el programa informático HOMER, ampliamente utilizado, lo que demuestra que el método de AG puede producir un sistema más óptimo que el HOMER en lo que respecta al coste y la fiabilidad del sistema. Además, analizaron el rendimiento simulado del sistema y los efectos de la probabilidad de pérdida de suministro eléctrico (LPSP), la variación de la carga y los recursos energéticos renovables sobre el costo del sistema.

En [101], en este trabajo los autores hicieron un estudio exhaustivo de los enfoques de control optimizado relativos a la integración de las fuentes de energías renovables (FER) en las microrredes, su clasificación en términos de estructura, características, funcionamiento, restricciones, funciones, costos, ventajas e inconvenientes. En este estudio se enfocaron en los algoritmos de optimización avanzados y convencionales utilizados en las aplicaciones de las microrredes. En general, brindaron una revisión que sobre los esfuerzos que se están realizando para el desarrollo de una integración confiable de las energías renovables utilizando algoritmos de optimización eficientes para futuras aplicaciones.

En [102], en este artículo los autores revisaron las técnicas de simulación y optimización, así como las herramientas existentes que son necesarias para simular y diseñar sistemas híbridos autónomos para la generación de electricidad.

En [103], en este artículo los autores se centraron en la evaluación de la fiabilidad, los beneficios económicos y medioambientales de los recursos energéticos renovables en un sistema de microrredes. Para esto implementaron un análisis del ciclo de vida un sistema de microrredes que consta de un generador fotovoltaico, un aerogenerador, un sistema de almacenamiento eléctrico y un generador diésel para comprobar sus perspectivas comerciales

en comunidades rurales que no tienen acceso a la electricidad debido a las limitaciones económicas y técnicas. En este trabajo de investigación demuestran que con la utilización de tecnologías verdes en un sistema de microrred se optimiza la fiabilidad, el ahorro de costes, el coste del ciclo de vida y el impacto medioambiental. La técnica adoptada en el estudio puede servir de referencia para los proyectos de electrificación rural y resolver los problemas socioeconómicos asociados a los cortes de energía.

En [104], en este artículo los autores se centraron en la evaluación de la fiabilidad, los beneficios económicos y medioambientales de los recursos energéticos renovables en un sistema de microrredes. Los objetivos de investigación consistieron en minimizar el costo de la energía, el costo del ciclo de vida, el costo anual de la pérdida de carga y el costo de las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida, así como mejorar el beneficio global de las tecnologías verdes en el sistema de microrred propuesto. Basado en esto demostraron que la utilización de tecnologías verdes en un sistema de microrred optimiza la fiabilidad, el ahorro de costos, el costo del ciclo de vida y el impacto medioambiental. Por último, resaltaron que la técnica adoptada en el estudio puede servir de referencia para los proyectos de electrificación rural y resolver los problemas socioeconómicos asociados a los cortes de energía.

En [105], en este artículo de investigación los autores evaluaron el rendimiento de diferentes algoritmos evolutivos para el dimensionamiento óptimo de un sistema híbrido FV/WT/batería para satisfacer continuamente la demanda de carga con el mínimo coste total anual (TAC). En el problema de optimización planteado, también se consideró la máxima probabilidad de pérdida de suministro eléctrico permitida para tener un sistema fiable, y se utilizan tres algoritmos heurísticos conocidos, a saber, la optimización por enjambre de partículas (PSO), la búsqueda tabú (TS) y el recocido simulado (SA), y cuatro algoritmos metaheurísticos de reciente invención, a saber, la optimización de enjambre de partículas mejorada (IPSO), la búsqueda armónica mejorada (IHS), el recocido simulado basado en la búsqueda armónica mejorada (IHSBSA) y la optimización de enjambre de abejas artificial (ABSO), se aplican al sistema y los resultados se comparan en términos de TAC. Por último, los autores observaron que no sólo los resultados medios producidos por ABSO son más prometedores que los de los otros algoritmos, sino que también ABSO es el más robusto.

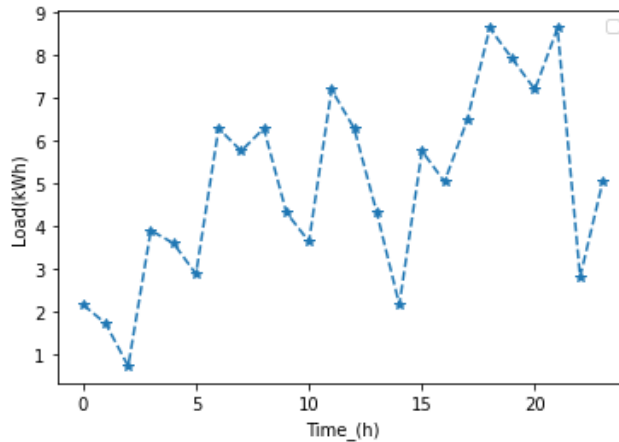
En [106], en este artículo de investigación los autores proponen un algoritmo genético (AG) para abordar el problema combinado de unidades (UC) y despacho económico (ED). Para ello, escogieron un modelo de microrred junto con todas las variables de control y las restricciones físicas. Para operar óptimamente la microrred, desarrollaron tres modos de operación. Los dos primeros atienden a la optimización de los factores económicos y ambientales, mientras que el último modo de operación considera los errores inducidos por las incertidumbres en la previsión de la demanda. Así, consiguieron un diseño robusto que garantiza el suministro de energía para diferentes niveles de confianza. Finalmente, el algoritmo lo aplicaron a un escenario de ejemplo para ilustrar su funcionamiento. Los resultados de simulación obtenidos demuestran la validez del enfoque propuesto por los autores.

#### 4.3.4 Demanda hospitalaria (kWh).

La demanda hospitalaria (kWh) corresponde a la energía necesaria para abastecer a los equipos médicos de las siguientes áreas de un hospital de nivel de atención 1. Estas áreas son las siguientes:

- Urgencias.
- Laboratorio Clínico.
- Toma e Interpretación De Radiografías Odontológicas.
- Consulta Odontológica General y Especializada.
- Radiología e Imágenes Diagnosticas.
- Hospitalización Obstétrica.
- Otros Equipos.

De acuerdo a la tabla 25, se proyecta los datos de consumo de energía de acuerdo a los equipos médicos instalados y se obtiene el siguiente perfil del consumo de energía (kWh) por áreas para un hospital de nivel de atención 1. Esto se puede observar en la figura 31.



*Figura 31 Perfil de Demanda - Hospital de Nivel 1, Fuente Propia*

En el apartado 2 de la sección anexos se puede validar como se realizó el perfil de demanda (kWh) de una instalación hospitalaria sobre un camino Browniano mediante la aplicación de un método aproximado que permitió resolver la ecuación diferencial estocástica (SDE) seleccionada, siendo esta una alternativa interesante para simular la volatilidad en el consumo de energía.

A continuación, en la tabla 25 se muestra en detalle los equipos médicos asociados a cada una de las áreas medicas mencionadas anteriormente.

**Tabla 25 Equipos Médicos Hospital De Nivel de Atención 1 [107].**

Nivel	Servicio	Equipo	Potencia (W)	Potencia Total Instalada (W)
1	Urgencias	Desfibrilador	100	364,85
		Monitor De Signos Vitales	36	
		Aspirador De Secreciones	184	
		Bomba De Infusión	15	
	Laboratorio Clínico	Agitador De Mazzini	230	2399,10
		Microscopio Binocular	30	
		Microcentrífuga	100	
		Lámpara Para Visualizar RH	40	
		Lámpara Con Visor De Aglutinación	40	
		Horno De Secado De Material	800	
		Espectrofotómetro	60	
		Centrífuga (12 Tubos)	120	
		Baño Serológico	500	
		Autoclave	300	
		Toma e Interpretación de Radiografías Odontológicas	Equipo Rayos X Odontológico	
	Consulta Odontológica General y Especializada	Unidad Odontológica (Con Sillón Con Cabecera Anatómica, Escupidera, Lámpara Odontológica De Luz Fría, Bandeja Para Instrumental, Eyector, Jeringa Triple, Módulo Con Acople Para Piezas De Mano, Micromotor, Contra-Ángulo, Negatoscopio Y Compresor De Aire)	100	108,91
	Radiología e Imágenes Diagnósticas	Equipo De Rayos X (Mesa Radiográfica)	3000	3343,34
	Hospitalización Obstétrica	Electrocardiógrafo	240	726,44
		Bomba De Infusión	15	
		Lámpara Quirúrgica Portátil O Pie lítica	40	
		Monitor De Signos Vitales	36	
		Lámpara De Calor Radiante	60	
		Incubadora De Transporte	240	
		Monitor Fetal	36	
	Otros Equipos	Luces (Fluorescentes)	11	2184,77
		Cargador de Teléfonos Móviles	5	
		Ventilador de Techo (CD, AC)	100	
Bomba de agua		100		
Computador		200		
Calentador eléctrico portátil		1500		
Radio		10		
Impresora (tinta, láser)		80		

#### 4.4 Función objetivo.

En este problema se implementará una función objetivo que minimizará el costo de producción de energía ( $C_{GD}$ ) de las unidades despachables, en este caso del generador diésel (GD). El costo de funcionamiento de un sistema de generación de energía puede expresarse como una función de su potencia real y suele modelarse como un polinomio cuadrático. Para minimizar el costo de producción de energía ( $C_{GD}$ ) que permitirá funcionar al generador diésel se implementará la ecuación 16 [106]:

$$\min CE = \sum_{t=0}^{t=24} C_{GD,t} \cdot (16)$$

Donde:

- $C_{GD,t}$  es el costo de combustible del generador diésel (CGD) en un instante t.

La finalidad de desarrollar este modelo es para obtener una planificación óptima de la generación tanto de las unidades despachables como del sistema de almacenamiento. Esto se realiza con el fin de minimizar el costo de producción de energía ( $C_{GD}$ ).

#### 4.4.1 Costo de combustible del generador diésel ( $C_{GD}$ ).

El costo de combustible del generador diésel (GD), se obtiene a partir de la siguiente ecuación 17 [106].

$$C_{GD,t} = A_{GD}E_{GD,t} + B_{GD}E^2_{GD,t}, \forall t, (17)$$

Donde:

- $C_{GD,t}$ , es el costo total del combustible (\$COP/h) en el momento t.
- $E_{GD,t}$ , es la energía de salida en el momento t
- $A_{GD}$ ,  $B_{GD}$ , son los coeficientes de la curva de consumo de combustible. Estos son especificados por el fabricante y están fuertemente condicionados por el tipo de motor, generador y combustible.

#### 4.5 Restricciones.

Para minimizar el costo de producción de energía ( $C_{GD}$ ) de las unidades despachables, se consideraron las siguientes restricciones:

##### 4.5.1 Balance de energía.

El balance de energía se debe cumplir en todo momento. Esto significa que la cantidad de energía generada debe coincidir con la energía demandada más la almacenada en todo instante de tiempo. Esto se puede expresar en la ecuación 18.

$$E_{L(t)} = E^i_{PV(t)} + E^j_{bat(t)} + E^s_{DEG(t)}, (18)$$

##### 4.5.2 Generador diésel (GD) – Unidad despachable.

Debido a que el generador diésel (GD) recibe como entrada un flujo de combustible (diésel) y como resultado proporciona una energía de salida ( $E_{DEG(t)}$ ) en un instante de tiempo, la energía de salida de esta unidad se encontrara restringida por una banda de operación expresada en la ecuación 19.

$$E^s_{GD(t)_{min}} \leq E^s_{GD(t)} \leq E^s_{GD(t)_{max}}, (19)$$

Donde:

- $E^S_{DEG(t)min}$  y  $E^S_{DEG(t)max}$ , son los límites de operación del generador diésel.

### 4.5.3 Sistema de almacenamiento de energía – Sistema de baterías.

Es necesario considerar que la batería será tratada como un sistema dinámico, es decir, un sistema que evoluciona con el tiempo dependiendo de su estado anterior y la potencia entregada o demandada. Así definimos el estado de carga en un instante de tiempo  $t$   $SOC^J_{(t)}$  como la cantidad de energía (kWh) almacenada en el sistema de baterías en dicho instante de tiempo. De esta forma, el estado de carga del sistema de baterías (SOC) se acotará en todo momento por la capacidad de la misma mediante la ecuación 20.

$$0.2 \leq SOC^J_{(t)} \leq 0.8, (20)$$

Donde:

- $SOC^J_{(t)}$ , Estado de carga del sistema de baterías.

También es necesario tener en cuenta, que el sistema de baterías es un sistema dinámico cuyo estado de carga evoluciona con el tiempo de acuerdo al estado previo y a la energía entregada o absorbida en dicho instante de tiempo.

Para esta restricción, se debe tener en cuenta lo siguiente:  $E_{bat,t}$ , puede tomar tantos valores negativos como positivos. En el caso de que  $E_{bat,t} > 0$ , quiere decir que el sistema de baterías se encuentra suministrando energía a la carga hospitalaria, y por consiguiente el estado de carga en el instante de tiempo siguiente debe ser inferior al actual ( $SOC_{t+1} < SOC_t$ ). Por otro lado si  $E_{bat,t} < 0$ , el sistema de batería actúa demandando energía y se carga, es decir ( $SOC_{t+1} > SOC_t$ ).

La última restricción, considerada para el sistema de baterías está relacionada con la máxima capacidad de carga/descarga de la batería, que se puede establecer mediante la ecuación 22.

$$E^j_{bat(t)min} \leq E^j_{bat(t)} \leq E^j_{bat(t)max} - \text{Sistema de Baterías}, (22)$$

En el apartado 3, de la sección anexos se puede validar como se realizó el dimensionamiento de los sistemas de generación que integran el sistema HRES.

### 4.6 Modelo matemático desarrollado.

A continuación, se describen los parámetros asociados al modelo matemático donde se buscará minimizar el costo de generación de energía ( $C_{DEG}$ ) para la unidad despachable (generador diésel) perteneciente al sistema HRES. En la tabla 26 y 27 se anexan los índices y el modelo matemático desarrollado.

Tabla 26 Índices Modelo Matemático.

Nomenclatura	
Índices	Descripción
<i>i</i>	Índice del Sistema Fotovoltaico
<i>j</i>	Índice del Sistema de Baterías.
<i>s</i>	Índice del Generador Diésel
<i>t</i>	Índice de tiempo.

Tabla 27 Formulación Modelo Matemático.

Modelo Matemático Para Minimizar El Costo el Costo de Generación de Energía ( $C_{GD}$ ) Sistema HRES	
<b>Variables de Entrada</b>	
$E_{L,t}$	Energía consumida por las cargas asociadas a cada una de las áreas hospitalarias
$E_{pv,i}$	Energía producida por el sistema fotovoltaico (FV)
$t$	19 pasos -- Tiempo de análisis 24 horas.
<b>Parámetros</b>	
<b>Parámetros Generador Diésel</b>	
$E_{GDmin,s}$	Energía mínima generador diésel [kWh]
$E_{GDmax,s}$	Energía máxima generador diésel [kWh]
<b>Parámetros Sistema de Almacenamiento</b>	
$E_{Batmin,j}$	Energía mínima sistema de baterías[kWh]
$E_{Batmax,j}$	Energía máxima sistema de baterías [kWh]
$SOC_{min,t}$	Estado de carga mínimo sistema de baterías [%]
$SOC_{max,t}$	Estado de carga máximo sistema de baterías [%]
$SOC_{ini,t}$	Estado de carga inicial sistema de baterías [%]
<b>FUNCIÓN OBJETIVO</b>	
<b>Función Objetivo Min. Costo De Generación De Energía (<math>C_{GD}</math>).</b>	
$\min CC = \sum_{t=0}^{t=23} C_{GD,t}$	
<b>RESTRICCIONES</b>	
$C_{GD,t} = A_{GD}E_{GD,t} + B_{GD}E_{GD,t}^2, \forall t$ $E_{GD}(t) = P_{GD}(t) \times \eta_{GD} \times t$ $E_{GD(t)min}^s \leq E_{GD(t)}^s \leq E_{GD(t)max}^s$	} <b>Generador Diésel</b>
$E_{L(t)} = E_{PV(t)}^i + E_{bat(t)}^j + E_{GD(t)}^s$	} <b>Balance Energético</b>
$E_{bat(t)min}^j \leq E_{bat(t)}^j \leq E_{bat(t)max}^j$	} <b>Sistema de Baterías</b>
$SOC^{t+1} = SOC^t + \frac{E_{batt}^t}{E_{cap}}$ $0.2 \leq SOC_{(t)}^j \leq 0.8$	



## **4.7 Metodología - Algoritmo Genético (GA).**

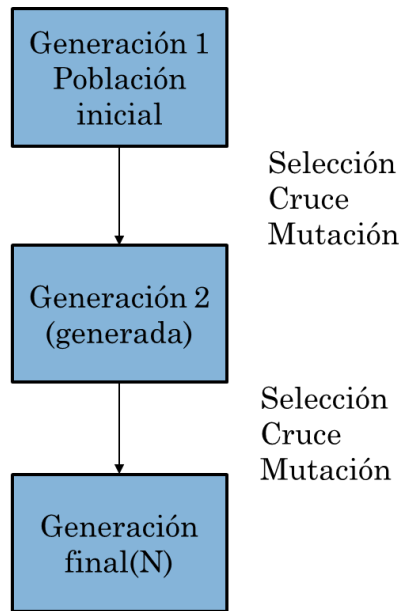
Las técnicas heurísticas consisten en algoritmos que proporcionan soluciones factibles (admisibles), aunque no alcancen el óptimo, al menos se acercan a su valor en un tiempo de cálculo razonable. Estas técnicas se caracterizan en la mayoría de los casos por ser procedimientos muy simples y muchas veces basados únicamente en el sentido común. En esta investigación se utilizó una técnica heurística porque de acuerdo a la naturaleza del problema de estudio no se necesita obtener una solución óptima, sino una solución satisfactoria que oriente sobre el comportamiento del problema.

Mientras tanto las técnicas de computación blanda se utilizan para implementar la capacidad humana de pensar, razonar y optimizar en la computadora. Dentro de estas técnicas se encuentran los algoritmos genéticos, los cuales son técnicas de optimización metaheurísticas. Están basados en la teoría evolucionista de Charles Darwin (Darwin 1859). Esta teoría indica que los individuos que mejor se adaptan al medio son aquellos que tienen más probabilidades de dejar descendencia y cuyos genes pasarán a las siguientes generaciones. Este algoritmo está conformado por unos operadores básicos que son la selección, el cruce y la mutación. La idea principal, consiste en realizar una búsqueda guiada a partir de un conjunto inicial de posibles soluciones denominado población inicial, el cual va evolucionando a mejor en cada iteración del algoritmo. El algoritmo (GA), inicialmente selecciona una población aleatoria. La aptitud de cada individuo se calcula en función de alguna función de aptitud. Los individuos altamente aptos proceden a cruzarse con otros individuos de la población. Después del cruce, la mutación se aplica a cada gen individualmente. Con todos estos beneficios, este algoritmo también tiene algunos inconvenientes, como, por ejemplo, La tasa de convergencia es muy mala. Para mejorar esto se debe hacer un gran cálculo sobre la población, lo que requiere un tiempo de ejecución [108, 109].

### **4.7.1 Funcionamiento algoritmo genético (AG).**

Cada vez que se crea un nuevo conjunto de individuos, se crea una nueva generación y dicho proceso termina con la generación final, la cual debe incluir los mejores individuos encontrados a lo largo de las generaciones.

En la figura 32, se representa el funcionamiento de un algoritmo genético (AG). Como se puede observar, se parte de una población inicial aleatoria y a través de operaciones genéticas se van obteniendo nuevas generaciones hasta que se alcanza la población final.



*Figura 32 Esquema de funcionamiento algoritmo genético (AG),[108].*

#### 4.7.2 Operadores genéticos.

Los operadores genéticos son de tres tipos. Estos son los siguientes, [108]:

- **Selección (Selection):** Es el procedimiento por el cual se seleccionan los individuos que participaran en las operaciones de cruce y mutación. Es un procedimiento siempre elitista, de forma que un individuo tendrá mayor probabilidad de dejar descendencia si su fitness es más adecuado al problema de optimización.
- **Cruce(mate):** La operación cruce es una operación probabilística que permite que dos individuos seleccionados crucen o intercambien su información genética para crear nuevos individuos.

Es importante indicar que la operación de cruce es probabilística, esto quiere decir que, aunque dos individuos sean seleccionados, pueden que no sean modificados. La operación cruce, es un hiperparámetro que se debe definir.

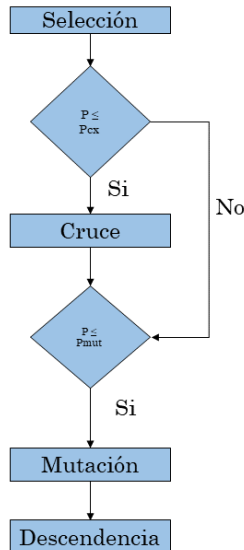
- **Mutación(mutation):** Es una operación probabilística que permite que un individuo seleccionado modifique su información genética para crear un nuevo individuo.

Al igual que el cruce, la mutación es una operación probabilística cuyo resultado depende de la probabilidad de la mutación, la cual también se debe definir como otro hiperparámetro. No existe un valor óptimo que sirva para todos los problemas.

#### 4.7.3 Funcionamiento operaciones genéticas.

A continuación, en la figura 33 se describe el funcionamiento de las operaciones mencionadas anteriormente, [108 - 109].

1. En un algoritmo genético clásico, primero se realiza la selección de individuos. Estos individuos seleccionados se cruzan, en caso de que la probabilidad sea favorable y después se mutan de nuevo en caso de que la probabilidad sea favorable. El ajuste de las probabilidades de cruce y mutación es sumamente importante para el funcionamiento adecuado de un algoritmo genético (AG).



**Figura 33 Flujo de creación de la descendencia de una población, Algoritmo Genético (GA),[108].**

Como ambas operaciones son probabilísticas, se puede dar el caso de que un individuo que se ha seleccionado no sea modificado debido a que ninguna de las probabilidades le sea favorable. Es decir, puede suceder que el individuo ni se cruce ni se mute. Por lo tanto, pasaría a la siguiente generación sin ningún tipo de modificación.

#### 4.7.4 Selección del algoritmo genético (AG).

A continuación, se describen los mecanismos de cruce (mate), mutación (mutation), selección (selection) y el algoritmo genético (AG) seleccionado.

##### 4.7.4.1 Mecanismos selección (Selection).

El mecanismo de selección escogido es el (SelTournament) que nos permitirá realizar una selección mediante torneo [110].

La selección mediante torneo se presenta en la figura 37 y funciona de la siguiente forma:

1. Se selecciona de manera aleatoria un número **tourntsize** de individuos de la población **individuals**.
2. En cada selección existen reemplazos por lo que un individuo puede ser seleccionado varias veces en un mismo torneo.
3. Los individuos seleccionados compiten entre ellos para ganar el torneo utilizando el desempeño obtenido por cada uno al evaluar la función de fitness.
4. El individuo con mejor desempeño es el que ganará el torneo y será quien participe en las operaciones genéticas.

5. Este proceso se repite hasta seleccionar un total de **k** individuos.

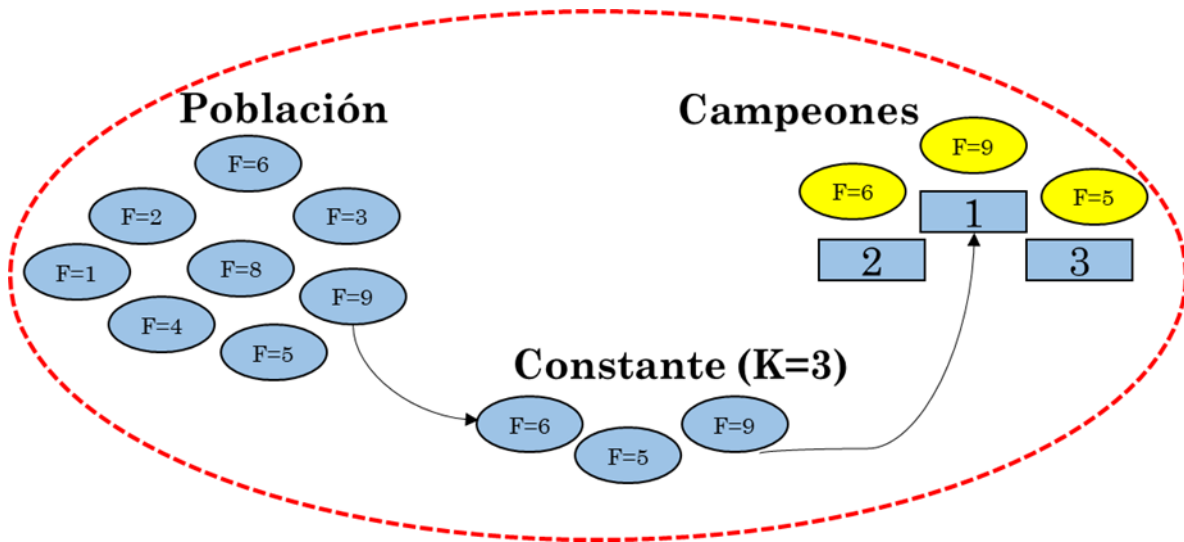


Figura 37 Mecanismo de selección (*SelTournament*) - Algoritmo Genético (GA) [110].

#### 4.7.4.2 Mecanismo de cruce (Mate).

En este caso se utilizará el operador *cxtwopoint* (*ind1*, *ind2*), ver figura 38. Este mecanismo ejecuta un cruce de dos puntos en los individuos de la secuencia de entrada. Los dos individuos se modifican en su lugar y ambos mantienen su longitud original [111].

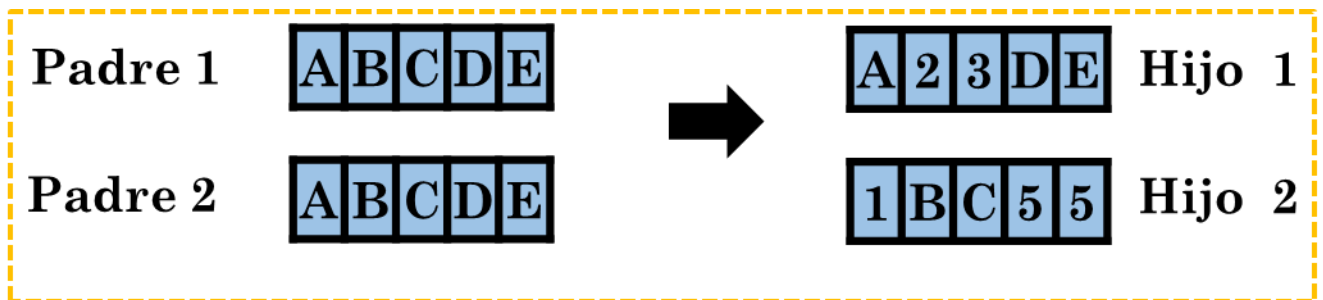


Figura 38. Mecanismo de cruce (*cxtwopoint*) - Algoritmo Genético (GA) [111].

#### 4.7.4.3 Mecanismo de mutación (Mutation).

El mecanismo seleccionado para la mutación ha sido el operador *matGaussian* (mutación Gaussiana) con una media de cero y una desviación típica de 1. Estos valores son solo de ejemplo y no garantizan ser los más adecuados. Es por esto que se deben probar distintos valores para ver el funcionamiento del Algoritmo Genético (AG) en función de dichos valores.

El operador *matGaussian* (mutación Gaussiana) ver figura 39, consiste en mutar con una probabilidad (*indpb*) para cada uno de los genes del individuo, sumado a cada uno de ellos una cierta cantidad aleatoria. Esta cantidad genera una función de probabilidad Gaussiana (o normal) de media ( $m\mu$ ) y desviación típica sigma ( $\sigma$ ).

Es importante elegir adecuadamente el parámetro (indpb), que define la probabilidad de mutación de cada gen de cruce. Estas son operaciones probabilísticas.

En resumen, el método matGaussian (mutación Gaussiana), recibe como parámetros de entrada un individuo seleccionado y los parámetros ( $\mu$ ), ( $\sigma$ ) e (indpb) [112].

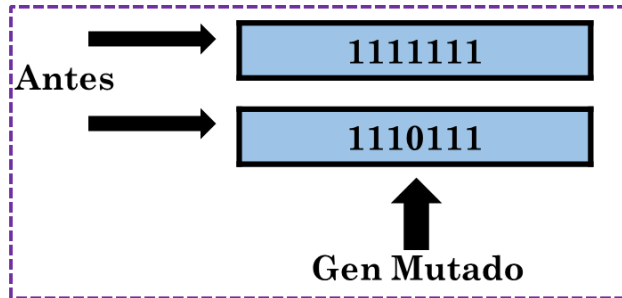


Figura 39. Mecanismo de mutación (matGaussian) - Algoritmo Genético (GA) [112].

En este problema de optimización se va a utilizar una implementación popular de los Algoritmos Genéticos (AG) llamada **Algoritmo mu plus lambda ( $\mu + \lambda$ )**, ver figura 39.

Este es un algoritmo elitista y también requiere más tiempo de computación. Sin embargo, también arroja mejores resultados en una gran cantidad de posibles escenarios. El funcionamiento de este algoritmo se basa en que cada nueva generación se extrae a partir de la llamada población extendida que no es más que la combinación de la población actual (de tamaño  $\mu$ ) y la descendencia (de tamaño  $\lambda$ ). En este algoritmo los hijos tienden a competir con los padres para pasar a la siguiente generación, ver figura 40 [108].

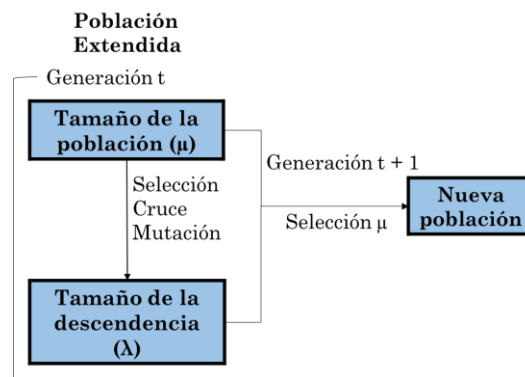


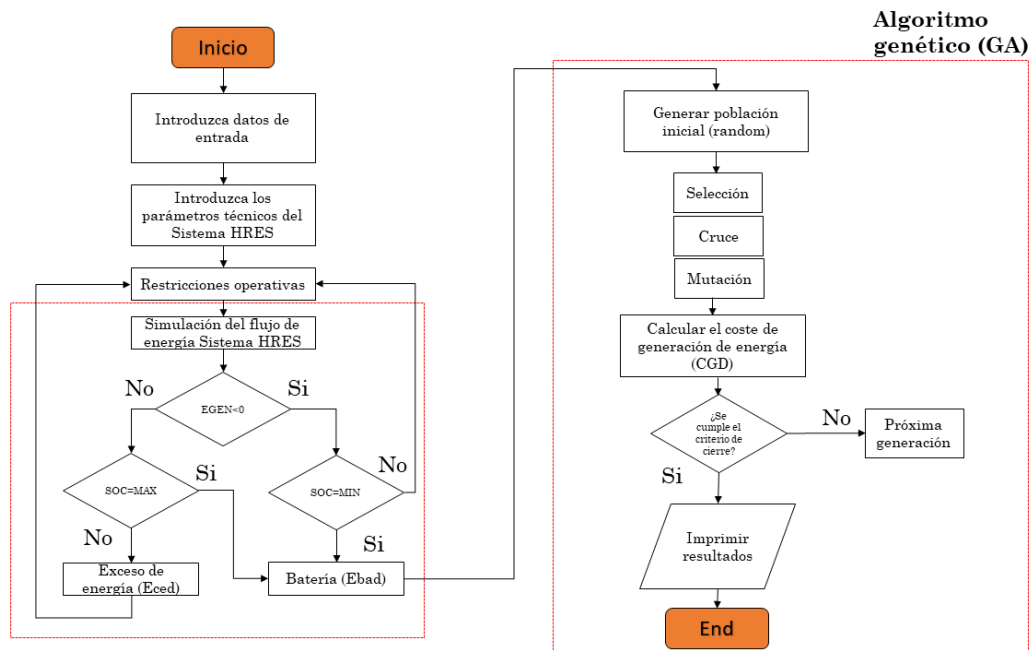
Figura 40 Algoritmo mu plus lambda ( $\mu+\lambda$ ) [108].

En la tabla 28, se presentan los parámetros que debemos tener en cuenta para ejecutar el algoritmo, son los siguientes:

**Tabla 28 Parámetros Algoritmo Genético (AG).**

Mecanismos	Parámetros	Devoluciones
<b>Selección (SelTournament)</b>	<p><b>Individuos:</b> Una lista de individuos para seleccionar.</p> <p><b>k :</b> El número de personas a seleccionar.</p> <p><b>Tournsize:</b> El número de personas que participan en cada torneo.</p> <p><b>fit_attr :</b> El atributo de las personas que se utilizará como criterio de selección.</p>	Una lista de individuos seleccionados
<b>Cruce (Mate)</b>	<p><b>ind1:</b> El primer individuo que participa en el cruce.</p> <p><b>ind2:</b> El segundo individuo que participa en el cruce.</p>	Una Tabla de dos individuos
<b>Mutación (Mutation)</b>	<p><b>Individuo:</b> individuo que se va a mutar.</p> <p><b>Mu (<math>\mu</math>):</b> Media o secuencia de medias para la mutación de adición gaussiana.</p> <p><b>Sigma (<math>\sigma</math>):</b> Desviación estándar o secuencia de desviaciones estándar para la mutación de adición gaussiana.</p> <p><b>indpb:</b> probabilidad independiente de que se mute cada atributo.</p>	Una Tabla de dos individuos

En la figura 34, se muestra el algoritmo desarrollado para resolver el problema planteado en esta investigación.



**Figura 34 Algoritmo Desarrollado, Fuente propia.**

En la primera fase del algoritmo desarrollado, se establecen los datos de entrada, los parámetros técnicos y las restricciones operativas del sistema HRES. En la segunda fase, se aplica la técnica heurística. El procedimiento del algoritmo genético basado en la estrategia evolutiva **mu plus lambda** ( $\mu+\lambda$ ) es el siguiente:

1. A través de la función [**ef \_evalua\_despachable(E\_DG)**], se recibe como entrada los perfiles de energía del generador diésel y esta devuelve un cero si (E\_DG), está dentro de los límites de operación y pena de muerte en caso contrario
2. A través de la función [**coste\_DG (E\_DG)**], se calcula el costo instantáneo de combustible del generador diésel para proveer una energía de salida (E\_DG).
3. A través de la función [**def evolucion\_SOC(P\_ESS, SOC\_ini)**], se calcula el estado del sistema de baterías para el periodo de tiempo considerado. Sino se cumple con la restricción del estado de carga (SOC) se devuelve a las restricciones operativas.
4. A través de la función [**def evalua\_ESS(P\_ESS, SOC):**], se evalúa si se cumplen las restricciones del sistema de almacenamiento.
5. A través de la función [**def crea\_individuo():**], se genera de forma aleatoria individuo para la población inicial.
6. A través de la función [**def mutacion(individuo, indpb)**], se genera una mutación en individuos padres.
7. A través de la función [**def fitness(individuo)**], se evalúa la función objetivo o de fitness.

Este algoritmo fue desarrollado en Python utilizando la librería deap. Con respecto a los tiempos de simulación por lo general en cada escenario el algoritmo duro un tiempo promedio entre 20 y 25 minutos.

#### 4.8 Cálculo de las métricas de errores.

A continuación se destacan algunas de las métricas de errores que se pueden implementar para evaluar el modelo realizado. Estas son el error absoluto medio (MAE) y el error porcentual absoluto medio (MAPE) [113 - 114].

##### 4.8.1 Error absoluto medio (MAE).

El error absoluto medio (MAE) ver ecuación 23, es una métrica de evaluación de modelos que se utiliza con los modelos de regresión. El error absoluto medio de un modelo con respecto a un conjunto de pruebas es la media de los valores absolutos en los errores de predicción individuales para todas las instancias del conjunto de pruebas. Cada error de predicción es la diferencia entre el valor verdadero y el valor predicho para cada instancia [113].

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_i - \hat{y}_j|, (23)$$

Donde:

- $\{y_i\}$ , son las observaciones actuales de las series de tiempo.
- $\{\hat{y}_i\}$ ,son las series de tiempo estimadas o pronosticadas.

- $n$ , es el número de punto de datos no faltantes

#### 4.8.2 Error porcentual absoluto medio (MAPE).

El error porcentual absoluto medio (MAPE) (ver ecuación 24) es la media o el promedio de los errores porcentuales absolutos de los pronósticos. El error se define como el valor real u observado menos el valor pronosticado. Los errores porcentuales se suman sin tener en cuenta el signo para calcular MAPE. Esta medida es fácil de entender porque proporciona el error en términos de porcentajes. Además, debido a que se utilizan errores de porcentaje absoluto, se evita el problema de los errores positivos y negativos que se cancelan entre sí. En consecuencia, MAPE es una medida comúnmente utilizada en pronósticos. Cuanto más pequeño sea el MAPE, mejor será el pronóstico [114].

$$MAPE = \frac{100}{N} \times \sum_{i=1}^N \frac{|x_i - \hat{x}_i|}{x_i}, \quad (24)$$

Donde:

- $\{x_i\}$ , son las observaciones actuales de las series de tiempo.
- $\{\hat{x}_i\}$ , son las series de tiempo estimadas o pronosticadas.
- $n$ , es el número de punto de datos no faltantes.

#### 4.9 Resultados.

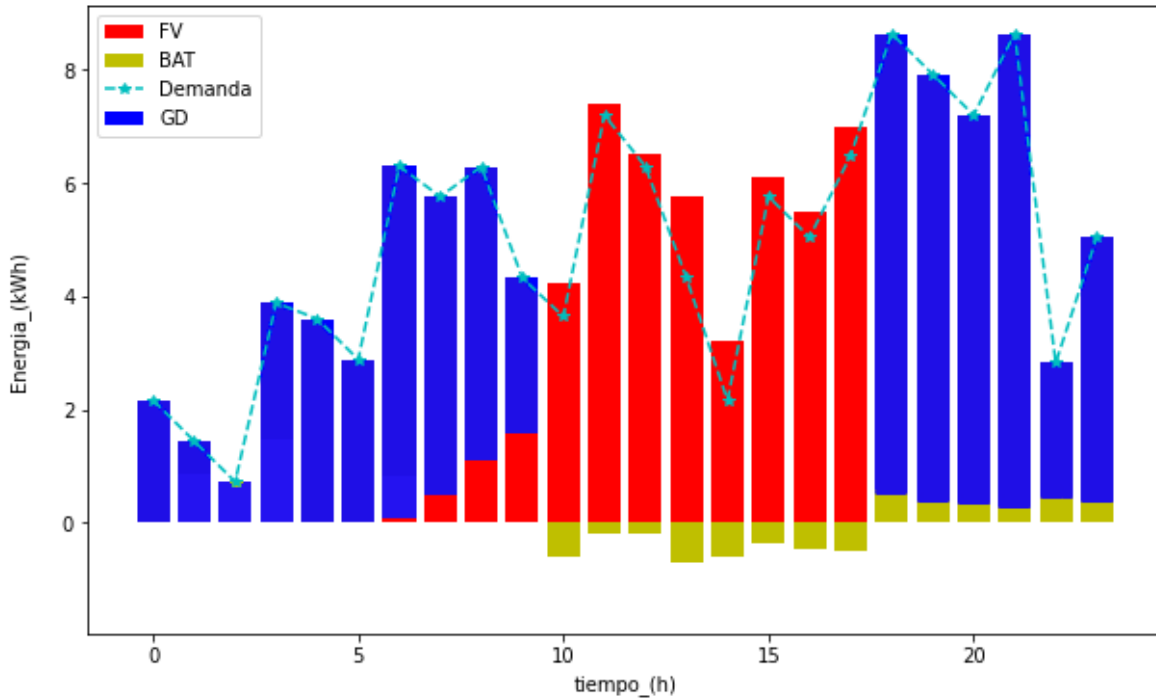
En esta sección se presentan los resultados obtenidos para las simulaciones realizadas en los distintos escenarios planteados y sin considerar la conexión a la red MT de la Institución Hospitalaria.

- **Escenario 1 - Caso base sistema de baterías SOC (20%):** Sistema HRES, considerando un estado de carga inicial SOC del (20%) para el sistema de baterías.
- **Escenario 2 – Sistema de baterías (40%):** Sistema HRES, considerando un estado de carga inicial SOC del (40%) para el sistema de baterías.
- **Escenario 3 - Sistema de baterías (60%):** Sistema HRES, considerando un estado de carga inicial SOC del (60%) para el sistema de baterías.

##### 4.9.1 Escenario 1 - Caso base sistema HRES SOC (20%).

En este escenario se realizó la simulación del flujo de energía en el sistema HRES considerando un estado inicial de carga del 20% para el sistema de baterías, ver figura 35. Para cada periodo de tiempo (t) se muestra la generación del generador diésel (GD), sistema fotovoltaico (FV). También se muestra el comportamiento del flujo de energía del sistema de baterías (BAT).

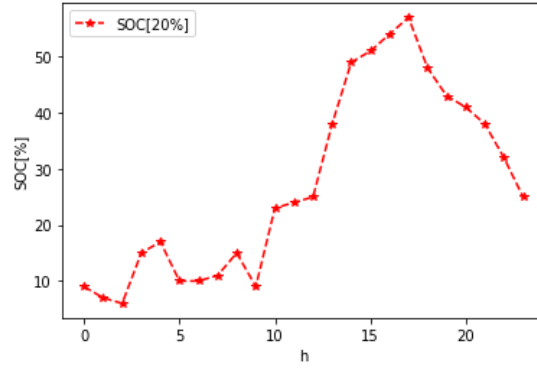




*Figura 35 Flujo de Energía Sistema HRES – Escenario 1.*

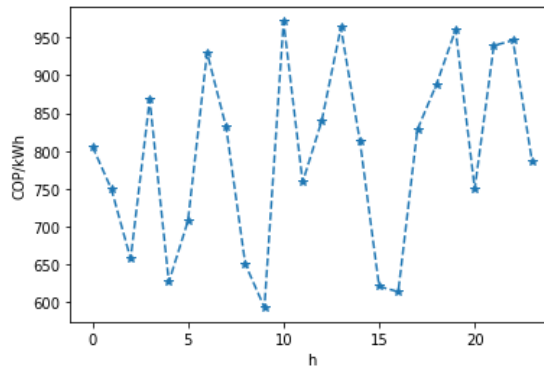
En la figura 35, se puede observar que desde el instante  $t = 0$  hasta el instante  $t = 5$  se utiliza parte de la energía disponible del generador diésel (GD) debido a que el sistema fotovoltaico (FV) por condiciones climatológicas no tiene disponibilidad de energía y el sistema de baterías por su estado de carga (SOC) inferior al 20% no es factible utilizarlo en este instante de tiempo. Por lo tanto, para satisfacer la demanda de la institución hospitalaria se debe recurrir al generador diésel. A partir del instante  $t = 6$  hasta el instante  $t = 17$  se puede observar el aporte energético del sistema fotovoltaico (FV) el cual permite tener una generación más limpia para satisfacer parte de la demanda hospitalaria. Desde el instante  $t = 10$  hasta el instante  $t = 17$  el sistema de baterías se carga por los excedentes de energía del sistema FV. A partir del  $t = 18$  hasta el  $t = 23$  la demanda hospitalaria se satisface utilizando la energía disponible del generador diésel (GD) y del sistema de baterías (BAT).

En la figura 36, se muestra el comportamiento del estado de carga (SOC) para el sistema de baterías. Para este escenario el sistema de baterías inicio en el periodo  $t = 0$  con un SOC del 20% y termino en el periodo  $t = 23$  con un SOC del 25%. El máximo SOC fue del 57% y se presentó en el periodo  $t = 17$ . En conclusión, para este escenario el SOC promedio fue del 27%.



**Figura 36 Estado de carga (SOC) Sistema de baterías – Escenario 1.**

En la figura 37, se muestra el comportamiento de los costos de generación de energía ( $C_{GD}$ ). Estos fueron los siguientes: costo mínimo (\$593,27 COP/ kWh), promedio (\$795,66 COP/ kWh) y máximo (\$970,90 COP/ kWh).



**Figura 37 \$COP/kWh – Escenario 1.**

El indicador MAE para el pronóstico realizado utilizando la SDE fue de 1,73%. Mientras tanto, el indicador MAPE para el pronóstico realizado utilizando la SDE fue de 2%, el cual representa un error bajo y además es un valor bastante bajo al estar por debajo del 5% de desviación.

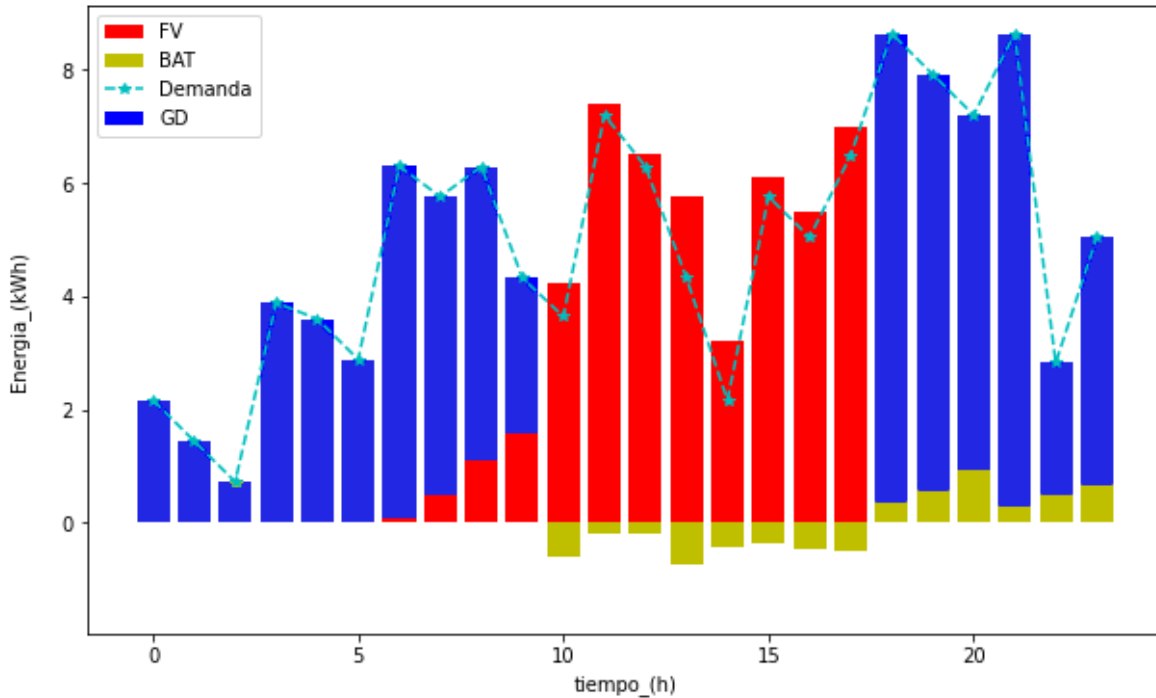
En la tabla 29 se presentan los resultados obtenidos del flujo de energía del sistema HRES para el escenario 1.

**Tabla 29 Resultados Flujo De Energía sistema HRES – Escenario 1.**

t	Demanda kWh	EFV (Wh)	EGD (Wh)	EBAT (Wh)	SOC %	\$COP/Wh
0	2,16	0	2,16	1,00	9%	806,07
1	1,72	0	1,72	0,85	7%	749,26
2	0,72	0	0,72	0,72	6%	657,42
3	3,9	0	3,9	1,75	15%	867,80
4	3,6	0	3,6	2,00	17%	626,80
5	2,88	0	2,88	1,22	10%	707,47
6	6,29	0,03	6,26	1,19	10%	929,79
7	5,76	0,9	3,6	1,26	11%	831,03
8	6,29	1,56	2,98	1,75	15%	650,38
9	4,32	1,84	1,48	1,00	9%	593,27
10	3,64	4	0	-0,36	23%	970,90
11	7,2	7,3	0	-0,10	24%	758,70
12	6,29	6,39	0	-0,10	25%	840,00
13	4,32	5,8	0	-1,48	38%	963,00
14	2,16	3,52	0	-1,36	49%	812,00
15	5,76	5,97	0	-0,21	51%	621,00
16	5,04	5,34	0	-0,30	54%	614,00
17	6,48	6,87	0	-0,39	57%	828,00
18	8,64	0	7,62	1,00	48%	888,00
19	7,92	0	7,27	0,65	43%	960,00
20	7,2	0	7	0,25	41%	750,00
21	8,64	0	8,32	0,32	38%	939,00
22	2,81	0	2,15	0,66	32%	946,00
23	5,04	0	4,2	0,84	25%	786,00

#### **4.9.2 Escenario 2 – Sistema HRES SOC (40%).**

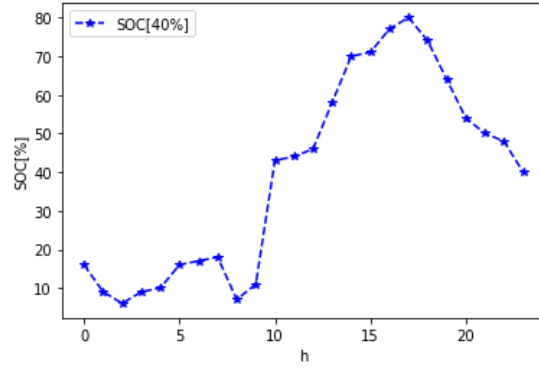
En este escenario se realizó la simulación del flujo de energía en el sistema HRES considerando un estado inicial de carga del 40% para el sistema de baterías, ver figura 38. Para cada periodo de tiempo (t) se muestra la generación del generador diésel (GD), sistema fotovoltaico (FV). También se muestra el comportamiento del flujo de energía del sistema de baterías (BAT).



**Figura 38 Flujo de Energía Sistema HRES – Escenario 2.**

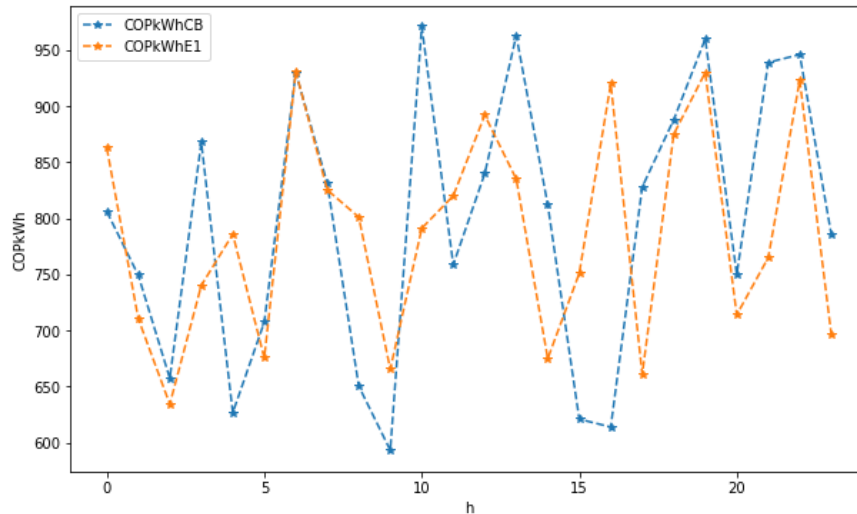
En la figura 35, se puede observar que desde el instante  $t = 0$  hasta el instante  $t = 5$  se utiliza parte de la energía disponible del generador diésel (GD) debido a que el sistema fotovoltaico (FV) por condiciones climatológicas y el sistema de baterías porque su estado de carga (SOC) es inferior al 20% no tienen la disponibilidad de energía suficiente para satisfacer la demanda de la institución hospitalaria. A partir del instante  $t = 6$  hasta el instante  $t = 17$  se puede observar el aporte energético del sistema fotovoltaico (FV) el cual permite tener una generación más limpia para satisfacer parte de la demanda hospitalaria. Desde el instante  $t = 10$  hasta el instante  $t = 17$  el sistema de baterías se carga por los excedentes de energía del sistema FV. A partir del  $t = 18$  hasta el  $t = 23$  la demanda hospitalaria se satisface utilizando la energía disponible del generador diésel (GD) y del sistema de baterías (BAT).

En la figura 39, se muestra el comportamiento del estado de carga (SOC) para el sistema de baterías. Para este escenario el sistema de baterías inicio en el periodo  $t = 0$  con un SOC del 16% y termino en el periodo  $t = 23$  con un SOC del 40%. El máximo SOC fue del 79.69% y se presentó en el periodo  $t = 17$ . En conclusión, para este escenario el SOC promedio fue del 35.63%.



**Figura 39 Estado de carga (SOC) Sistema de baterías – Escenario 2.**

En la figura 40, se muestra una comparación entre los costos de comparación para el escenario 1 y 2. Para el escenario 2 el comportamiento de los costos de generación de energía ( $C_{GD}$ ) fueron los siguientes: costo mínimo (\$614 COP/ kWh), promedio (\$756,35 COP/ kWh) y máximo (\$951,00 COP/ kWh). De acuerdo a esto, se deduce que hubo una disminución en los costos de generación del 5,25%. Esto se debió porque para este escenario el sistema de baterías inicio con SOC del 40% lo cual mejoro un poco más la gestión energética del sistema HRES.



**Figura 40 \$COP/kWh – Escenario 2.**

El indicador MAE para el pronóstico realizado utilizando la SDE fue de 3,90%. El indicador MAPE para el pronóstico realizado utilizando la SDE fue de 4%, el cual representa un error medio por debajo del 5% de desviación.

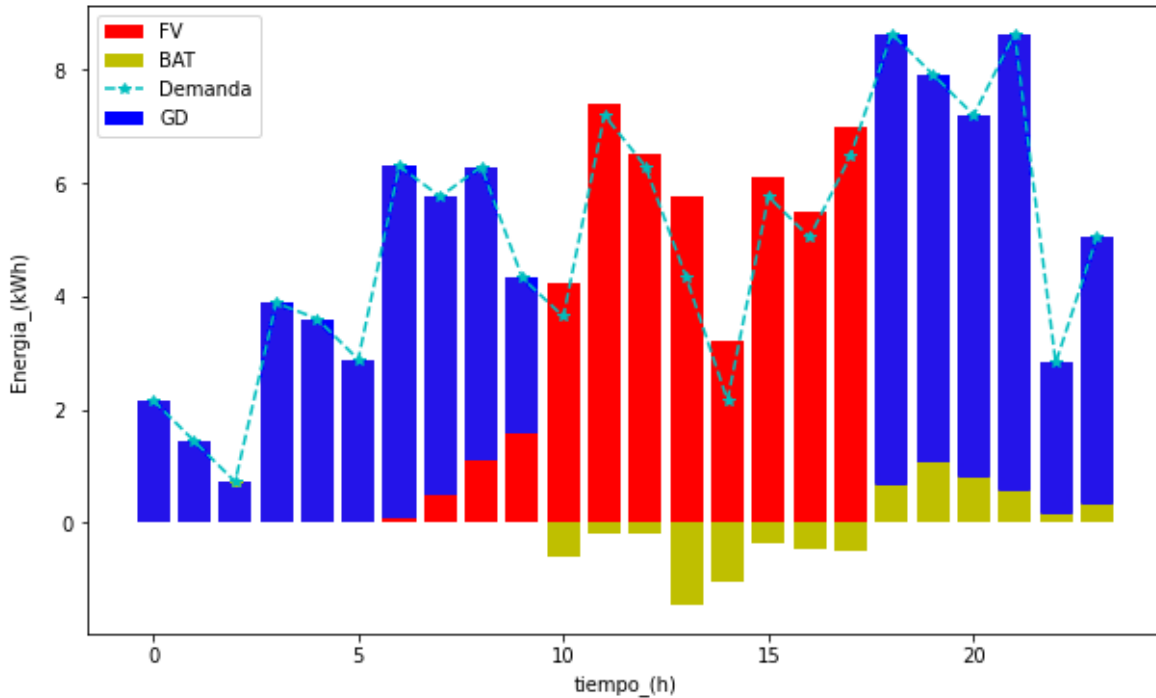
En la tabla 30 se presentan los resultados obtenidos del flujo de energía del sistema HRES para el escenario 2.

**Tabla 30 Resultados Flujo De Energía sistema HRES – Escenario 2.**

t	Demanda kWh	EFV (Wh)	EGD (Wh)	EBAT (Wh)	SOC %	\$COP/kWh
0	2,16	0,00	2,16	1,86	16%	862,75
1	1,72	0,00	1,72	1	9%	710,50
2	0,72	0,00	0,72	0,72	6%	634,33
3	3,9	0,00	3,9	1	9%	740,22
4	3,6	0,00	3,6	1,2	10%	785,90
5	2,88	0,00	2,88	1,9	16%	675,49
6	6,29	0,03	4,30	1,96	17%	931,07
7	5,76	1,00	2,70	2,06	18%	825,35
8	6,29	1,50	4,00	0,79	7%	801,04
9	4,32	1,80	1,20	1,32	11%	665,50
10	3,64	4,00	0,00	-0,36	43%	791,12
11	7,2	7,30	0,00	-0,1	44%	820,13
12	6,29	6,49	0,00	-0,2	46%	892,00
13	4,32	5,80	0,00	-1,48	58%	835,00
14	2,16	3,46	0,00	-1,3	70%	675,00
15	5,76	5,95	0,00	-0,19	71%	751,00
16	5,04	5,76	0,00	-0,72	77%	920,00
17	6,48	6,75	0,00	-0,27	80%	661,00
18	8,64	0,00	7,00	0,64	74%	875,00
19	7,92	0,00	6,75	1,17	64%	930,00
20	7,2	0,00	6,00	1,2	54%	714,00
21	8,64	0,02	7,00	0,4	50%	765,00
22	2,81	0,00	1,37	0,32	48%	923,00
23	5,04	0,00	3,15	0,89	40%	697,00

#### 4.9.3 Escenario 3 - Sistema HRES SOC (60%).

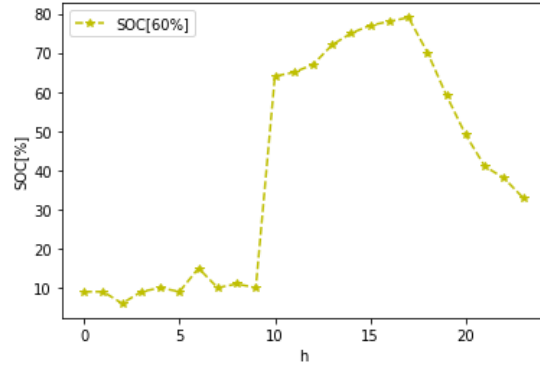
En este escenario se realizó la simulación del flujo de energía en el sistema HRES considerando un estado inicial de carga del 60% para el sistema de baterías, ver figura 41. Para cada periodo de tiempo (t) se muestra la generación del generador diésel (GD), sistema fotovoltaico (FV). También se muestra el comportamiento del flujo de energía del sistema de baterías (BAT).



*Figura 41. Flujo de Energía Sistema HRES – Escenario 3.*

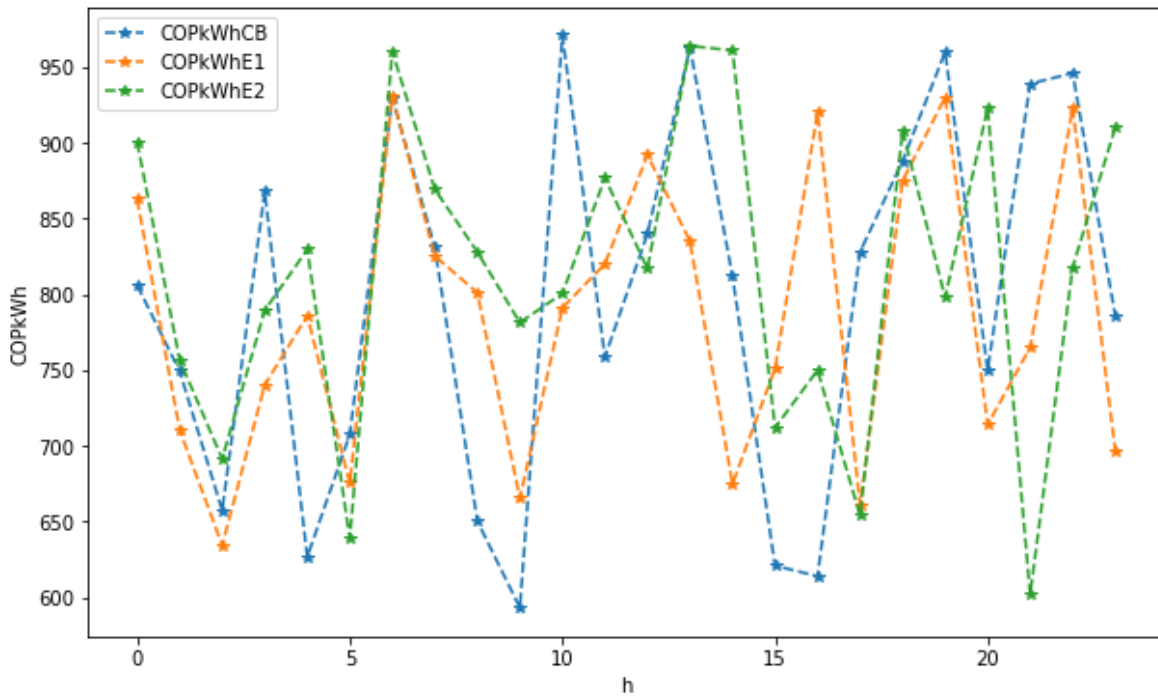
En la figura 35, se puede observar que desde el instante  $t=0$  hasta el instante  $t=5$  se utiliza parte de la energía disponible del generador diésel (GD) debido a que el sistema fotovoltaico (FV) por condiciones climatológicas y el sistema de baterías porque su estado de carga (SOC) es inferior al 20% no tienen la disponibilidad de energía suficiente para satisfacer la demanda de la institución hospitalaria. A partir del instante  $t=6$  hasta el instante  $t=17$  se puede observar el aporte energético del sistema fotovoltaico (FV) el cual permite tener una generación más limpia para satisfacer parte de la demanda hospitalaria. Desde el instante  $t=10$  hasta el instante  $t=17$  el sistema de baterías se carga por los excedentes de energía del sistema FV. A partir del  $t=18$  hasta el  $t=23$  la demanda hospitalaria se satisface utilizando la energía disponible del generador diésel (GD) y del sistema de baterías (BAT).

En la figura 42, se muestra el comportamiento del estado de carga (SOC) para el sistema de baterías. Para este escenario el sistema de baterías inicio en el periodo  $t=0$  con un SOC del 9% y termino en el periodo  $t=23$  con un SOC del 33%. El máximo SOC fue del 79% y se presentó en el periodo  $t=0$  lo cual fue un comportamiento a típico en la generación de los sistemas. En conclusión, para este escenario el SOC promedio fue del 40%



**Figura 42 Estado de carga (SOC) Sistema de baterías – Escenario 3.**

En la figura 43, se muestra una comparación entre los costos de comparación para él, escenario 1, 2 y 3. Para el escenario 3 el comportamiento de los costos de generación de energía ( $C_{GD}$ ) fueron los siguientes: costo mínimo (\$602,00 COP/ kWh), promedio (\$814,18 COP/ kWh) y máximo (\$964 COP/ kWh). De acuerdo a esto, se deduce que hubo una disminución en los costos de generación del 7,25%. Esto se debió porque para este escenario el sistema de baterías inicio con SOC del 60% y antes esta condición de SOC inicial el sistema de baterías para ciertos periodos de tiempo (t) sobrepasa el 80% de su estado de carga máxima lo cual no es recomendable porque afecta su vida útil. Por lo tanto, se requiere mayor generación del generador diésel lo cual aumenta un poco más los costos de generación de energía.



**Figura 43 \$COP/kWh Generador Diésel – Escenario 3.**



El indicador MAE para el pronóstico realizado utilizando la SDE fue de 4,0%. El indicador MAPE para el pronóstico realizado utilizando la SDE fue de 4,7%, el cual representa un error medio por debajo del 5% de desviación.

Debido a la Variación de los parámetros lambda, mu, NGEN se observa un incremento en el valor del error MAE oscilando por lo general en el 3,17%, esto debido a que se genera una cantidad de datos menor para las variables asociadas al balance energético del sistema HRES debido a que el generador diésel (GD) no fue utilizado en unos instantes de tiempos. Eso quiere decir que para realizar la predicción de los costos de generación de energía ( $C_{GD}$ ) para una instalación hospitalaria si se desea obtener un error de predicción que no sea muy significativo menor al 1% se debe generar una mayor cantidad para la población N y encontrar el valor óptimo para las variables de lambda y mu. Por lo tanto, la hipótesis de esta investigación se acepta, porque se demostró que con una buena gestión del estado de carga (SOC) del sistema de baterías menor será la energía aportada por el generador diésel en ciertos periodos de tiempo.

En la tabla 31 se presentan los resultados obtenidos del flujo de energía del sistema HRES para el escenario 3.

**Tabla 31 Resultados Flujo De Energía sistema HRES – Escenario 3.**

t	Demanda kWh	EFV (Wh)	EGD (Wh)	EBAT (Wh)	SOC %	\$COP/kWh
0	2,16	0,00	1,16	1	9%	900,47
1	1,72	0,00	0,72	1	9%	756,64
2	0,72	0,00	0,00	0,72	6%	691,47
3	3,9	0,00	2,90	1	9%	789,42
4	3,6	0,00	2,40	1,2	10%	829,57
5	2,88	0,0	1,88	1	9%	639,08
6	6,29	0,03	4,50	1,76	15%	960,41
7	5,76	0,90	3,70	1,16	10%	869,36
8	6,29	1,20	3,80	1,29	11%	827,97
9	4,32	1,80	1,30	1,22	10%	781,43
10	3,64	4,10	0,00	-0,46	64%	800,56
11	7,2	7,30	0,00	-0,1	65%	876,84
12	6,29	6,49	0,00	-0,2	67%	817,00
13	4,32	5,90	0,00	-1,58	72%	964,00
14	2,16	3,46	0,00	-1,3	75%	961,00
15	5,76	6,23	0,00	-0,47	77%	712,00
16	5,04	5,67	0,00	-0,63	78%	750,00
17	6,48	7,13	0,00	-0,65	79%	654,00
18	8,64	0,00	7,64	1	70%	908,00
19	7,92	0,00	6,65	1,27	59%	798,00
20	7,2	0,00	6,00	1,2	49%	923,00
21	8,64	0,02	6,65	0,97	41%	602,00
22	2,81	0,00	1,46	0,35	38%	818,00
23	5,04	0,00	3,87	0,59	33%	910,00

#### 4.9.1. Como conseguir resultados más consistentes.

Un algoritmo genético (AG) es un algoritmo que tiene muchos parámetros de ajuste que deben ser modificados para ver cómo afectan los resultados. Así para mostrar un resultado consistente debemos obtener y mostrar ciertas estadísticas sobre el comportamiento de nuestro algoritmo genético (AG) [108].

A continuación, se detallan algunas buenas prácticas, las cuales pueden ser aplicadas para obtener resultados más consistentes. Estas son:

- **Aumentar la población hasta que no veamos mejoras significativas.**  
Podemos probar con pocas generaciones e ir aumentando el número de individuos.
- **Aumentar el número de generaciones y comprobar que el algoritmo converja.**  
Para esto, lo ideal es mostrar una gráfica de convergencia del algoritmo.
- **Hacer un barrido de valores de probabilidades de cruce y mutación.**

En este caso, se aumentó el número de generaciones y se comprobó que el algoritmo convergía. En base a esto, aproximadamente entre 300 y 310 generaciones, el algoritmo genético pudo converger, lo que representó resultados más acordes con el problema planteado. En cuanto al tiempo de convergencia del algoritmo este convergió para cada escenario de simulación entre 20 y 25 minutos. El algoritmo fue desarrollado en el entorno de desarrollo integrado multiplataforma de código abierto para programación científica en el lenguaje Python y para el algoritmo genético implementado se utilizó DEAP que es una librería de algoritmos evolutivos distribuidos en Python.

## **CAPITULO 5.**

En esta sección se describen los siguientes aspectos relacionados con esta investigación:

- Conclusiones.
- Contribución principal.
- Trabajo futuro.

### **5.1. Conclusiones**

Gracias a la aplicación de los algoritmos genéticos en un sistema (HRES), se destacan las siguientes conclusiones principales:

- En primer lugar, se han calculado los flujos de energía óptimos del generador diésel (GD), sistema fotovoltaico (FV) y sistema de almacenamiento con el fin de minimizar los costos de generación del generador diésel (GD).
- En segundo lugar, mediante la implementación del algoritmo genético basado en la estrategia evolutiva  $\mu + \lambda$ , se logró demostrar que cuanto mayor sea la energía almacenada y con una buena gestión del estado de carga (SOC) del sistema de baterías (BAT) la energía generada por el generador diésel será menor en el sistema HRES reduciendo así los costos de producción de energía (CGD) del generador diésel (GD). De esta forma se dio respuesta a la hipótesis de investigación planteada.
- En tercer lugar, basado en los resultados obtenidos en esta investigación se recomienda la implementación en las instalaciones hospitalarias de sistema HRES acoplado en configuración AC/DC porque puede aumentar la disponibilidad de la fuente de energía y el ahorro de combustible diésel.

### **5.2. Contribución principal**

- Análisis y evaluación de la implementación de un sistema HRES sin conexión a la red de media tensión (off-grid) en el sector hospitalario de Colombia

### **5.3. Trabajo futuro**

- Realizar el análisis y evaluación de la implementación de un sistema HRES con conexión a la red de media tensión (on-grid) considerando la minimización de los costos de generación del generador diésel (GD) y la probabilidad de falla de suministro eléctrico (LPSP).

## -ANEXOS

A continuación, se detallan los anexos relacionados con cada uno de los capítulos de esta investigación.

### **1. Normatividad eléctrica aplicada a las instituciones de asistencia médica.**

Para el capítulo 1, se resaltan algunas normativas eléctricas que deben tenerse en cuenta en las instituciones de asistencia médica:

- **IEC 60364-7-710:** Requisitos para instalaciones o emplazamientos especiales - Emplazamientos médicos [19].
- **NFPA 99, Standard for Health Care Facilities:** Hace referencia sobre los estándares que se deben aplicar a las instalaciones de asistencia médica [115].
- **NTC 4405:** Eficiencia energética. Evaluación de la eficiencia de los sistemas solares fotovoltaicos y sus componentes. Establece una metodología para la evaluación de la eficiencia de los sistemas solares fotovoltaicos, reguladores y acumuladores [116].
- **Ley 697 de 2001:** Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones [117].
- **Ley 1715 de 2014:** Tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las Fuentes No Convencionales de Energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las Zonas No Interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético [118].

De la Ley 1715 de 2014 se derivó la siguiente resolución:

- **Resolución No. 030 DE 2018:** Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional [119].
- **IEEE Std. 602-2007:** Práctica recomendada para los sistemas eléctricos en los centros de atención sanitaria [121].
- **IEEE Std.446-1995:** Práctica recomendada para sistemas de energía de emergencia y de reserva para aplicaciones industriales y comerciales [122].

### **1.1.1 Características de las instalaciones eléctricas en Instituciones Médicas.**

El aspecto fundamental para este tipo de edificio es la capacidad limitada de los pacientes para protegerse ellos mismos contra fallas eléctricas, fuegos, corte del suministro, temperaturas extremas y otros peligros que pueden ser menos fatales para un usuario típico en otro tipo de edificios por lo que se deben diseñar sistemas críticos como iluminación, potencia, comunicaciones etc. que garanticen la confiabilidad de mecanismos y equipos indispensables para la preservación de la vida.

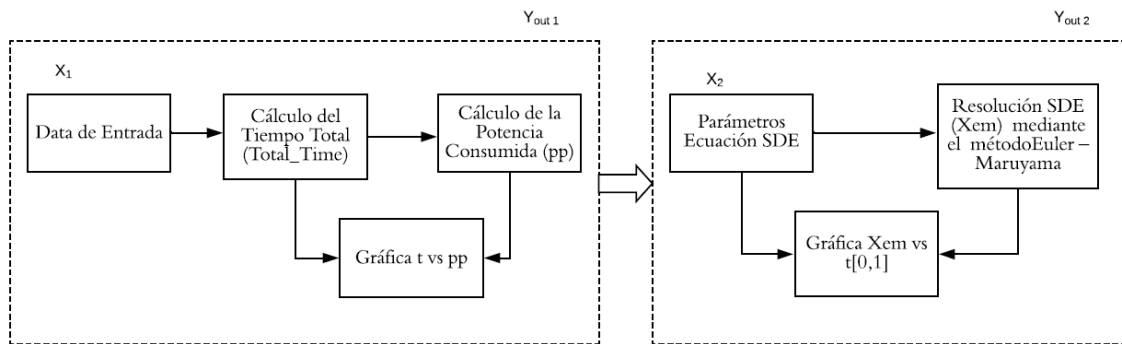
### **1.1.2 Consideraciones para sistemas integrados y sistemas solares fotovoltaicos.**

A continuación, se enumeran algunas recomendaciones de acuerdo a [18] que se deben tener en cuenta cuando se decida implementar algún tipo de sistema integrado y sistema fotovoltaico en una institución médica. Estas son las siguientes:

- Las instalaciones de sistemas integrados en las que es necesaria una parada ordenada (programada) para lograr una operación segura, deben cumplir los requisitos de la sección 685 de la NTC 2050.
- Las instalaciones de sistemas fotovoltaicos de generación de energía eléctrica, incluyendo sus los reguladores de tensión, cargadores e inversores, deben cumplir lo establecido en la sección 690 de la NTC 2050. En unidades de vivienda o similares no se permite la conexión de sistemas solares a más de 220 V. Cuando la carga de acumulación en las baterías supere los 1000 A/h, se deben instalar en un cuarto aireado, independiente al lugar donde se alojen los demás equipos del sistema solar.
- Si la instalación de paneles solares fotovoltaico, va a inyectar energía eléctrica a la red se debe considerar como un sistema autogenerador o un sistema de generación distribuida y debe cumplir los requisitos del capítulo de generación del presente reglamento.

## **2. Estimación del perfil de demanda kWh Hospitalaria.**

En la figura 44 se muestra el diagrama de bloques realizado para el modelo con el cual se realizó la estimación del perfil de demanda (kWh) para una Institución médica de nivel de atención 1.



**Figura 44 Diagrama de Bloques Detallado del Sistema- Perfil de demanda (kWh).**

El primer bloque (Bloque Demanda kWh sin Aleatoriedad) consiste en realizar un perfil de demanda kWh sin considerar ningún tipo de volatilidad en la carga. En primera instancia se realiza el cálculo del tiempo total (Total\_Time) donde se refleja el tiempo de utilización para los equipos médicos. Luego se realiza el cálculo de la potencia consumida (pp) para los equipos médicos asociados y a partir de estos cálculos realizados para las variables (t vs pp) se gráfica el perfil de demanda kWh sin aleatoriedad ( $Y_{out1}$ ). En el segundo bloque (Bloque SDE) se encuentra la metodología asociada para resolver la ecuación diferencial estocástica (SDE) mediante el método Euler – Maruyama. A través de un movimiento Browniano se gráfica la variable Potencia ( $X_{em}$ ) vs Camino Browniano (t) obteniendo un perfil de demanda kWh con aleatoriedad ( $Y_{out2}$ ). Además, se analiza el error absoluto medio y el error porcentual absoluto medio para los datos obtenidos a las variables ( $X_{em}$  y W) aplicando los indicadores MAE y MAPE.

### 3. Dimensionamiento de los sistemas de generación – Sistema HRES.

A continuación se detalla el dimensionamiento de los sistemas de generación utilizados en esta investigación.

#### 3.1 Sistema Fotovoltaico (FV).

Para dimensionar un sistema fotovoltaico es muy importante identificar las horas efectivas de sol (HSP) de la zona donde se desea instalar este sistema. Utilizando la herramienta Power Data Access de la NASA, en la tabla 32 se identificó las HSP mensual para el año 2019 en el municipio de Villanueva, La Guajira donde se encuentra ubicado el hospital Santo Tomas de Villanueva asociado al nivel 1 de prestación de servicio.

**Tabla 32 HSP, Villanueva - La Guajira Año 2019**

Villanueva, La Guajira (kWh/m <sup>2</sup> /mes)	
ENE	6,29
FEB	6,59
MAR	6,72
ABR	6,85
MAY	6,84
JUN	6,82
JUL	7,16
AGO	7,12
SEP	7,04
OCT	6,46
NOV	5,80
DIC	5,75

De acuerdo a los resultados plasmados en la tabla 33, se procedio a dimensionar el sistema FV considerando las HSP asociada al mes de Diciembre porque en este mes fue en el que se presento la menor cantidad de horas efectivas de sol.

**Tabla 33 Radiación mínima del lugar, Villanueva - La Guajira.**

<b>Radiación mínima del lugar, HSP (Villanueva , La Guajira)</b>	5,75
--	------

Teniendo en cuenta el valor de la HSP obtenido se verificó que se cumple con el criterio mínimo (5.44 HSP) para diseñar un sistema FV Aislado porque se busca fortalecer la resiliencia del sistema eléctrico hospitalario.

Además, para el sistema FV dimensionado, se escogió un voltaje de diseño de 24 V por dos razones principales. La primera está relacionada con el voltaje de los dispositivos (110/220 VAC) y la segunda razón está asociada al valor de la carga que se debe alimentar que es de 9345,2 W.

Luego se procedió a calcular el banco de paneles fotovoltaicos. Verificando en el mercado de paneles fotovoltaicos se seleccionó el siguiente panel fotovoltaico policristalino cuyas características son las siguientes, ver tabla 34.

**Tabla 34 Ficha Técnica Panel Fotovoltaico Seleccionado.**

<b>Ficha Técnica Panel Solar 200W 24V Policristalino - ERA</b>	
Potencia del Panel Solar (W)	200
Tipo de Cedula	Policristalino
Dimensiones del Panel Solar (mm)	1332*992*35
Voltaje Nominal a Máxima Potencia (Vm)	36,5
Corriente en Cortocircuito ISC (A)	5,81
Eficiencia del Módulo (%)	15,10%
Amperios Máximos de Salida IM (A)	5,48
Tensión en Circuito Abierto (VOC)	44,5
Voltaje de Trabajo del Panel Solar (V)	24
Peso del Panel Solar (kg)	14,1
Garantía del Panel Solar	25 años

Para el sistema FV dimensionado, se escogió un voltaje de diseño de 24 V por dos razones principales. La primera está relacionada con el voltaje de los dispositivos (110/220 VAC) y la segunda razón está asociada al valor de de la carga instalada que se debe alimentar que es de 9.

Basado en el Panel FV seleccionado y en la carga instalada se necesita una cantidad de 37 paneles de 200 W/24V en una configuración serie-párelo. En la tabla 35, se muestra el resumen del calculo realizado para el banco de paneles solares.

**Tabla 35 Cálculo del Banco de Paneles Fotovoltaicos.**

<b>Cálculo del Banco de Paneles Fotovoltaicos</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Carga Considerando el 50% de descarga de las baterías	W/h	14017,86
Carga con el Margen de Seguridad del 25%	W/h	17522,33
Pmax del Panel	W	200
Vmax del Panel	V	36,50
Imax del Panel	A	5,48
Vnp	V	24,00
HSP	h	5,75
Ept	wh	756,16
<b>Numero de Paneles</b>		<b>37</b>
<b>Paneles en Serie</b>		<b>1</b>
<b>Panales en Paralelo</b>		<b>37</b>



### 3.2 Sistema de baterías.

Para dimensionar el banco de baterías se procedió a utilizar la siguiente ecuación.

$$C_{nom\_banco} = \frac{E_{carga\_total} * (D_{aut} + 1)}{V_{nom} * P_{Dmax} * \eta_{BD} * \eta_{inv}} \quad (23)$$

Donde:

- $E_{carga\_total}$ , carga en AC abastecer.
- $D_{aut}$ , Días de autonomía.
- $V_{nom}$ , Tensión Nominal en el que va a trabajar el banco de baterías.
- $P_{Dmax}$ , Eficiencia de la Profundidad de Descarga Baterías.
- $\eta_{BD}$ , Eficiencia de Convertir Energía Química a Energía Eléctrica.
- $\eta_{inv}$ , Eficiencia del Inversor.

De acuerdo a lo anterior se obtuvo que la capacidad nominal del banco de baterías (Ah) debe ser de 1138,6 Ah. En la tabla 36, se presenta el resumen del cálculo realizado.

*Tabla 36 Cálculo del Banco de Baterías.*

Cálculo del Banco de Baterías		
Descripción	Unidad	Valor
Carga Total	wh	9345,2
Días De Austeridad	Dias	1,0
Voltaje nominal Sistema (Vnom)	V	24,00
Eficiencia de la Profundidad de Descarga Baterías	Pdmax	0,80
Eficiencia de Convertir Energía Química a Energía Eléctrica	$\eta_{BD}$	0,90
Eficiencia del Inversor	$\eta_{Inv}$	0,95
Capacidad nominal Banco Baterías (Ah)		<b>1138,6</b>

Para calcular el número total de baterías se procedió a utilizar la siguiente ecuación:

$$N_{BT} = \frac{V_{nom} * C_{nom\_banco}}{V_{nom\_bat} * C_{nom\_bateria}} \quad (24)$$

Donde:

- $V_{nom}$ , Tensión Nominal en el que va a trabajar el banco de baterías.
- $C_{nom\_banco}$ , Capacidad Nominal del banco de baterías.
- $V_{nom\_bat}$ , Tension nominal de la batería a utilizar.
- $C_{nom\_bateria}$ , Capacidad Nominal de la batería.

De acuerdo a lo anterior se obtuvo que se deben instalar una cantidad total de 4 baterías y se escogieron unas cuya capacidad nominal es de 486 Ah. En la tabla 37, se presenta el resumen del cálculo realizado.

**Tabla 37 Cantidad Total de Baterías.**

<b>Cantidad Total de Baterías</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Voltaje nominal sistema (Vnom)	V	24,00
Capacidad nominal Banco Batería (Ah)	Ah	1138,6
Voltaje nominal Batería (Vnom)	V	12,80
Capacidad nominal Batería (Ah)	Ah	486,00
Cantidad Total de Baterías		<b>4</b>
Cantidad de Baterías en Series		<b>2</b>
Cantidad de Baterías en Paralelo		<b>2</b>

### 3.3 Dimensionamiento generador diésel.

A continuación se presenta la tabla 38 resumen del generador diésel seleccionado.

**Tabla 38 Dimensionamiento generador diésel.**

<b>Carga Hospitalaria Instalada</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Carga Instalada Hospital de Nivel Uno</b>	9345,2	<b>W</b>
<b>2- Evaluación de la distancia de los equipos al generador</b>	-	-
Se utiliza un cable calibre 12 AWG - valor de resistencia	0,00531	ohmios/m
Distancia de los equipos	30	m
Resistencia eléctrica total	0,1593	ohmios
Extensión conformada por dos cables	0,3186	ohmios
Tensión de los equipos médicos	220	V
Corriente mínima del generador	42,48	A
Perdida por resistencia en el cable (Resistencia * Corriente al cuadrado)	574,88	W
Hasta este punto, necesitaríamos una planta mínima de	9920,08	W
<b>3. Lugar donde se utilizará la planta.</b>	-	-
Villanueva La Guajira - Temperatura Promedio (32 grados centígrados)	0,90	% de humedad
Perdidas por temperatura	8928,07	W
Hasta este punto, necesitaríamos una planta mínima de	18848,15	W
<b>4. Deja un margen adicional para futuras aplicaciones.</b>	-	-
Incremento del 20% con margen de seguridad	376,96	
Capacidad del generador diésel requerido	<b>19225,12</b>	<b>W</b>
Potencia Nominal	<b>24</b>	<b>kVA</b>

Teniendo en cuenta lo anterior, se requerirá un generador eléctrico que cubra 19225,2 W como potencia nominal y corriente mínima de 42,48 A, lo cual sería cubierto por los modelos disponibles en el mercado de 24 kVA.

Para el capítulo 4, se resaltan las ecuaciones matemáticas que permiten calcular la energía que circula por el inversor y controlador de carga del sistema (HRES).

### 3.4 Inversor de carga.

El generador fotovoltaico y la batería producen energía CC y, por lo tanto, cuando el sistema HRES contiene una carga CA, se requiere una conversión CC / CA. El modelo de inversor para generador fotovoltaico y banco de baterías se detalla en la ecuación 25:

$$E_{PVG-INV}(t) = E_{PV}(t) \times \eta_{Inv}, (25)$$

Donde:

- $E_{PVG-INV}(t)$ , salida de energía por hora del inversor (en el caso del sistema FV).
- $E_{PV}(t)$ , energía producida por el sistema FV.
- $\eta_{Inv}$ , es la eficiencia del inversor.

### 3.5 Controlador de carga.

Para evitar la sobrecarga de una batería, se utiliza un controlador de carga para detectar cuándo las baterías están completamente cargadas y para detener o disminuir la cantidad de energía que fluye desde la fuente de energía a las baterías. El modelo del controlador de carga se presenta en las ecuaciones 26,27 y 28:

$$E_{cc-out}(t) = E_{CC-IN}(t) \times \eta_{cc}, (26)$$

$$E_{cc-IN}(t) = E_{SUR-DC}(t), (27)$$

$$E_{SUR-DC}(t) = E_{PV}(t) - E_L(t), (28)$$

Donde:

- $E_{cc-out}(t)$ , Es la salida de energía por hora del controlador de carga.
- $E_{cc-IN}(t)$ , Es la entrada de energía por hora del controlador de carga.
- $E_{SUR-DC}(t)$ , es la cantidad de energía excedente de fuentes de CC.
- $\eta_{cc}$ , eficiencia del controlador de carga.

## Bibliografía.

- [1]. García Arbeláez, C.; Barrera, X.; Gómez, R. y R. Suárez Castaño. 2015. El ABC de los compromisos de Colombia para la COP21. 2 ed. WWF-Colombia. 31 pp. [online]. Available: [http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombia\\_hacia\\_la\\_COP21/ABC\\_de\\_los\\_Compromisos\\_de\\_Colombia\\_para\\_la\\_COP21\\_VF\\_definitiva.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombia_hacia_la_COP21/ABC_de_los_Compromisos_de_Colombia_para_la_COP21_VF_definitiva.pdf)
- [2]. Ministerio de Minas y Energía (MME)-Unidad de planeación Minero Energética (UPME), (2016,12,17). Plan De Acción Indicativo De Eficiencia Energética. [online]. Available: [http://www1.upme.gov.co/Documents/PAI\\_PROURE\\_2017\\_2022.pdf](http://www1.upme.gov.co/Documents/PAI_PROURE_2017_2022.pdf)
- [3]. Red de Hospitales Verdes y Saludables, Promoción de políticas públicas que fomenten la eficiencia energética y el uso de energías renovables. [online]. Available: <https://www.greenhospitals.net/wp-content/uploads/2018/03/Secretar%C3%ADa-de-Salud-P%C3%BAblica-Cali-Colombia.pdf>
- [4]. A. Franco, M. Shaker, D. Kalubi, and S. Hostettler, “A review of sustainable energy access and technologies for healthcare facilities in the Global South,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 22, pp. 92–105, Aug. 2017
- [5]. National Renewable Energy Laboratory. Healthcare Energy End-Use Monitoring. [online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61064.pdf>
- [6]. A. Bosisio, M. Moncecchi, G. Cassetti, and M. Merlo, “Microgrid design and operation for sensible loads: Lacor hospital case study in Uganda,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 36, p. 100535, Dec. 2019.
- [7] M. Hijjo, P. Bauer, F. Felgner, and G. Frey, “Energy management systems for hospitals in Gaza-strip,” in *Proceedings of the 5th IEEE Global Humanitarian Technology Conference, GHTC 2015*, 2015, pp. 18–25.
- [8] M. Hijjo, F. Felgner, and G. Frey, “PV-Battery-Diesel microgrid layout design based on stochastic optimization,” in *2017 6th International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, ICCEP 2017*, 2017, pp. 30–35.
- [9] T. Baba *et al.*, “Comparison of optimum energy scheduling of emergency generators of a large hospital with renewable energy system using mathematical programming method,” in *2017 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2017*, 2017, vol. 2017-January, pp. 519–523.

- [10] Marius Paulescu, Eugenia Paulescu, Paul Gravila y Vioriel Badescu, Weather Modeling and Forecasting of PV Systems Operation, Springer – Verlag London , 2013.
- [11] J. Shi, W. J. Lee, Y. Liu, Y. Yang, and P. Wang, “Forecasting power output of photovoltaic systems based on weather classification and support vector machines,” in IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, vol. 48, no. 3, pp. 1064–1069.
- [12] L. Liu, D. Liu, Q. Sun, H. Li, and R. Wennersten, “Forecasting Power Output of Photovoltaic System Using A BP Network Method,” in Energy Procedia, 2017, vol. 142, pp. 780–786.
- [13] S. M. Lurwan, N. Mariun, H. Hizam, M. A. Mohd Radzi, and A. Zakaria, “Predicting power output of photovoltaic systems with solar radiation model,” in Conference Proceeding - 2014 IEEE International Conference on Power and Energy, PECon 2014, 2014, pp. 304–308.
- [14] Resolución No 2003 de 2014, “Por la cual se definen los procedimientos y condiciones de inscripción de los Prestadores de Servicios de Salud y de habilitación de servicios de salud” Disponible en: [https://www.minsalud.gov.co/Normatividad\\_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%202003%20de%202014.pdf](https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%202003%20de%202014.pdf)
- [15] Ministerio De Salud de Colombia, Decreto 1760 de 1990 “Por el cual se establecen y definen los niveles de atención, tipo de servicio y grados de complejidad”, Disponible en: <http://www.suinjuriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/1345915>
- [16] Ministerio De Salud De Colombia, “Prestadores del Servicio De Salud Departamento De La Guajira, Disponible” en: <https://prestadores.minsalud.gov.co/siho/informes/ipspornivel.aspx?pageTitle=IPS+por+Nivel+de+Atenci%u00f3n&pageHlp=%2fSIHO%2fayudas%2finformes%2fcaracterizacion.pdf>
- [17] Ministerio De Minas y Energías, “Reglamento Técnico De Instalaciones Eléctricas (RETIE)”. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/1179442/Anexo+General+del+RETIE+vigente+actualizado+a+2015-1.pdf/57874c58-e61e-4104-8b8c-b64dbabedb13>
- [18] Instituto Colombiano De Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, Norma Técnica Colombiana 2050 “Código Eléctrico Colombiano”. Disponible en: <https://www.idrd.gov.co/sitio/idrd/sites/default/files/imagenes/ntc%2020500.pdf>
- [19] Commission Electrotechnique Internationale, IEC 60364-7-710 – “Instalaciones eléctricas de los edificios”. Disponible en: <http://sigmavn.vn/images/ckeditor/files/TC%20iec-60364-7-710-orjinal.pdf>
- [20] Instituto Colombiano De Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, “Norma Técnica NTC Colombiana 4405 Eficiencia Energética. Evaluación De La Eficiencia De Los Sistemas

Solares Fotovoltaicos Y Sus Componentes”. Disponible en: [https://www.academia.edu/23212238/NORMA\\_T%C3%89CNICA\\_NTC\\_COLOMBIANA\\_4405\\_EFICIENCIA\\_ENERG%C3%89TICA\\_EVALUACI%C3%93N\\_DE\\_LA\\_EFICIENCIA\\_DE\\_LOS\\_SISTEMAS\\_SOLARES\\_FOTOVOLTAICOS\\_Y\\_SUS\\_COMPONENTES](https://www.academia.edu/23212238/NORMA_T%C3%89CNICA_NTC_COLOMBIANA_4405_EFICIENCIA_ENERG%C3%89TICA_EVALUACI%C3%93N_DE_LA_EFICIENCIA_DE_LOS_SISTEMAS_SOLARES_FOTOVOLTAICOS_Y_SUS_COMPONENTES)

[21] Ministerio De Minas y Energías, Ley 697 de 2001 “Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones”. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4449>

[22] Unidad de Planeación Minero Energética, Ley 1715 de 2014.” Por Medio De La Cual Se Regula La Integración De Las Energías Renovables No Convencionales Al Sistema Energético Nacional.” Disponible en: [https://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY\\_1715\\_2014.pdf](https://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf)

[23] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, “Diagnóstico de la Calidad del Servicio de Energía Eléctrica en Colombia”. Disponible en: [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Oct/diagnosticodecalidad2017\\_version\\_06072018\\_1.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Oct/diagnosticodecalidad2017_version_06072018_1.pdf)

[24] A. Prudenzi, A. Fioravanti, and V. Caracciolo, “Resilient power in hospitals: The S. Giovanni addolorata general hospital case study,” in 2017 AEIT International Annual Conference: Infrastructures for Energy and ICT: Opportunities for Fostering Innovation, AEIT 2017, Dec. 2017, vol. 2017-January, pp. 1–6, doi: 10.23919/AEIT.2017.8240572.

[25] M. S. BenSaleh and A. S. Hennache, “Planning, optimizing and analyzing of safety and maintenance for the critical role of emergency power plant in Saudi healthcare facilities,” in Proceedings - 2010 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering, SIBIRCON-2010, 2010, pp. 499–506, doi: 10.1109/SIBIRCON.2010.5555378.

[26] Cámara De Comercio De La Guajira, “Informe Socio Económico periodo 2021”, Disponible en: <https://www.camaraguajira.org/publicaciones/informes/informe-socio-economico-la-guajira-2021.pdf>

[27] Sawle, Yashwant, S.C Gupta, and Aashish Kumar Bohre. "Review of Hybrid Renewable Energy Systems with Comparative Analysis of Off-grid Hybrid System." Renewable & Sustainable Energy Reviews 81.P2 (2018): 2217-235. Web.

[28] Olatomiwa, Lanre, Saad Mekhilef, M.S Ismail, and M. Moghavvemi. "Energy Management Strategies in Hybrid Renewable Energy Systems: A Review." Renewable & Sustainable Energy Reviews 62 (2016): 821-35. Web.

[29] D. Emad, M. A. El-Hameed, M. T. Yousef, and A. A. El-Fergany, “Computational Methods for Optimal Planning of Hybrid Renewable Microgrids: A Comprehensive Review and Challenges,” Arch. Comput. Methods Eng., vol. 27, no. 4, pp. 1297–1319, Sep. 2020, doi: 10.1007/s11831-019-09353-9.

- [30] S. Diaf, D. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi, and A. Louche, "A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system," *Energy Policy*, vol. 35, no. 11, pp. 5708–5718, Nov. 2007, doi: 10.1016/j.enpol.2007.06.020.
- [31] K. Murugaperumal and P. Ajay D Vimal Raj, "Feasibility design and techno-economic analysis of hybrid renewable energy system for rural electrification," *Sol. Energy*, vol. 188, pp. 1068–1083, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.07.008.
- [32] J. Kartite and M. Cherkaoui, "Optimal sizing of hybrid renewable PV/Wind battery system using LPSP methods," in *2017 6th International Conference on Systems and Control, ICSC 2017*, Jun. 2017, pp. 226–230, doi: 10.1109/ICoSC.2017.7958737.
- [33] A. Lagrange, M. de Simón-Martín, A. González-Martínez, S. Bracco, and E. Rosales-Asensio, "Sustainable microgrids with energy storage as a means to increase power resilience in critical facilities: An application to a hospital," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 119, p. 105865, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.105865.
- [34] J. Liu, X. Chen, S. Cao, and H. Yang, "Overview on hybrid solar photovoltaic-electrical energy storage technologies for power supply to buildings," *Energy Conversion and Management*, vol. 187. Elsevier Ltd, pp. 103–121, 01-May-2019.
- [35] Abdelaziz Mohamed, Mohamed, and Ali Mohamed Eltamaly. *Modeling and Simulation of Smart Grid Integrated with Hybrid Renewable Energy Systems*. Vol. 121. Cham: Springer International, 2017. *Studies in Systems, Decision and Control*. Web.
- [36] C. Ghenai and M. Bettayeb, "Modelling and performance analysis of a stand-alone hybrid solar PV/Fuel Cell/Diesel Generator power system for university building," *Energy*, vol. 171, pp. 180–189, Mar. 2019.
- [37] V. Suresh, M. Muralidhar, and R. Kiranmayi, "Modelling and optimization of an off-grid hybrid renewable energy system for electrification in a rural areas," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 594–604, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2020.01.013.
- [38] H. Borhanazad, S. Mekhilef, V. Gounder Ganapathy, M. Modiri-Delshad, and A. Mirtaheri, "Optimization of micro-grid system using MOPSO," *Renew. Energy*, vol. 71, pp. 295–306, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.05.006.
- [39] Z. Movahediyani and A. Askarzadeh, "Multi-objective optimization framework of a photovoltaic-diesel generator hybrid energy system considering operating reserve," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 41, pp. 1–12, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.05.002
- [40] S. Asefi, M. Ali, and E. Gryazina, "Optimal Energy Management for Off-Grid Hybrid System using Hybrid Optimization Technique," Sep. 2019, doi: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905550.
- [41] H. Ren, Q. Wu, W. Gao, and W. Zhou, "Optimal Operation of a grid-connected hybrid PV/fuel cell/battery energy system for residential applications," *Energy*, vol. 113, pp. 702–712, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.07.091.

- [42] C. Eu-Tjin, C. K. Huat, and L. Y. Seng, “Control strategies in energy storage system for standalone power systems,” in IET Conference Publications, 2016, vol. 2016, no. CP688, doi: 10.1049/cp.2016.1268.
- [43] M. Dhaoui and L. Sbita, “Control and management of energy flows in a multi-source hybrid system,” Oct. 2017, doi: 10.1109/GECS.2017.8066252.
- [44] Andrés, Heredia & Hernandez, Johann & Trujillo, Edwin. (2014). Optimal Power Flow in Electrical Microgrids. Energy and Power Engineering. 06. 449-458. 10.4236/epe.2014.612037.
- [45] K. Murugaperumal, P. Ajay D Vimal Raj, Feasibility design and techno-economic analysis of hybrid renewable energy system for rural electrification, Solar Energy, Volume 188, 2019, Pages 1068-1083, ISSN 0038-092X.
- [46] Diwekar, Urmila. Introduction to Applied Optimization. 2nd ed. New York, N. Y.: Springer, 2010. Print. Springer Optimization and Its Applications ; 22.
- [47] M. Martínez Díaz. “Stand-alone Hybrid Renewable Energy Systems (HRES)”. Ph.D, thesis ,Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2017.
- [48] Engell, S., Frehse, Schnieder, and Springerlink. Modelling, Analysis, and Design of Hybrid Systems. Vol. 279. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Web.
- [49] Kartite and M. Cherkaoui, “Study of the different structures of hybrid systems in renewable energies: A review,” in Energy Procedia, Jan. 2019, vol. 157, pp. 323–330, doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.197
- [50] Rekioua, Djamilia. Hybrid Renewable Energy Systems: Optimization and Power Management Control. Cham: Springer International, 2020. Green Energy and Technology. Web.
- [51] Lim, Pei Yi. Power Management Strategies for Off-grid Hybrid Power Systems. Curtin U, School of Electrical and Computer Engineering, 2011. Web.
- [52] R. Siddaiah and R. P. Saini, “A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58. Elsevier Ltd, pp. 376–396, May 01, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.281.
- [53] Kabalci, E. (Ed.). (2020). Hybrid Renewable Energy Systems and Microgrids. Academic Press.
- [54] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), “Irradiación global horizontal media diaria”, Disponible: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>



- [55] Tagare, D. M. (2011). Electricity power generation: the changing dimensions (Vol. 56). John Wiley & Sons.
- [56] Arocas Sergio M., Coria Hoffmann Geraldine D. y Bosc Cristian, "Identificación De Indicadores Energéticos Para El Diseño De Un Programa De Ahorro y Eficiencia Energética En Una Instalación Hospitalaria", Facultad de Ingeniería UNLP, 2019.
- [57] Bono Cabre, Roser. Diseños cuasi-experimentales y longitudinales. 2012.
- [58] Sampieri, Roberto Hernández. Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw Hill México, 2018.
- [59] Diwekar, Urmila. Introduction to Applied Optimization. 2nd ed. New York, N. Y.: Springer, 2010. Print. Springer Optimization and Its Applications ; 22.
- [60] Andrés, Heredia & Hernandez, Johann & Trujillo, Edwin. (2014). Optimal Power Flow in Electrical Microgrids. Energy and Power Engineering. 06. 449-458. 10.4236/epe.2014.612037.
- [61] Ferris, Michael C., Olvi L. Mangasarian, and Stephen J. Wright. Linear Programming with MATLAB. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007. Web.
- [62] Michael Bartholomew-Biggs. Nonlinear Optimization with Engineering Applications, 19. Springer US.
- [63] Venkataraman, P. Applied Optimization with MATLAB Programming. 2nd ed. Hoboken, Estados Unidos: J. Wiley & Sons, 2009. Print.
- [64] Soroudi, Alireza. Power System Optimization Modeling in GAMS. Cham: Springer International, 2017. Web.
- [65] Singiresu S. Rao, Engineering Optimization: Theory and Practice, John Wiley & Sons, 2019.
- [66] Yang, Xin-She. Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications. 1st ed. 2010. Web.
- [67] Zhu, Jizhong. Optimization of Power System Operation. 1st ed. Vol. 49. 2009. IEEE Press Ser. on Power Engineering Ser. Web.
- [68] Twaha, Ssennoga, and Makbul A.M Ramli. "A Review of Optimization Approaches for Hybrid Distributed Energy Generation Systems: Off-grid and Grid-connected Systems." Sustainable Cities and Society 41 (2018): 320-31. Web.
- [69] Paliwal, Priyanka, N.P Patidar, and R.K Nema. "Determination of Reliability Constrained Optimal Resource Mix for an Autonomous Hybrid Power System Using Particle Swarm Optimization." Renewable Energy 63 (2014): 194-204. Web.

- [70] Halabi, Laith M, Saad Mekhilef, Lanre Olatomiwa, and James Hazelton. "Performance Analysis of Hybrid PV/diesel/battery System Using HOMER: A Case Study Sabah, Malaysia." *Energy Conversion and Management* 144.C (2017): 322-39. Web.
- [71] Enrique Castillo, Antonio J. Conejo, Pablo Pedregal, Ricardo García y Natalia Alguacil. *Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia*.
- [72] Rothlauf, Franz. *Design of Modern Heuristics: Principles and Application*. 2011. Natural Computing Ser. Web.
- [73] H. R. Maier, S. Razavi, Z. Kapelan, L. S. Matott, J. Kasprzyk, and B. A. Tolson, "Introductory overview: Optimization using evolutionary algorithms and other metaheuristics," *Environmental Modelling and Software*, vol. 114. Elsevier Ltd, pp. 195–213, Apr. 01, 2019, doi: 10.1016/j.envsoft.2018.11.018.
- [74] A. H. Fathima and K. Palanisamy, "Optimization in microgrids with energy systems - A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45. Elsevier Ltd, pp. 431–446, 01-May-2015.
- [75] V. Sai et al., "Comparative Study on Recent Development of Heuristic Optimization Methods," 2016 Third International Conference on Computing Measurement Control and Sensor Network (CMCSN), Matsue, 2016, pp. 68-71.
- [76] E. M. Nazri and S. Murairwa, "Classification of heuristic techniques for performance comparisons," 2016 12th International Conference on Mathematics, Statistics, and Their Applications (ICMSA), Banda Aceh, 2016, pp. 19-24.
- [77] Alzahrani, Abdullah M, Mohamed Zohdy, and Bing Yan. "An Overview of Optimization Approaches for Operation of Hybrid Distributed Energy Systems with Photovoltaic and Diesel Turbine Generator." *Electric Power Systems Research* 191 (2021): *Electric Power Systems Research*, February 2021, Vol.191. Web.
- [78] A. Aziz, M. Tajuddin, M. Adzman, M. Ramli, and S. Mekhilef, "Energy Management and Optimization of a PV/Diesel/Battery Hybrid Energy System Using a Combined Dispatch Strategy," *Sustainability*, vol. 11, no. 3, p. 683, Jan. 2019, doi: 10.3390/su11030683.
- [79] M. Ramesh and R. P. Saini, "Dispatch strategies based performance analysis of a hybrid renewable energy system for a remote rural area in India," *J. Clean. Prod.*, vol. 259, p. 120697, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120697.
- [80] Ren, Jingzheng. *Renewable-Energy-Driven Future: Technologies, Modelling, Applications, Sustainability and Policies*. 2020.
- [81] A. Ahmad Khan, M. Naeem, M. Iqbal, S. Qaisar, and A. Anpalagan, "A compendium of optimization objectives, constraints, tools and algorithms for energy management in microgrids," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58. Elsevier Ltd, pp. 1664–1683, 01-May-2016.

- [82] A. Mohamad Izdin Hlal, V. K. Ramachandaramurthya, B. Sanjeevikumar Padmanaban, C. Hamid Reza Kaboli, A. Aref Pouryekta, and D. Tuan Ab Rashid Bin Tuan Abdullah, "NSGA-II and MOPSO based optimization for sizing of hybrid PV / wind / battery energy storage system," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 463–478, Mar. 2019.
- [83] M. A. M. Ramli, H. R. E. H. Boucekara, and A. S. Alghamdi, "Optimal sizing of PV/wind/diesel hybrid microgrid system using multi-objective self-adaptive differential evolution algorithm," *Renew. Energy*, vol. 121, pp. 400–411, Jun. 2018.
- [84] S. Leonori, M. Paschero, F. M. Frattale Mascioli, and A. Rizzi, "Optimization strategies for Microgrid energy management systems by Genetic Algorithms," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 86, p. 105903, Jan. 2020.
- [85] C. Gamarra and J. M. Guerrero, "Computational optimization techniques applied to microgrids planning: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 48. Elsevier Ltd, pp. 413–424, 01-Aug-2015.
- [86] Jp. Clean, "Optimised controller for renewable energy sources integration into microgrid: Functions, constraints and suggestions," Feb. 2020.
- [87] Zack Stokes, Abhyuday Mandal, Weng Kee Wong, Using Differential Evolution to design optimal experiments, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Volume 199, 2020.
- [88] J. Jobanputra and C. Kotwal, "Optimal Power Dispatch using Particle Swarm Optimization," 2018 International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS), Nagpur, 2018, pp. 157-161.
- [89] T. M. Mohan and T. Nireekshana, "A Genetic Algorithm for Solving Optimal Power Flow Problem," 2019 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, India, 2019, pp. 1438-1440.
- [90] Hassan, Rania & Cohanin, Babak & de Weck, Olivier. (2005). A Comparison of Particle Swarm Optimization and the Genetic Algorithm. 2. 10.2514/6.2005-1897.
- [91] Sara Ghaem Sigarchian, Matthew S. Orosz, Harry F. Hemond, Anders Malmquist, Optimum design of a hybrid PV–CSP–LPG microgrid with Particle Swarm Optimization technique, *Applied Thermal Engineering*, Volume 109, Part B, 2016, Pages 1031-1036.

- [92] Maher Azaza, Fredrik Wallin, Multi objective particle swarm optimization of hybrid micro-grid system: A case study in Sweden, *Energy*, Volume 123, 2017,Pages 108-118.
- [93] Abdullah M. Shaheen, Shimaa R. Spea, Sobhy M. Farrag, Mohammed A. Abido, A review of meta-heuristic algorithms for reactive power planning problem,*Ain Shams Engineering Journal*,Volume 9, Issue 2,2018,Pages 215-231.
- [94] Yuqing Yang, Stephen Bremner, Chris Menictas, Merlinde Kay, Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,Volume 91,2018,Pages 109-125,ISSN 1364-0321.
- [95] Fontenot, H., & Dong, B. (2019). Modeling and control of building-integrated microgrids for optimal energy management – A review. In *Applied Energy* (Vol. 254, p. 113689). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113689>
- [96] Singh and D. Pozo, "A Guide to Solar Power Forecasting using ARMA Models," 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905430.
- [97] Ajai Gupta, R.P. Saini, M.P. Sharma, Modelling of hybrid energy system—Part I: Problem formulation and model development,*Renewable Energy*,Volume 36, Issue 2,2011,Pages 459-465.
- [98] S. Sanajaoba Singh and E. Fernandez, “Modeling, size optimization and sensitivity analysis of a remote hybrid renewable energy system,” *Energy*, vol. 143, pp. 719–731, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.11.053.
- [99] G. C. Semassou, A. D. D. V. Dai Tometin, R. Ahouansou, K. V. Chegnimonhan, and T. C. Guidi, “Contribution to the optimization of the autonomous photovoltaic solar systems with hybrid storage for loads with peak power with constraints of volume and loss of power supply probability,” *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, vol. 14, no. 2, pp. 697–707, Jun. 2020, doi: 10.1007/s12008-020-00643-2.
- [100] M. S. Javed, A. Song, and T. Ma, “Techno-economic assessment of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island using genetic algorithm,” *Energy*, vol. 176, pp. 704–717, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.131.
- [101] M.A. Hannan, Shun Y. Tan, Ali Q. Al-Shetwi, Ker Pin Jern, R.A. Begum, Optimized controller for renewable energy sources integration into microgrid: Functions, constraints and suggestions, *Journal of Cleaner Production*,Volume 256,2020.
- [102] José L. Bernal-Agustín, Rodolfo Dufo-López, Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 13, Issue 8,2009,Pages 2111-2118.

- [103] T. Adefarati and R. C. Bansal, "Reliability, economic and environmental analysis of a microgrid system in the presence of renewable energy resources," *Appl. Energy*, vol. 236, pp. 1089–1114, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.12.050.
- [104] A. Maleki and F. Pourfayaz, "Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms," *Sol. Energy*, vol. 115, pp. 471–483, May 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.03.004.
- [105] B. S. Borowy and Z. M. Salameh, "Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a Wind/PV hybrid system," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 11, no. 2, pp. 367–373, 1996, doi: 10.1109/60.507648
- [106] Alvarado-Barrios, L., A. Rodríguez del Nozal, A. Tapia, J. L. Martínez-Ramos, and D. G. Reina 2019. "An Evolutionary Computational Approach for the Problem of Unit Commitment and Economic Dispatch in Microgrids under Several Operation Modes" *Energies* 12, no. 11: 2143. <https://doi.org/10.3390/en12112143>
- [107] Resolución No 2003 de 2014, "Por la cual se definen los procedimientos y condiciones de inscripción de los Prestadores de Servicios de Salud y de habilitación de servicios de salud" Disponible en: [https://www.minsalud.gov.co/Normatividad\\_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%202003%20de%202014.pdf](https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%202003%20de%202014.pdf)
- [108] Gutiérrez, Daniel & Tapia Córdoba, Alejandro & Rodríguez del Nozal, Álvaro. (2020). *Algoritmos Genéticos con Python: Un enfoque práctico para resolver problemas de ingeniería*.
- [109] J. Sharma and R. S. Singhal, "Comparative research on genetic algorithm, particle swarm optimization and hybrid GA-PSO," 2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2015, pp. 110-114.
- [110] Mecanismo Selección – SelTournament. Disponible en: <https://deap.readthedocs.io/en/master/api/tools.html#deap.tools.selTournament>
- [111] Mecanismo de Cruce – cxtwopoint. Disponible en: <https://deap.readthedocs.io/en/master/api/tools.html#deap.tools.cxTwoPoint>
- [112] Mecanismo de Mutación – matGaussian. Disponible en: <https://deap.readthedocs.io/en/master/api/tools.html#deap.tools.mutGaussian>
- [113] Sammut C., Webb G.I. (eds) *Encyclopedia of Machine Learning*. Springer, Boston, MA. Mean Absolute Error (MAE) (2011).
- [114] Swamidass P.M . In.: (eds) *Encyclopedia of Production and Manufacturing Management*. Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Springer, Boston, MA. (2000).
- [115] NFPA 99 Standard for Health Care Facilities, Disponible en: [https://mopw.gov.gy/sites/default/files/documents/NFPA%2099\\_0.pdf](https://mopw.gov.gy/sites/default/files/documents/NFPA%2099_0.pdf)

[116] Instituto Colombiano De Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, "Norma Técnica NTC Colombiana 4405 Eficiencia Energética. Evaluación De La Eficiencia De Los Sistemas Solares Fotovoltaicos Y Sus Componentes". Disponible en: [https://www.academia.edu/23212238/NORMA\\_T%C3%89CNICA\\_NTC\\_COLOMBIANA\\_4405\\_EFICIENCIA\\_ENERG%C3%89TICA\\_EVALUACI%C3%93N\\_DE\\_LA\\_EFICIENCIA\\_DE\\_LOS\\_SISTEMAS\\_SOLARES\\_FOTOVOLTAICOS\\_Y\\_SUS\\_COMPONENTES](https://www.academia.edu/23212238/NORMA_T%C3%89CNICA_NTC_COLOMBIANA_4405_EFICIENCIA_ENERG%C3%89TICA_EVALUACI%C3%93N_DE_LA_EFICIENCIA_DE_LOS_SISTEMAS_SOLARES_FOTOVOLTAICOS_Y_SUS_COMPONENTES)

[117] Ministerio De Minas y Energías, Ley 697 de 2001 "Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones". Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4449>

[118] Unidad de Planeación Minero Energética, Ley 1715 de 2014. "Por Medio De La Cual Se Regula La Integración De Las Energías Renovables No Convencionales Al Sistema Energético Nacional." Disponible en: [https://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY\\_1715\\_2014.pdf](https://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf)

[119] Comisión De Regulación De Energía y Gas " or la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional" Disponible en: <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/83b41035c2c4474f05258243005a1191>

[120] Sánchez, M.A., Calidad de la energía eléctrica. Instituto Tecnológico de Puebla, México, 2009.

[121] IEEE 602-2007 "Práctica recomendada para los sistemas eléctricos en los centros de atención sanitaria" Disponible en: <https://standards.ieee.org/ieee/602/833/>

[122] IEEE Std.446-1995 "Práctica recomendada para sistemas de energía de emergencia y de reserva para aplicaciones industriales y comerciales" Disponible en: <https://standards.ieee.org/ieee/446/669/>