

**HERRAMIENTA PARA EL DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE SISTEMAS
HÍBRIDOS OFF-GRID PV-WIND-BATTERY-DIÉSEL, BASADO EN
ALGORITMO EVOLUTIVO.**

VÍCTOR ANDRÉS TORRES LANDAZÁBAL



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA EN ENERGÍA**

2021

**HERRAMIENTA PARA EL DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE SISTEMAS
HÍBRIDOS OFF-GRID PV-WIND-BATTERY-DIÉSEL, BASADO EN ALGORITMO
EVOLUTIVO.**

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero en Energía

Director:

Ph.D (c). César Giovanni Acevedo Arenas

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA EN ENERGÍA

2021

Nota de aceptación

Firma Director de proyecto de grado

Firma calificador

Bucaramanga, 2021.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios quien me ha ayudado, ha estado conmigo en todo momento y me ha acompañado en todo este proceso.

A mis padres y hermana, ya que son mi motor y fueron de apoyo en mi formación académica, me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño.

*Y a ti, **buen amigo**, por tu paciencia y por tu gran ayuda.*

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	MARCO REFERENCIAL.....	3
2.1.	TÉCNICAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE SISTEMAS HIBRIDOS.....	3
2.2.	ALGORITMO GENETICO COMO TECNICA DE OPTIMIZACION SELECCIONADA	5
2.3.	OPTIMIZACIÓN.....	8
2.4.	COSTO NIVELADO DE LA ENERGIA (LCOE)	9
3.	OBJETIVOS.....	11
3.1.	OBJETIVOS ESPECIFICOS	11
4.	METODOLOGÍA	12
5.	DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL	13
5.1.	DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA HÍBRIDO.....	13
5.2.	IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENETICO.....	14
	• GENERACIÓN DE LA POBLACIÓN INICIAL	14
	• CÁLCULO FUNCIÓN OBJETIVO	14
	• SELECCIÓN	15
	• CRUCE	15
	• MUTACIÓN.....	15
	• CRITERIO DE PARADA	15
5.3.	MODELOS MATEMÁTICOS.....	16
5.3.1.	PANELES FOTOVOLTAICOS.....	16
5.3.2.	TURBINAS EÓLICAS.....	18
5.3.3.	BANCO DE BATERÍAS	20
5.3.4.	GENERADOR DIÉSEL.....	21
5.3.5.	BALANCE DE ENERGÍA.....	22
5.3.6.	CRITERIO DE EVALUACIÓN	23
5.4.	ESTRUCTURA DE LA HERRAMIENTA	26
6.	PRUEBAS A LA HERRAMIENTA DESARROLLADA	28
6.1.	CASO 1 – ESTACIONES DEL AÑO.....	29
6.2.	VALIDACIÓN DE EFECTIVIDAD: CASO VALENCIA	30
7.	RESULTADOS.....	31
7.1.	CASO 1 – ESTACIONES DEL AÑO.....	31
7.2.	VALIDACIÓN DE EFECTIVIDAD: CASO VALENCIA	34
7.3.	INTERFAZ DE LA HERRAMIENTA	37

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
8.1. CONCLUSIONES.....	40
8.2. RECOMENDACIONES	41
9. REFERENCIAS.....	42

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de solución binaria de un algoritmo genético	6
Figura 2. Estructura básica de un algoritmo genético	7
Figura 3. Diagrama de la metodología	12
Figura 4. Esquema de los componentes de la micro-red	13
Figura 5. Curva I - V del módulo fotovoltaico BP 7190S	16
Figura 6. Curva de potencia de un módulo fotovoltaico	17
Figura 7. Curva de potencia de un aerogenerador Bornay 13+	18
Figura 8. Características de potencia de una turbina eólica.....	19
Figura 9. Eficiencias típicas de generadores según distintas potencias y velocidades nominales.....	22
Figura 10. Eficiencia típica de un generador según nivel de carga	22
Figura 11. Diagrama de flujo de la estructura lógica de la herramienta	27
Figura 12. Curva de carga diaria mensual de Valencia, España en el invierno	29
Figura 13. Curva de carga diaria mensual de Valencia, España en el verano	30
Figura 14. Contribución energética en el sistema híbrido para (A) Invierno y (B) Verano.....	32
Figura 15. Configuración del sistema y el LCOE para (A) Invierno y (B) Verano	33
Figura 16. Evolución de la población de individuos del algoritmo genético (A) Invierno y (B) Verano	33
Figura 17. Energía generada por la configuración seleccionada vs Energía Requerida para (A) Invierno y (B) Verano	34
Figura 18. Contribución energética de la configuración óptima en el caso Valencia según la herramienta.....	35
Figura 19. Configuración del sistema y el LCOE para caso Valencia	36
Figura 20. Evolución de la población de individuos del Algoritmo Genético.....	36
Figura 21. Energía generada por la configuración seleccionada vs Energía Requerida para caso Valencia.....	37
Figura 22. Ventana principal de la herramienta computacional.....	38
Figura 23. Tabla del archivo Condiciones.xlsx	38
Figura 24. Ventana del panel de la herramienta computacional	39
Figura 25. Ventana de resultados de la herramienta computacional	39

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características de los equipos	28
Tabla 2. Configuración óptima del sistema híbrido para el invierno y verano según la herramienta computacional	31
Tabla 3. Producción total mensual de energía según la herramienta computacional para invierno y verano.....	32
Tabla 4. Configuración óptima del sistema híbrido para caso Valencia	34

RESUMEN

Con el presente trabajo se buscó la implementación de un algoritmo matemático evolutivo que permitiera dimensionar de forma óptima sistemas híbridos off-grid pv-wind-battery-diésel. Inicialmente se realizó la verificación de antecedentes con el objetivo de tener presente las metodologías ya existentes para diseñar sistemas híbridos y, a partir de esto, plantear un método práctico que aporte resultados altamente significativos. Una vez evaluados los antecedentes, estos sirven como sustento para la creación del correspondiente código en la plataforma de Matlab, teniendo como base un algoritmo genético, donde se realiza el dimensionamiento óptimo del sistema de generación renovable, de almacenamiento y generación diésel, tomando en consideración variables como la irradiancia, velocidad del viento, curva de carga y temperatura del emplazamiento donde se vaya a realizar el respectivo dimensionamiento del sistema híbrido. Posteriormente, con la herramienta desarrollada se prueba, evalúa y analiza, mediante casos hipotéticos, si se logra un dimensionamiento óptimo del sistema híbrido.

Finalmente, mediante un caso práctico aplicado en condiciones reales, se corrobora que la solución que arroja la herramienta desarrollada cubre la totalidad de la demanda energética indistintamente de la época del año, brindando una solución efectiva al problema planteado. Para esta parte se tomó como caso de estudio a la ciudad de Valencia - España, debido a que se contó, en el desarrollo del proyecto, con una cantidad suficiente de datos de carga, irradiancia, velocidad de viento y temperatura, necesarias para realizar un dimensionamiento con resultados significativos y confiables. Considerando la variabilidad geográfica y climatológica que se presentan a lo largo del año, en Valencia - España, la herramienta nos indica que la configuración óptima para la estación climática de verano es de 64 módulos fotovoltaicos, 1 turbinas eólicas, 12 baterías y 1 generador diésel con un LCOE de 0,172 \$/kWh; mientras que para el invierno es de un sistema híbrido conformado por 57 módulos fotovoltaicos, 3 turbinas eólicas, 5 baterías y 1 generadores diésel con un LCOE de 0,186 \$/kWh.

Palabras clave: optimización - sistemas híbridos - algoritmo genético – dimensionamiento

ABSTRACT

The present work sought to implement an evolutionary mathematical algorithm to optimally size off-grid pv-wind-battery-diesel hybrid systems. Initially, a background check was carried out in order to take into account the existing methodologies to design hybrid systems and, from this, to propose a practical method that provides highly significant results. Once the background has been evaluated, these serve as support for the creation of the corresponding code in the Matlab platform, based on a genetic algorithm, where the optimal sizing of the renewable generation, storage and diesel generation system is performed, taking into consideration variables such as irradiance, wind speed, load curve and temperature of the site where the respective sizing of the hybrid system is to be performed. Subsequently, the developed tool is used to test, evaluate and analyze, by means of hypothetical cases, if an optimal sizing of the hybrid system is achieved.

Finally, by means of a practical case study applied in real conditions, it is corroborated that the solution provided by the developed tool covers the total energy demand regardless of the time of the year, providing an effective solution to the proposed problem. For this part, the city of Valencia - Spain was taken as a case study, since during the development of the project, a sufficient amount of load, irradiance, wind speed and temperature data were available, which were necessary to perform a dimensioning with significant and reliable results. Considering the geographical and climatological variability that occurs throughout the year in Valencia - Spain, the tool indicates that the optimal configuration for the summer climate season is 64 photovoltaic modules, 1 wind turbine, 12 batteries and 1 diesel generator with an LCOE of 0.172 \$/kWh; while for the winter is a hybrid system consisting of 57 photovoltaic modules, 3 wind turbines, 5 batteries and 1 diesel generator with an LCOE of 0.186 \$/kWh.

Key words: optimization - hybrid systems - genetic algorithm - sizing

1. INTRODUCCIÓN

De la mano del desarrollo tecnológico y en conjunto con incorporación de políticas gubernamentales tendientes a la integración de fuentes renovables, con el objetivo de ampliar la cobertura del servicio público de energía eléctrica a lo largo de todo el territorio nacional, se ha propiciado un crecimiento exponencial en la implementación de pequeños sistemas híbridos de generación de energía para uso residencial tanto en el sector urbano como en el rural, brindando una gran proyección hacia usos productivos que se verían altamente beneficiados en cuestiones de costos e independencia. De esta manera, en Colombia la mayoría de los esquemas híbridos de generación en ZNI son PV-Diésel [1] siendo, en gran parte de estos casos, un sistema fotovoltaico que en realidad resulta no ser más que una ampliación del sistema Diésel existente. Debido a la diversidad geográfica que ofrece nuestro país, en algunas zonas de la costa caribe cabe la posibilidad de que se presente una coexistencia de recursos eólicos-solares [2] los cuales eventualmente podrían ser aprovechados.

Por lo tanto, el dimensionamiento de un sistema de generación híbrido conlleva al desarrollo de procesos de optimización restringida, que indiscutiblemente requieren el uso de herramientas computacionales para un mejor desempeño, y entre ellas, las más usadas son las heurísticas. Como ejemplo de lo anterior, se tienen los algoritmos evolutivos en los cuales se destacan el Algoritmo Genético – GA, el cual ha sido ampliamente utilizado para la gestión de energía en sistemas distribuidos con generación híbrida, micro-redes y redes inteligentes teniendo en cuenta que brinda la posibilidad de trabajar con problemas complejos donde intervienen multiplicidad de variables y restricciones de diferente naturaleza [3].

Con el referido trabajo de grado se busca desarrollar una herramienta computacional capaz de dimensionar una micro-red aislada PV-Wind-Battery-Diésel, basada en la proyección de la necesidad de los hogares, ya sea tanto en el sector urbano como rural, así como de los recursos renovables disponibles en cada caso en específico, de la mano siempre del criterio de mínimo costo nivelado de energía – LCOE, buscando, en todos los casos, que la generación diésel sirva como respaldo del sistema de generación renovable y que, a su vez, el sistema de almacenamiento sea principalmente de largo plazo para garantizar un beneficio duradero.

De esta manera, la herramienta computacional planteada arrojará como resultado la configuración óptima para suplir una demanda energética en específico, gracias a un sistema híbrido de energía comprendido por paneles solares, turbinas eólicas y un generador Diésel con almacenamiento en baterías, es decir que, teniendo una demanda energética concretamente definida, el sistema computacional tiene como función principal indicar la cantidad necesaria de cada uno de sus componentes y su

respectiva capacidad con el propósito de suplir la dicha demanda. De esta forma se tendrá la mejor configuración del sistema de generación que bajo el criterio de mínimo costo nivelado de energía, mantenga el suministro sostenible de energía a la demanda en estudio.

Siendo este el primer capítulo de la presente investigación, el mismo se encuentra contenido por la introducción que se realiza acerca del documento. En el segundo capítulo se encuentra el marco referencial, donde se muestra una recopilación de técnicas para el dimensionamiento óptimo de sistemas híbridos. En el tercer y cuarto capítulo se presentan los objetivos del proyecto y la metodología para llevar a cabo los mismos, respectivamente. El quinto capítulo, está integrado por el desarrollo íntegro del proyecto donde se describen los componentes del sistema híbrido, se explican los modelos matemáticos, la estructura de la herramienta, la caracterización de variables y la validación de efectividad. Seguidamente, el sexto capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas. Finalmente, el séptimo es acerca de la validación de la herramienta computacional y el octavo capítulo contienen las conclusiones a las que se llegan y se brindan una serie de recomendaciones.

2. MARCO REFERENCIAL

El desarrollo de las energías renovables ha tenido una aceleración en los últimos años que consigo ha traído nuevos ámbitos de investigación e incorporación de las nuevas tecnologías disponibles. Para entender estos fenómenos, es oportuno definir y delimitar el alcance de los términos y conceptos allegados, que de manera directa puedan incidir en el rumbo del proyecto. Es por eso que primeramente se procederá a hacer una caracterización de los siguientes conceptos:

2.1. TÉCNICAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE SISTEMAS HÍBRIDOS

Según [4] las técnicas de modelado y optimización se resumen en tres grandes grupos:

- Técnicas clásicas.
- Técnicas de inteligencia artificial.
- Técnicas híbridas.

❖ TÉCNICAS CLÁSICAS

Las técnicas clásicas son de naturaleza analítica y utilizan el cálculo para optimizar los modelos energéticos. Las principales técnicas incluyen:

Programación Multiobjetivo (PMO): La programación multiobjetivo consiste en encontrar los puntos que optimizan una función con valores vectoriales, sobre un conjunto posible, definido por restricciones de igualdad, de desigualdad o de conjunto [5].

Programación Lineal (PL): La programación lineal es una técnica utilizada en la investigación para optimizar las operaciones cuando las ecuaciones lineales están restringidas. La matemática aplicada determina la forma de obtener el resultado más simple y el beneficio más alto o el precio más bajo en el modelo matemático más dado [6].

Programación No Lineal (PNL): El propósito de la programación no lineal, al igual que la programación lineal, es proporcionar elementos para encontrar el mejor punto de la función objetivo [7].

Programación Dinámica (PD): Este es un método para reducir el tiempo de ejecución de un algoritmo mediante la utilización de subproblemas y subestructuras óptimas. Una subestructura óptima significa que se pueden utilizar soluciones óptimas del subproblema para encontrar la solución óptima al problema en conjunto [8].

❖ TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Las técnicas de inteligencia artificial son métodos iterativos que proporcionan mejores resultados de optimización. Ahora bien, estas metodologías basadas en la heurística generalmente son implementadas para optimizar el costo de operación, costo de almacenamiento de energía, tiempo de vida útil de un sistema, maximizar eficiencia, entre otros [4]. Las técnicas de optimización basadas en inteligencia artificial incluyen:

Algoritmos evolutivos: Los algoritmos evolutivos son un método adaptativo que funciona para resolver problemas de búsqueda y optimización. Se basa en el proceso genético de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acuerdo con los principios de selección natural y supervivencia de los más fuertes, postulados por Darwin (1859). Al imitar este proceso, los algoritmos evolutivos son capaces de crear soluciones a los problemas del mundo real. La evolución de estas soluciones hacia valores óptimos del problema depende en gran medida de su correcta codificación [9].

Enjambre de partículas (PSO): Es una metodología de mejora heurística destinada a encontrar mínimos o máximos globales. Su funcionamiento se inspira en el comportamiento de bandadas de aves o bancos de peces en los que, el movimiento de cada individuo (dirección, velocidad, aceleración...), es el resultado de combinar las decisiones individuales de cada uno con el comportamiento del resto [10].

Colonia de hormigas (ACO): En la técnica de colonia de hormigas se consideran varias hormigas artificiales, cada una construye una solución caminando de lado a lado con la restricción de no visitar ningún lugar que ya haya visitado en su recorrido. Al final de una iteración, dependiendo de la calidad de las soluciones construidas por las hormigas, los valores de feromonas se modifican para que las hormigas en futuras iteraciones puedan construir soluciones similares a las mejores construidas previamente [11].

Búsqueda de armonía (HS): El método de Búsqueda de Armonía, por sus siglas en inglés (Harmony Search), es una fórmula metaheurística inspirada en la forma en que los músicos buscan una armonía óptima en la composición musical, que se ha utilizado con éxito para resolver problemas complejos de optimización. Consiste en realizar procedimientos iterativos combinando de forma astuta distintos conceptos para explorar y explotar adecuadamente el espacio de búsqueda [12].

Recocido simulado (SA): El recocido simulado (SA) es un algoritmo de búsqueda metaheurística para problemas de optimización global; el objetivo general de estos algoritmos es encontrar una buena aproximación del valor óptimo de una función en un gran espacio de búsqueda. Este valor óptimo se denomina "óptimo global". En cada iteración, el método de recocido simulado evalúa algunos vecinos del estado

actual y decide probabilísticamente entre la transición a un nuevo estado o permanecer en el estado [13].

❖ TÉCNICAS HÍBRIDAS

Las técnicas híbridas (combinan 2 o más técnicas) son las técnicas que prometen superar las limitaciones que presenta el desarrollo de un solo algoritmo, ya que arrojan mejores soluciones de optimización de sistemas de energía. Entre las técnicas híbridas se encuentran:

Análisis simulado - Búsqueda tabú: En este método híbrido se propone la aplicación del algoritmo de Búsqueda Tabú, utilizando como solución inicial el resultado obtenido en la metodología de análisis simulado [14].

Red neuronal artificial – Algoritmo genético - MCS: Esta metodología consiste en guardar información importante obtenida de un análisis probabilístico de una red neuronal artificial que se puede incorporar a un algoritmo de optimización para encontrar la configuración óptima de los componentes del sistema híbrido [15].

Enjambre de partículas – Descenso de gradiente: Este método híbrido se puede dividir en dos partes. La primera parte emplea la técnica de enjambre de partículas para obtener una solución casi global, mientras que la segunda parte emplea el algoritmo de descenso de gradiente para determinar la solución óptima [16].

2.2. ALGORITMO GENETICO COMO TECNICA DE OPTIMIZACION SELECCIONADA

El algoritmo genético fue la técnica de optimización seleccionada para este proyecto, debido a que es un método robusto que ha sido probado de forma teórica y empírica en la búsqueda de soluciones en espacios complejos. Asimismo, en esta técnica la probabilidad de que las soluciones converjan en un mínimo local son bajas en comparación con otras técnicas de optimización de movimiento punto a punto.

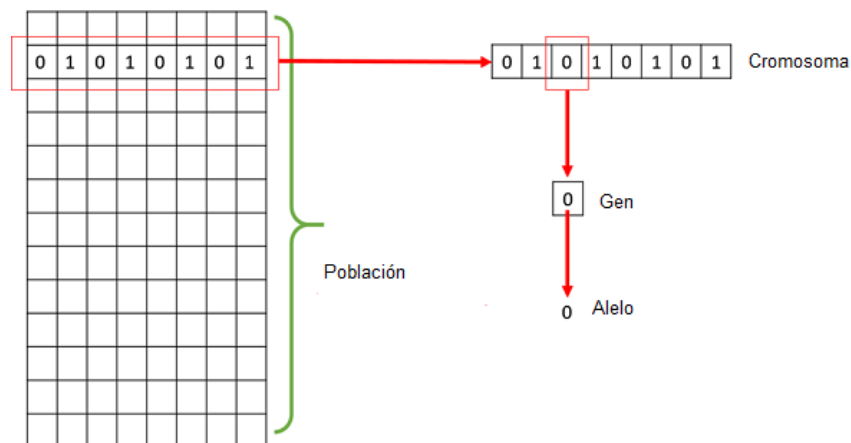
De igual manera, el algoritmo genético es uno de los métodos de inteligencia artificial más usados para optimizar sistemas, su objetivo es conseguir resolver problemas de optimización con o sin restricciones apoyado en un proceso de evolución natural o genética de los seres vivos que imita la evolución biológica [17]. El algoritmo modifica repetidamente una población de soluciones individuales y selecciona indiscriminadamente a personas de la población actual para utilizar como padres con el objetivo de fabricar hijos para la generación consecuente en línea con el principio de supervivencia de las generaciones más fuertes, la fórmula está en condiciones de hacer soluciones a problemas reales y evoluciona hacia una solución óptima. Para

entender más en profundidad el funcionamiento de un algoritmo genético, se deben comprender los siguientes términos [18]:

- Población: es un subconjunto de todas las posibles soluciones al problema dado.
- Cromosomas: un cromosoma es una de esas soluciones al problema dado.
- Gen: un gen es la posición de un elemento de un cromosoma.
- Alelo: es el valor que toma un gen para un cromosoma en particular.
- Genotipo: es la población en el espacio de cálculo.
- Fenotipo: es la población en el espacio real de soluciones del mundo real.
- Función de aptitud: una función de aptitud definida simplemente es una función que toma la solución como entrada y produce la idoneidad de la solución como salida.

En la figura 1 se observa como está conformada una solución posible en una población en el algoritmo genético.

Figura 1. Ejemplo de solución binaria de un algoritmo genético

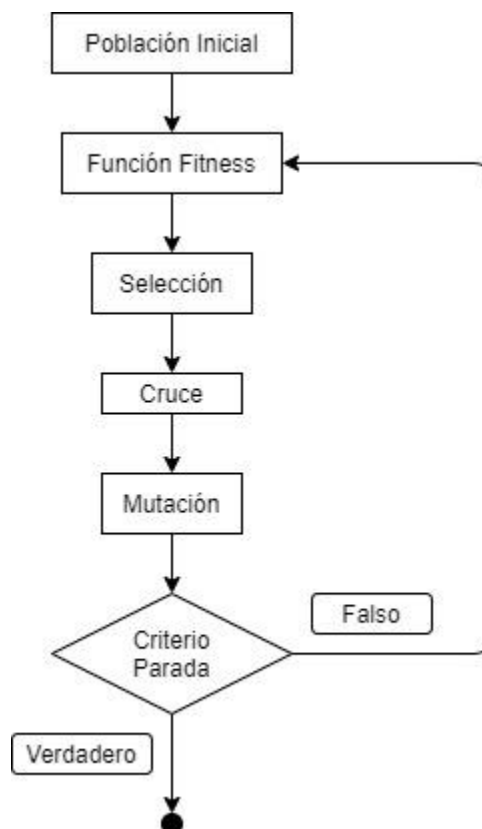


Fuente: Elaboración propia

Esta técnica metaheurística se caracteriza por tener un proceso de inicialización, en el que crea de manera aleatoria una población inicial que está sujeta a una diversidad estructural para las posibles soluciones al problema y que permita evitar la convergencia prematura, que no es más que la repetición de la población anterior en un momento temprano. Seguido a esto, llega un proceso de evaluación en el que se revisa la aptitud para caracterizar las soluciones que están siendo ofrecidas al problema. Finalmente, una condición de término es el criterio por el cual debe finalizar el proceso anterior por el cual se reemplazaba una parte de la población anterior. En términos sencillos, el algoritmo debe detenerse al realizar un número máximo de iteraciones, o bien, al no ser capaz de reemplazar la población. Mientras no exista

una condición de termino, se debe realizar una selección, en la cual eligen los cromosomas que serán cruzados para la siguiente generación, una recombinación o cruce mediante la cual se crean nuevas generaciones con características heredadas y previamente evaluadas de la anterior generación. También seguirán realizándose procesos de mutación, en el que modifican azar una parte del cromosoma de los individuos para acercarlos a un criterio buscado para la solución del problema y finalmente, un reemplazo que seleccionan a los mejores individuos para formar la nueva generación desde una base más sólida. En la figura 2 se muestra la estructura básica de un algoritmo genético.

Figura 2. Estructura básica de un algoritmo genético



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describen brevemente cada uno de los pasos que realiza un algoritmo para encontrar la solución a un problema dado:

1) Población inicial

El proceso comienza con un conjunto de individuos que se denomina población. Cada individuo es una solución al problema que desea resolver [19].

2) Función fitness

El algoritmo debe ser capaz de determinar qué es lo que hace que una solución sea más adecuada que otra solución; esto se determina por la función fitness o de aptitud.

El objetivo de la función es evaluar la viabilidad genética de las soluciones dentro de la población, colocando aquellos con los rangos genéticos más viables, favorables y superiores a la cabeza de la lista.

Su función principal es separar a los hijos más fuertes de los más débiles en la población [19].

3) Selección

Durante cada generación sucesiva, una proporción de la población existente es seleccionada para criar una nueva generación. Las soluciones individuales se seleccionan a través de un proceso basado en la función fitness, en el que las soluciones más adecuadas suelen ser las que más se seleccionan [19].

4) Cruce

En el paso anterior se ha seleccionado los cromosomas padres que producirán descendientes, así el cruce no es más que reproducción [20].

5) Mutación

Después de la selección y el cruce ahora se tiene una nueva población llena de individuos; algunos se copian directamente y otra se produce por el cruce. Para asegurar que los individuos no son todos exactamente iguales, se permite una pequeña posibilidad de mutación. La mutación se basa en cambiar los alelos seleccionados en función de lo que se considere necesario [20].

6) Criterio de parada

Este proceso generacional se repite hasta que se alcanza una condición de terminación o criterio de parada, y se puede dar en los siguientes casos [19]:

- ✓ Se encuentra una solución que satisface los criterios mínimos.
- ✓ Número fijo de generaciones alcanzadas.
- ✓ Se ha alcanzado el presupuesto asignado
- ✓ La solución de mayor rango de la función fitness ha alcanzado un nivel tal que las iteraciones ya no producen mejores resultados.

2.3. OPTIMIZACIÓN

La optimización se puede definir como el conjunto de procedimientos matemáticos implementados en obtener la optimización [21]. También es una serie de principios y métodos matemáticos utilizados para resolver problemas cuantitativos en muchas disciplinas. De manera que, el propósito de la optimización es lograr el mejor diseño en relación con un conjunto de criterios o restricciones priorizados que incluyen

factores de maximización como la productividad, la resistencia, la confiabilidad, la longevidad, la eficiencia y la utilización [21]. El modelo matemático intenta optimizar (maximizar o minimizar) una función objetivo sin desobedecer las limitaciones de recursos. Se utilizan diversas técnicas para lograr la optimización de los sistemas. Lógicamente, al aplicar esta definición sobre el tema de los algoritmos genéticos, se puede hablar directamente de una disminución en la cantidad de memoria utilizada, el tiempo de ejecución y el consumo de energía del algoritmo [22].

El propósito de la optimización es lograr el mejor diseño en relación con un conjunto de criterios o restricciones priorizados que incluyen factores de maximización como productividad, resistencia, confiabilidad, longevidad, eficiencia y utilización [23]. El proceso de toma de decisiones resultante se conoce como optimización. Por lo tanto, el modelo matemático intenta optimizar (maximizar o minimizar) una función objetivo sin violar las restricciones de recursos.

Un algoritmo de optimización es un proceso que es realizado repetidamente comparando varias soluciones hasta que se encuentre una solución óptima o apropiada. Hay dos tipos distintos de optimización algoritmos ampliamente utilizados en la actualidad [23]:

- Algoritmo determinista: que emplea reglas específicas para pasar de una solución a otra.
- Algoritmo estocástico: que en esencia es con reglas de traducción probabilística.

2.4. COSTO NIVELADO DE LA ENERGIA (LCOE)

Al implementar cualquier tipo de energía, el costo de la electricidad es un factor a considerar, sin embargo, se debe considerar el tipo de generación de energía para llegar a una aproximación de precio suficiente, porque muchas tecnologías utilizan diferentes fuentes de energía, lo que puede afectar significativamente sus costos [24].

Este costo también se denomina costo estandarizado o costo equivalente porque refleja una estimación de todos los costos a lo largo de la vida del proyecto de energía. Sin embargo, su principal aplicación es comparar costos con otras tecnologías disponibles en el mercado [24]. Desde el punto de vista financiero, está estrechamente relacionado con la estabilidad de los costos de producción y los precios de la energía, es decir, representa un escenario de desempeño del capital sin riesgos técnicos.

El LCOE se define como el costo total de todo el sistema híbrido dividido por la energía suministrada por el sistema híbrido. Entonces, el LCOE se puede expresar por [25]:

$$LCOE = \frac{CCV * FRC}{E_{Gen}} \left[\frac{\$}{kWh} \right] \quad \text{Ec 1}$$

Donde CCV es el costo del ciclo de vida del sistema híbrido en dólares; E_{Gen} es la energía total por hora generada tanto por el sistema eólico, el fotovoltaico como por el generador diésel en kWh; FRC es el factor de recuperación de capital, un índice para calcular el valor presente de una anualidad. La ecuación para el factor de recuperación de capital es:

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad \text{Ec 2}$$

Donde i es la tasa de interés real anual (8 - 10%), n es el período de vida del sistema en años, el cual es 25 años generalmente dependiendo de la tecnología.

Según esto el costo del ciclo de vida (CCV) toma en cuenta la suma del valor presente del capital y los costos de mantenimiento del generador fotovoltaico, las turbinas eólicas y el generador diésel; la suma del valor presente del capital y los costos de reemplazo del banco de baterías en la vida del sistema. El cual se expresa de la siguiente manera:

$$CCV = C_{solar} + C_{eolico} + C_{GD} + C_{bat} \quad [\$] \quad \text{Ec 3}$$

3. OBJETIVOS

Desarrollar una herramienta computacional capaz de dimensionar una micro-red aislada PV-wind-battery-diésel, basada en la proyección de demanda de los hogares y los recursos renovables disponibles, bajo criterio de mínimo costo nivelado de energía – LCOE.

3.1. OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Diseñar una herramienta en MATLAB que permita realizar el dimensionamiento óptimo del sistema de generación renovable, de almacenamiento y generación diésel de manera genérica.
2. Caracterizar variables relacionadas con la demanda de energía y con el potencial energético, en una zona de estudio donde sea aplicable la herramienta.
3. Validar la herramienta propuesta y proponer su uso a nivel generalizado.

4. METODOLOGÍA

La metodología planteada consiste inicialmente en una verificación del estado del arte, en donde, se consultan los precedentes relacionados con las metodologías existentes para diseñar sistemas híbridos, para encontrar un método práctico y que provea resultados significativos; se seleccionan los mecanismos, herramientas y el software requerido para el desarrollo del proyecto.

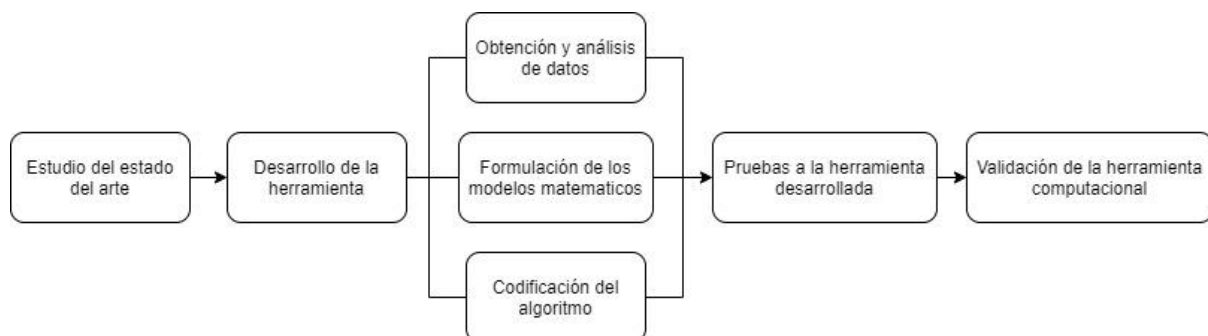
Los resultados del estudio del estado del arte sentarán las bases para desarrollar el código, basándose en el algoritmo genético, en el software Matlab que realice el dimensionamiento óptimo del sistema de generación renovable, de almacenamiento y generación diésel, tomando en consideración variables como irradiancia, velocidad del viento, temperatura y curva de carga.

Se obtendrán los datos de las variables de los diferentes casos de estudio, y a su vez se analizarán estos datos con el fin de validar, editar y codificar la información que sea útil para el proyecto. Luego se realiza la formulación de los modelos matemáticos de las diferentes tecnologías que serán empleadas en el sistema híbrido de energía. Seguidamente se procede a la codificación del algoritmo genético con cada una de sus características en el software Matlab.

La herramienta computacional desarrollada se probará, se analizarán los resultados y se comprobará si se está logrando un dimensionamiento óptimo del sistema híbrido, mediante casos hipotéticos, donde coexistan las tres fuentes de energía que se manejarán en este proyecto que son energía solar, energía eólica y energía a partir de combustión.

Por último, mediante la toma de un caso real, donde se tenga una suficiente cantidad de datos de carga, irradiancia, velocidad de viento y temperatura, se corroborará que la solución que arroja el programa cubre la demanda energética del sitio en cualquier época del año con la generación de energía que la herramienta arroja; y se propondrá el uso de la herramienta a nivel generalizado.

Figura 3. Diagrama de la metodología



Fuente: Elaboración propia.

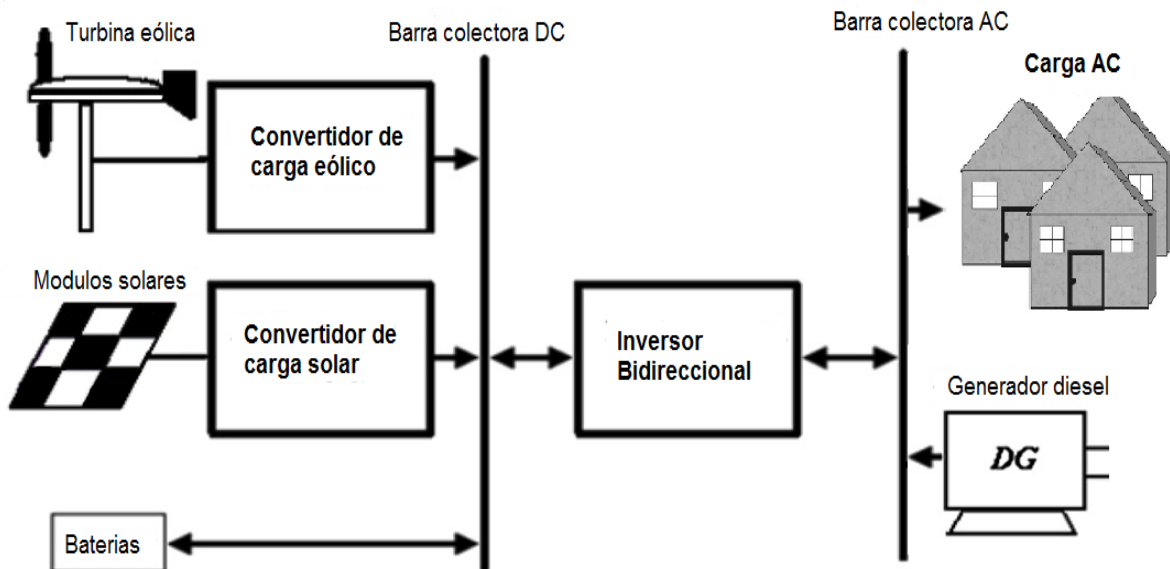
5. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

En este capítulo se explicarán en primer lugar los componentes que conforman una micro-red de energía, seguido de los modelos matemáticos que se utilizaron para modelar el sistema y por último las características físicas de los emplazamientos seleccionados para este trabajo.

5.1. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA HÍBRIDO

La figura 4 muestra un diagrama esquemático de un sistema híbrido autónomo fotovoltaico/eólico, que consiste en un conjunto fotovoltaico, un aerogenerador, un banco de baterías, un generador diésel y un inversor. El montaje fotovoltaico y el aerogenerador trabajan para satisfacer la demanda de carga. Cuando la generación de energía renovable sobrepasa la demanda energética, se aprovecha la energía excedente para cargar el banco de baterías, conectado a un bus de CC estándar. Y en caso contrario, cuando la energía renovable no logra cumplir con la demanda de energía, las baterías deben descargarse para ayudar a la matriz fotovoltaica y a la turbina eólica a satisfacer las necesidades energéticas hasta agotar su energía. En el caso donde ni las fuentes de energía, ni las baterías suplan la demanda energética, entrara en operación el generador diésel, generando la energía faltante.

Figura 4. Esquema de los componentes de la micro-red



Fuente: Elaboración propia.

5.2. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENETICO

A continuación, se explica brevemente la secuencia de acciones que realiza el algoritmo genético implementado para realizar el dimensionamiento óptimo del sistema híbrido de energía.

- **GENERACIÓN DE LA POBLACIÓN INICIAL**

El proceso comienza cuando el algoritmo genético genera la población inicial de soluciones, tomando valores entre 0 y la cantidad máxima tanto de módulos fotovoltaicos como de turbinas eólicas, esta cantidad máxima depende del área disponible que se tenga para la instalación del sistema híbrido. El número máximo de equipos y el área disponible para la instalación son las restricciones que tienen las configuraciones iniciales. Al igual que el generador diésel que se restringe su generación a no sobrepasar la demanda energética en el tiempo t .

- **CÁLCULO FUNCIÓN OBJETIVO**

Se adopta como criterio de optimización y función objetivo, el mínimo Costo Nivelado de la Energía (LCOE) del sistema. Este indicador económico tiene en cuenta el costo de construir y operar un sistema de generación de energía eléctrica y es adecuado para la evaluación de proyectos de generación basados en fuentes renovables, los cuales se caracterizan por tener altas inversiones iniciales, tiempos de vida largos y bajos costos de operación y mantenimiento.

La función de aptitud para cada solución se calcula usando la energía generada, energía requerida y el valor total del costo nivelado de la energía. El algoritmo genético busca la configuración de mínimo costo, por tanto, la función objetivo debe minimizarse. La función fitness o función de aptitud seleccionada para garantizar que sobrevivan las cadenas de menor costo; tiene la siguiente forma:

$$fitness = \frac{1}{(1+e^{-lcoe}) + \left(\frac{E_{Requerida}}{E_{generada}}\right)} \quad Ec 4$$

Se pueden seleccionar otras formas de función de aptitud; sin embargo, se encontró que la forma anterior, se proporciona las soluciones más efectivas de la búsqueda del algoritmo genético, debido a que clasifica las soluciones entre aptas y no aptas para luego volverlas porcentajes.

Se utilizó una representación binaria de los individuos ya que es una de las representaciones más simples y más utilizadas en los GA. En este tipo de representación, el genotipo consta de cadenas de bits.

- **SELECCIÓN**

El algoritmo genético genera nuevos miembros de la nueva generación mediante un esquema de selección. La idea de la selección es escoger a los individuos más aptos y dejarlos pasar sus genes a la siguiente generación. La forma de selección utilizada se denomina *Selección de torneo*, la cual consiste en seleccionar n individuos de la población al azar, en este caso se calculó este número de individuos multiplicando el número de equipos por el 30%, luego se selecciona al mejor de ellos para convertirse en padre. El mismo proceso se repite para seleccionar el siguiente padre.

- **CRUCE**

El cruce es la fase más significativa de un algoritmo genético. Para cada par de padres a aparearse, se elige un punto de cruce al azar dentro de los genes. Luego de que el algoritmo seleccione los dos pares de individuos, se genera un número aleatorio uniformemente distribuido entre de 0.0 a 1.0. Para realizar el cruce, se selecciona aleatoriamente un punto de cruce a lo largo de las dos cadenas (por ejemplo, la posición 3). El operador de cruce mueve los últimos 3 dígitos de la primera cadena del par a las posiciones de dígitos 1 a 3 de la segunda solución, mientras que los últimos tres dígitos de la segunda solución se mueven a la parte final de la primera cadena.

- **MUTACIÓN**

La mutación ocurre para mantener la diversidad dentro de la población y prevenir una convergencia prematura. Considere una probabilidad de mutación del 1%. El algoritmo genético considera cada cadena bit a bit en la nueva generación formada como resultado de la reproducción y el cruce. Luego se genera un número aleatorio uniformemente distribuido en el rango de 0.0 a 1.0. El algoritmo aplica la mutación si el número aleatorio es menor que 0.01. De lo contrario, no aplica la mutación a ese bit en particular. El operador de mutación cambia el valor del bit al valor opuesto (es decir, de 0 a 1 o de 1 a 0).

- **CRITERIO DE PARADA**

El algoritmo termina si la población ha convergido (no produce descendencia que sea significativamente diferente de la generación anterior) o si se ha llegado al número máximo de iteraciones establecido con anterioridad. Con esto, entonces se dice que el algoritmo genético ha aportado un conjunto de soluciones al problema.

5.3. MODELOS MATEMÁTICOS

Para predecir el rendimiento del sistema híbrido, los elementos individuales deben ser modelados y después se evalúa su combinación para satisfacer la demanda energética.

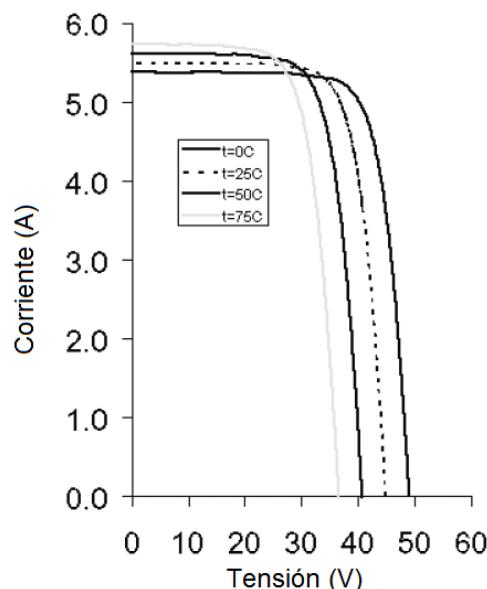
5.3.1. PANELES FOTOVOLTAICOS

El modelo de energía de matriz fotovoltaica, el modelo de irradiación solar en la superficie del módulo fotovoltaico y el modelo de temperatura del módulo fotovoltaico son las tres partes que componen el modelo de simulación de generación de energía para el sistema fotovoltaico en la herramienta computacional. Este modelo le permitirá al algoritmo genético calcular la cantidad de energía que debe generar el sistema fotovoltaico para cubrir la demanda energética.

El modelo que expresa la forma de salida de la potencia máxima del módulo fotovoltaico son útiles para la evaluación del sistema fotovoltaico debido a que el rendimiento y el funcionamiento del generador fotovoltaico está expresado en su potencia máxima.

La curva característica de un módulo fotovoltaico (figura 5), también llamada curva de intensidad-voltaje, representa los valores de tensión y corriente, medidos experimentalmente, de un panel fotovoltaico sometido a unas determinadas condiciones constantes de insolación y temperatura [26].

Figura 5. Curva I - V del módulo fotovoltaico BP 7190S

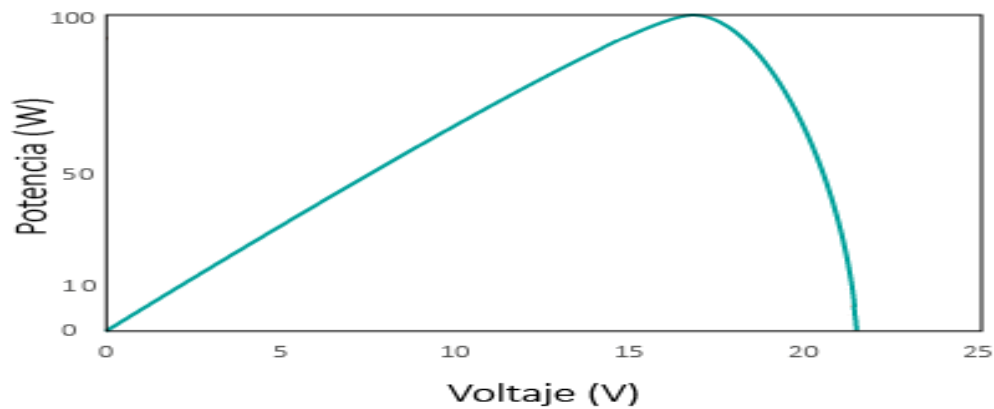


Fuente: Catalogo bp Solar

La curva de potencia contra voltaje permite observar el comportamiento que tiene un módulo fotovoltaico según la irradiancia solar global horaria que se presente en el

sitio. La figura 6 muestra el comportamiento típico de una curva de potencia contra voltaje.

Figura 6. Curva de potencia de un módulo fotovoltaico



Fuente: Elaboración propia

Los siguientes modelos matemáticos utilizan la irradiancia solar disponible en la superficie inclinada, la temperatura ambiente y los datos de los módulos fotovoltaicos como entradas del modelo y así obtener la potencia de salida del generador fotovoltaico [27]. Potencia por cada panel fotovoltaico:

$$P_{panel} = A * \eta_{panel} * I \text{ [W]} \quad [27] \quad \text{Ec. 5}$$

En donde, P_{panel} es la potencia de cada panel fotovoltaico; A es el área del panel fotovoltaico; η_{panel} es la eficiencia del panel fotovoltaico a una temperatura de operación de la celda fotovoltaica (T); e I es la irradiancia solar disponible en la superficie inclinada en el sitio.

La eficiencia del panel fotovoltaico a una temperatura de operación de la celda fotovoltaica (T) se expresa o modela de la siguiente forma:

$$\eta_{panel} = \eta_r \eta_{pc} [1 - \beta(T_c - T_{cref})] \quad [28] \quad \text{Ec. 6}$$

En donde, η_r es la eficiencia del módulo de referencia; η_{pc} es la eficiencia de acondicionamiento de energía que es igual a 1 si se usa un seguidor de punto de máxima potencia (MPPT); β es el coeficiente de temperatura de eficiencia del generador, se cree que es una constante y para las celdas de silicio el rango de β es 0.004 - 0.006 por cada °C [29]; T_{cref} es la temperatura de referencia de la celda en °C; y T_c es la temperatura de la celda en °C y se puede calcular de la siguiente manera:

$$T_c = T_a + \left[\frac{NOCT - 20}{800} \right] I \text{ [}^\circ\text{C]} \quad [30] \quad \text{Ec. 7}$$

En donde, T_a es la temperatura ambiente en °C; $NOCT$ es la temperatura nominal de funcionamiento de la celda en °C. La cantidad de módulos máximos en el arreglo fotovoltaico es una variable importante debido a que muestra la cantidad límite de módulos que suplirían la demanda energética hora a hora, se calcula con la siguiente expresión:

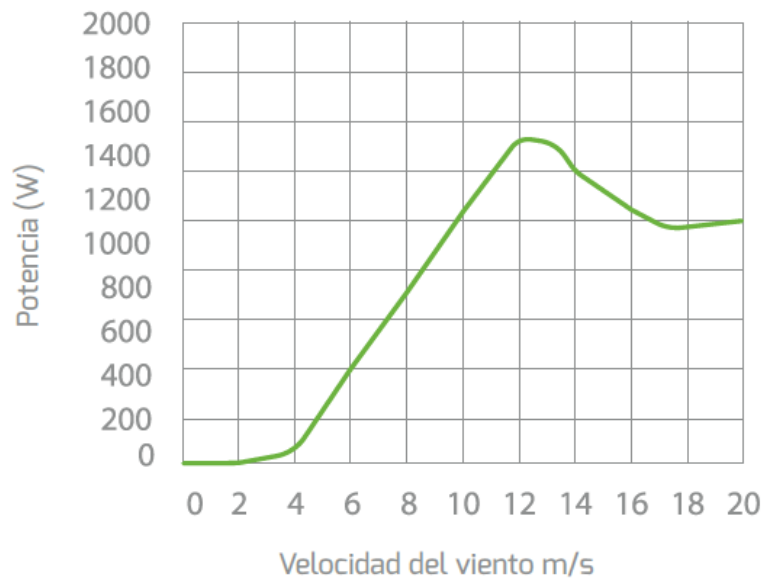
$$CP_{Max} = \frac{P_{Req}}{A * \eta_{Panel} * I} \quad [27] \quad Ec. 8$$

En donde, CP_{Max} es la cantidad máxima de paneles fotovoltaicos; y P_{Req} es la potencia requerida en el sitio.

5.3.2. TURBINAS EÓLICAS

La potencia de salida del generador de turbina eólica en un sitio específico depende de la velocidad del viento a la altura del buje y las características de velocidad de la turbina [23]. En la figura 7 muestra la curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes velocidades del viento.

Figura 7. Curva de potencia de un aerogenerador Bornay 13+



Fuente: Catalogo Bornay

El modelo adecuado para simular la producción de energía de una turbina eólica es el siguiente:

$$P_{TE} = \begin{cases} V^3 \left(\frac{P_{nominal}}{V_{nominal}^3 - V_{arranque}^3} \right) - P_{nominal} \left(\frac{V_{arranque}^3}{V_{nominal}^3 - V_{arranque}^3} \right), & V_{arranque} \leq V < V_{nominal} \\ P_{nominal}, & V_{nominal} \leq V \leq V_{max_vel} \\ 0, & V_{max_vel} < V < V_{arranque} \end{cases} \quad Ec. 9$$

$$P_{turbina} = P_{TE} * \eta_{TE} \quad [W]$$

Ec.
10

En donde, $P_{turbina}$ es la potencia de cada turbina eólica; V es la velocidad del viento a la altura deseada en el intervalo de tiempo actual, $V_{arranque}$ es la velocidad del viento de corte o velocidad de arranque, $V_{nominal}$ es la velocidad del viento nominal, V_{max_vel} es la velocidad del viento de corte o máxima velocidad de la turbina y η_{TE} es la eficiencia de la turbina eólica. $P_{nominal}$ es la potencia nominal de la turbina eólica.

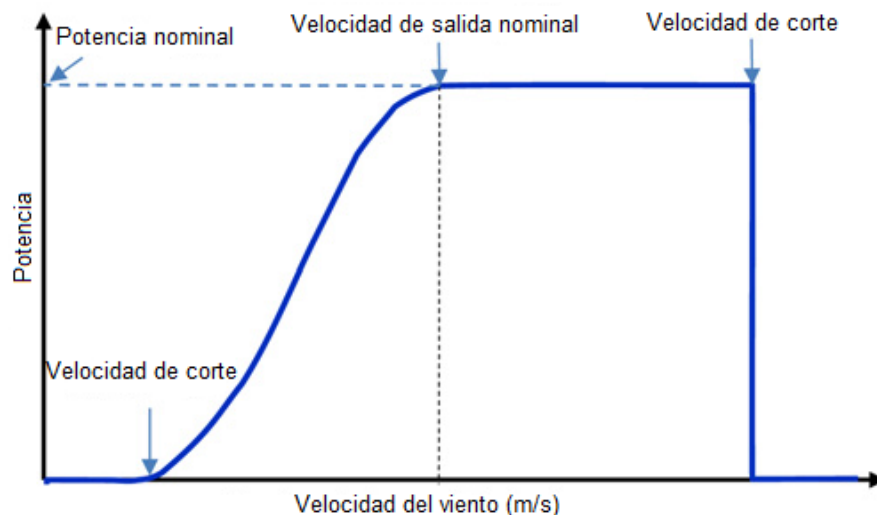
El siguiente modelo aplica la ley de potencia para el perfil de velocidad del viento vertical para ajustar el perfil del viento para la altura a la que se instala el aerogenerador:

$$V = V_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^{\alpha_1} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad [31] \quad \text{Ec. 11}$$

En donde, V es la velocidad del viento a la altura del buje H ; V_0 es la velocidad del viento medida a la altura de referencia H_0 ; y α_1 es el exponente de la ley de potencia, que varía con la elevación, la hora del día, la estación, la naturaleza del terreno, la velocidad del viento y la temperatura. El valor de 1/7 generalmente se toma cuando no hay datos específicos del sitio [31].

La siguiente figura muestra las características de la potencia de salida de una turbina eólica con velocidad de viento constante [23].

Figura 8. Características de potencia de una turbina eólica



Fuente: Elaboración propia

La velocidad de arranque es la velocidad a la que la turbina comienza a girar y a generar energía, por lo general es a una velocidad del viento baja. La velocidad de corte es la alta velocidad del viento a la que las fuerzas sobre el aerogenerador son

altas, por lo que existe el riesgo de dañar el rotor; para evitar daños, se emplea un sistema de frenado para detener el rotor [23]. La velocidad de salida nominal es la velocidad del viento entre la velocidad de corte y la velocidad de corte donde la salida de potencia alcanza el límite máximo que el generador eléctrico es capaz de hacer y se denomina salida de potencia nominal.

Un parámetro fundamental para determinar el funcionamiento de un aerogenerador es la densidad del aire, para España se encuentra alrededor de 1,298 kg/m³ en zonas ubicadas a nivel del mar.

El modelo que calcula la densidad del aire para el emplazamiento objeto de estudio es el siguiente:

$$\rho = \left(\frac{353.049}{T} \right) * e^{(-0.034 * \frac{Z}{T})} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad [30] \quad \text{Ec. 12}$$

En donde, ρ es la densidad del aire; T es la temperatura en Kelvin; y Z es la altura del anemómetro en el lugar de instalación del equipo.

5.3.3. BANCO DE BATERÍAS

El sistema de almacenamiento (banco de baterías) funciona como sistema de respaldo para satisfacer la demanda de carga cuando las fuentes de energía renovable no están disponibles, normalmente son diseñadas con 1, 2 o 3 días de autonomía (esto depende de la producción de energía eólica, solar fotovoltaica y la demanda energética). El estado de la batería está relacionado con el estado de carga anterior, con el escenario de producción y consumo de energía del sistema en cualquier hora, durante el tiempo de t-1 a t. En el proceso de carga, cuando la salida de los generadores eólicos y fotovoltaicos es mayor que la demanda de energía, el banco de baterías tendrá una capacidad disponible en la hora t que se describe por:

- Carga de la batería

$$SOC_{carga} = SOC_{(t-1)} - (1 - \sigma) + \left[E_{G(t)} - \frac{E_{reque(t)}}{\eta_{inv}} \right] * \eta_b \quad [kW] \quad [32] \quad \text{Ec. 13}$$

En donde, SOC_{carga} es el estado de carga de las baterías; $SOC_{(t-1)}$ es el estado de carga en el tiempo anterior; σ es el índice de auto-descarga de la batería; $E_{G(t)}$ es la energía entregada a la batería; $E_{reque(t)}$ es la energía requerida por el sitio en una hora t; η_{inv} es la eficiencia del inversor y η_b es la eficiencia de la batería.

Así mismo, cuando la demanda energética es mayor que la energía disponible producida, el banco de baterías inicia la descarga (estado de descarga). La capacidad disponible del banco de baterías en la hora t se expresa como:

- Descarga de la batería

$$SOC_{descarga} = SOC_{(t-1)} - (1 - \sigma) + \left[\frac{E_{reque}(t)}{\eta_{inv}} - E_{G(t)} \right] [kW] \quad [32] \quad \text{Ec. 14}$$

En donde, $SOC_{descarga}$ es el estado de descarga de la batería.

En cualquier momento, se limita o restringe la capacidad de almacenamiento de la siguiente forma:

$$SOC_{min} \leq SOC_{(t)} \leq SOC_{max} \quad [32] \quad \text{Ec. 15}$$

En donde, SOC_{max} es la capacidad de almacenamiento máxima; SOC_{min} es la capacidad de almacenamiento mínima; y $SOC_{(t)}$ es el estado de carga en una hora t .

Utilizando para SOC_{max} la capacidad nominal de almacenamiento SOC_N :

$$SOC_{min} = DOD * SOC_N [kW] \quad [32] \quad \text{Ec. 16}$$

En donde, DOD es el porcentaje que representa la profundidad de descarga máxima permitida de la batería, para este proyecto el valor de DOD es 20%.

5.3.4. GENERADOR DIÉSEL

El generador diésel se utiliza como sistema de respaldo o como fuente de energía secundaria, debido a que en caso de que el sistema de acumulación sea insuficiente para suplir la energía requerida durante las horas de mayor demanda. Pero, es importante resaltar la consideración de que se debe evitar el funcionamiento sin carga o con bajo porcentaje de carga del generador diésel [33]. Para calcular la potencia que se requiere del generador diésel se utiliza la siguiente expresión:

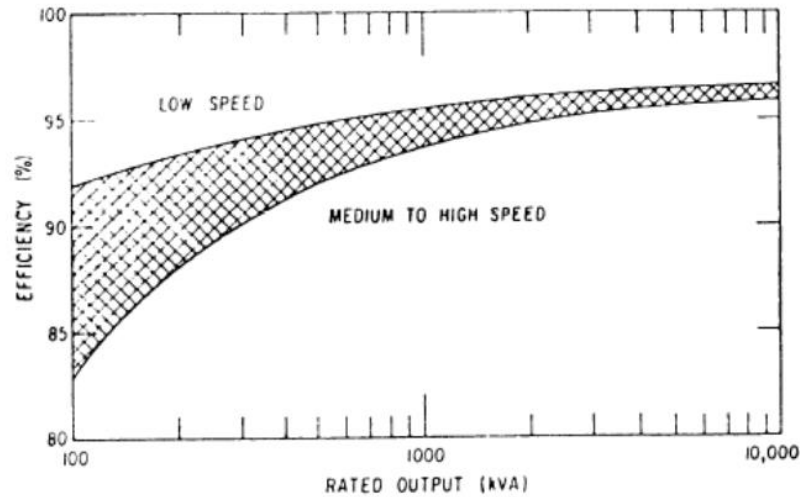
$$P_{diesel} = P_{Req} - (P_{Solar} + P_{Eólica}) [kW] \quad \text{Ec. 17}$$

En donde, P_{diesel} es la potencia del generador diésel; P_{Req} es la potencia requerida; P_{Solar} es la potencia del sistema solar fotovoltaico; y $P_{Eólica}$ es la potencia del sistema eólico.

Los generadores eléctricos presentan eficiencias entre 85 y 95%, siendo más eficientes los de mayor tamaño, asimismo los de menor velocidad [34], pero al estar

acoplados a un motor de combustión su eficiencia puede llegar a disminuir hasta un 30% - 40%. Esta eficiencia disminuye en forma no lineal al alejarse de la plena carga.

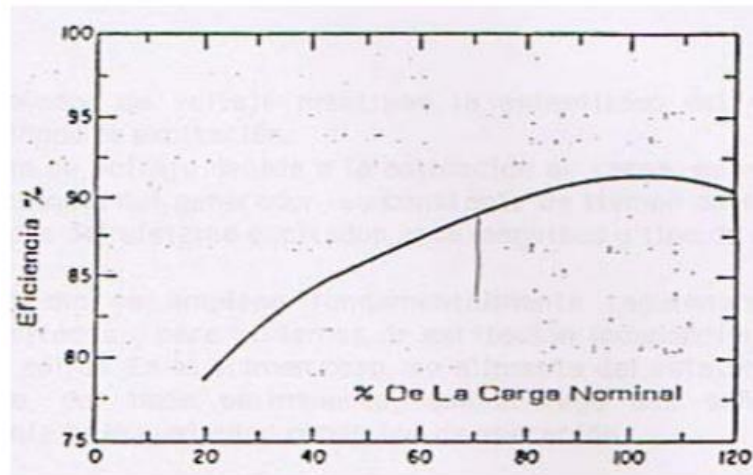
Figura 9. Eficiencias típicas de generadores según distintas potencias y velocidades nominales



Fuente: Tomado de [34]

Para equipos entre 50 y 2.000 kVA, la eficiencia del generador en función de su nivel de carga es una función cuadrática [34].

Figura 10. Eficiencia típica de un generador según nivel de carga



Fuente: Tomado de [34]

5.3.5. BALANCE DE ENERGÍA

La herramienta optimiza el dimensionamiento de las configuraciones a través de un balance de energía hora a hora, el balance se expresa en la siguiente ecuación:

$$E_{Req} \leq E_{Solar} + E_{Eólica} \pm E_{baterías} + E_{Gen_{diesel}} \quad \text{Ec. 18}$$

En donde, E_{Req} es la energía requerida en el sitio; E_{Solar} es la energía producida por el sistema solar fotovoltaico; $E_{Eólica}$ es la energía generada por las turbinas eólicas; $E_{baterías}$ es la energía entregada por las baterías y $E_{Gen\,diesel}$ es la energía producida por el generador diésel.

5.3.6. CRITERIO DE EVALUACIÓN

La variedad de métodos en la literatura es muy amplia para evaluar sistemas híbridos fotovoltaico-eólico, entre los métodos existentes está la relación energía / carga, la relación batería / carga y la no disponibilidad de energía [35]. Con el fin de seleccionar una integración óptima de un sistema híbrido para satisfacer la demanda energética, la evaluación se puede realizar sobre la base de económica del suministro de energía.

Es adecuado realizar un análisis económico al pretender optimizar la dimensión de los sistemas híbridos integrados de generación fotovoltaica / eólica beneficiando un costo unitario asequible de la energía producida. De acuerdo con el concepto de Costo Nivelado de la Energía (LCOE), se desarrolla el enfoque económico para ser el mejor indicador de la rentabilidad económica en este trabajo. El LCOE se define como el precio total de todo el sistema híbrido dividido por la energía generada por la micro-red [36]. Se consideran tres partes principales: sistema fotovoltaico, aerogenerador y generador diésel. En primer lugar, se debe calcular el LCOE anualizado para cada tecnología; para el caso del arreglo fotovoltaico, el sistema eólico y el sistema de almacenamiento en baterías, basado en el modelo matemático del costo nivelado de la energía mencionado anteriormente, el LCOE se calcula de la siguiente manera:

- ✓ Para los módulos fotovoltaicos y las turbinas eólicas

$$LCOE = \frac{AC_I + AC_{O\&M}}{E_{AG}} \left[\frac{\$}{kWh} \right] \quad \text{Ec. 19}$$

Donde AC_I es el costo de inversión anualizado, $AC_{O\&M}$ es el costo de operación y mantenimiento anualizado, el cual es el 1,5% - 2% de la inversión inicial del sistema, dependiendo de la tecnología y E_{AG} es la energía anual generada . El costo de inversión anualizado AC_I se halla de la siguiente forma:

$$AC_I = \frac{I(1+i)^{n*i}}{(1+i)^n - 1} \quad [\$] \quad \text{Ec. 20}$$

En donde I es la inversión inicial del sistema, i es la tasa de interés anual (8 - 10%) y n es el número de años de vida útil que tiene el sistema. Y la inversión se calcula multiplicando el número de equipos del sistema con el costo por unidad de un equipo.

- ✓ Para el banco de baterías

Para el caso de las baterías, el costo nivelado de la energía se calcula como para los módulos fotovoltaicos y las turbinas eólicas, pero agregando un nuevo costo denominado *costo de reposición*, quedando de la siguiente forma:

$$LCOE_{Baterias} = \frac{AC_I + AC_{O\&M} + AC_{Rep}}{E_{AG}} \left[\frac{\$}{kWh} \right] \quad \text{Ec 21}$$

el costo de reposición se trata del costo de reemplazar un elemento por otro de las mismas características. Este costo se calcula de la siguiente manera:

$$AC_{Rep} = \text{No. de baterias} * \text{costo unitario de la bateria} \quad \text{Ec 22}$$

- ✓ Para el generador diésel

Para el caso de la generación diésel, en el cálculo del costo nivelado de la energía, se debe tener en cuenta los costos del combustible, por lo que la formula se expresa de la siguiente manera:

$$LCOE_{Diesel} = \frac{AC_I + AC_{O\&M} + AC_{Combustible}}{E_{GD}} \left[\frac{\$}{kWh} \right] \quad \text{Ec. 23}$$

En donde $AC_{Combustible}$ son los costos del combustible anualizado y E_{GD} es la energía generada por el generador diésel anualizado. Los costos del combustible se calculan siguiendo una serie de pasos, de esta forma:

Paso 1: Calcular la energía del combustible

$$E_{Combustible} = \frac{E_{GD}}{\eta_{GD}} \quad [kWh] \quad \text{Ec. 24}$$

Donde η_{GD} es la eficiencia del generador diésel.

Paso 2: La eficiencia del generador diésel η_{GD} se estima de la siguiente forma:

$$\eta_{GD} = \frac{P_{diesel}}{P_{termica_{diesel}}} \quad \text{Ec 25}$$

Donde $P_{termica_{diesel}}$ es la potencia térmica del diésel expresada en kW, y calcula de esta manera:

$$P_{termica_{diesel}} = \dot{m}_{diesel} * HR \quad [kW] \quad \text{Ec 26}$$

Donde m_{diesel} es el flujo másico del combustible, en este caso diésel, y HR es el poder calorífico del Diésel. El flujo másico del combustible se calcula de la siguiente forma:

$$m_{diesel} = \frac{Q_C}{HR} \quad \text{Ec 27}$$

Donde es Q_C es el consumo calorífico del generador diésel en BTU/h.

Paso 2: Hallar la cantidad de litros consumidos por el GD

$$L_{Diesel} = HR * E_{Combustible} \quad [L] \quad \text{Ec. 28}$$

Paso 3: Calcular el costo del combustible

$$AC_{Combustible} = L_{Diesel} * \$ \text{ Precio del diesel} \quad [\$] \quad \text{Ec. 29}$$

Y finalmente, después de haber calculado el LCOE de cada tecnología, se procede a calcular el LCOE total del sistema híbrido, el cual se expresa con la siguiente ecuación:

$$LCOE_{total} = \frac{(LCOE_{Solar} * E_{Solar}) + (LCOE_{Eolico} * E_{Eólica}) + (LCOE_{Baterias} * E_{baterias}) + (LCOE_{Diesel} * E_{Gen diesel})}{E_{Solar} + E_{Eólica} + E_{baterias} + E_{Gen diesel}} \quad \text{Ec 30}$$

$$\left[\frac{\$}{kWh} \right]$$

En donde, $LCOE_{total}$ es el costo nivelado de la energía; $LCOE_{Solar}$ es el costo nivelado de la energía de la tecnología solar fotovoltaica; $LCOE_{Eolico}$ es el costo nivelado de la energía de la tecnología eólica; $LCOE_{Baterias}$ es el costo nivelado de la energía de baterías; $LCOE_{Diesel}$ es el costo nivelado de la energía de generadores diésel.

5.4. ESTRUCTURA DE LA HERRAMIENTA

La herramienta diseñada tiene como objetivo entregar una micro-red con una óptima configuración para Zonas No Interconectadas, debido a esto su funcionamiento se basa en el aprovechamiento de fuentes de energía renovable, específicamente la energía solar fotovoltaica y eólica, además la micro-red tendrá como respaldo una fuente convencional de energía como lo es un generador diésel y sistemas de acumulación (baterías).

El siguiente modelo de optimización es una herramienta de simulación para obtener el dimensionamiento o la configuración óptima de un sistema híbrido solar-eólico empleando un banco de baterías en términos del menor costo nivelado de la energía utilizando un algoritmo genético. En la figura 11 se presenta el diagrama de flujo del proceso de optimización de la herramienta computacional, a continuación, se realiza una breve explicación del mismo:

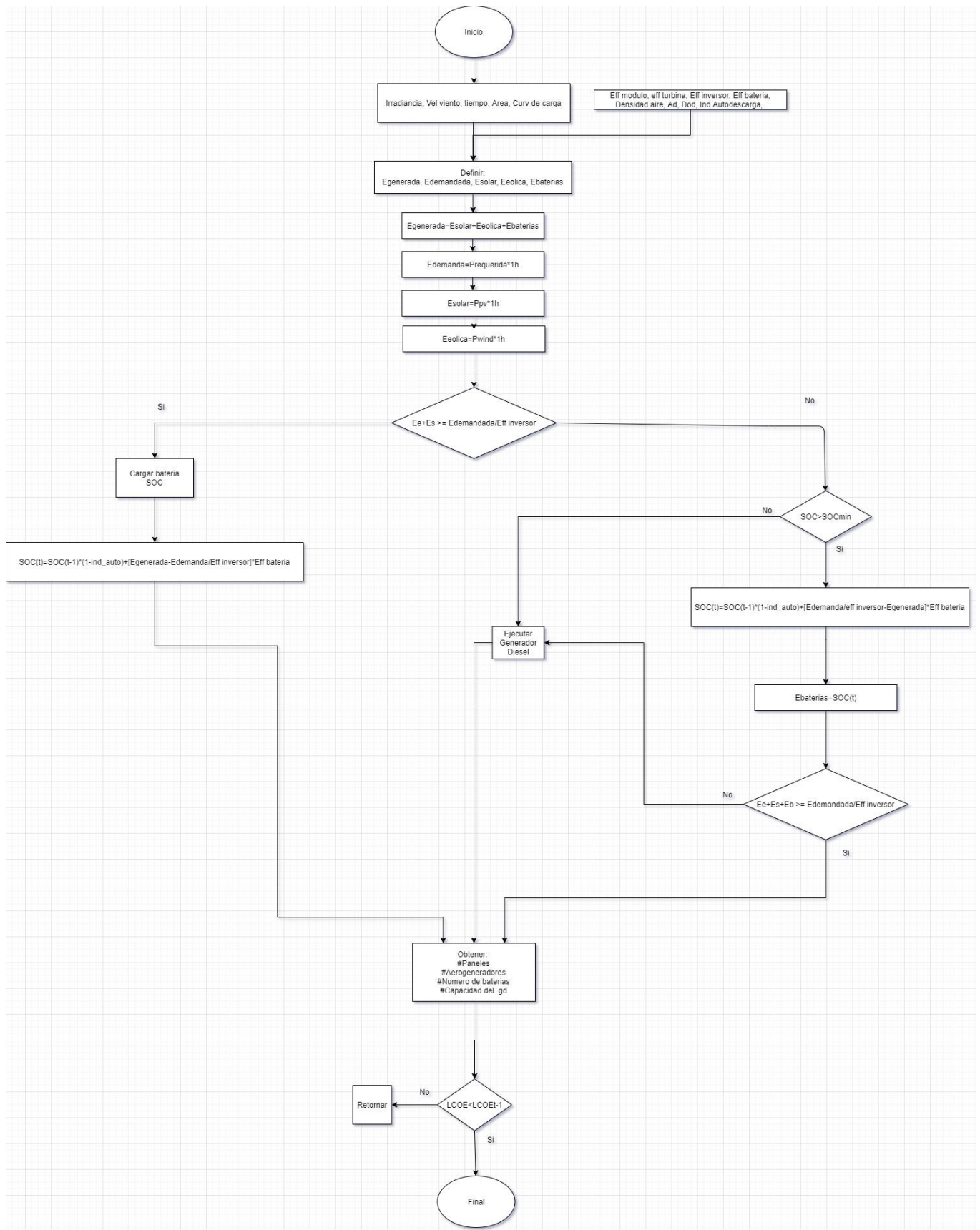
El proceso inicia con la compilación de la información requerida para el funcionamiento correcto de la herramienta desde las bases de datos (velocidad de viento, el área disponible y la curva de carga), luego se definen las variables de energía generada, energía demandada, energía solar y energía eólica.

Con la información previa es posible efectuar el balance de energía, así mismo, se evalúa si la energía generada por el arreglo fotovoltaico y los aerogeneradores es mayor o igual a la energía requerida en esa hora, los cálculos se ejecutan hora a hora.

Si el balance energético muestra que la generación de energía eólica más la energía solar es mayor o igual que el requerimiento energético se genera un excedente de energía, éste es utilizado para cargar el sistema de acumulación (baterías). Si por el contrario la generación de energía eólica más la energía solar es insuficiente para satisfacer la demanda energética se pone en marcha el sistema de acumulación. En caso de que en esa hora las baterías no puedan suplir el requerimiento energético, el generador diésel se encargará de compensar la micro-red.

Una vez se tenga la configuración de la micro red (número de paneles, número de turbinas, número de baterías y el tamaño el generador diésel) se procede a evaluar según el criterio LCOE, la configuración con LCOE de menor valor es la óptima, de no cumplirse este criterio se realiza el procedimiento nuevamente hasta que el valor de LCOE de la configuración actual y la anterior sean iguales o muy similares ($LCOE < LCOE_{t-1}$).

Figura 11. Diagrama de flujo de la estructura lógica de la herramienta



Fuente: Elaboración propia

6. PRUEBAS A LA HERRAMIENTA DESARROLLADA

En esta etapa se realizó la búsqueda y selección de diferentes escenarios que cuenten con distintos valores de irradiancia incidente y velocidades de viento para demostrar el funcionamiento y la lógica que sigue la herramienta computacional. Las características de los equipos utilizados en este trabajo para cada uno de los casos de estudio se encuentran especificadas en la tabla 1.

Tabla 1. Características de los equipos

Parámetro	Valor	Unidad
Panel Solar - BP 7190S		
Potencia	0,19	kW
Eficiencia	15,1	%
Área del panel solar	1,26	m ²
Aerogenerador - Bornay 25.2+		
Potencia	3	kW
Eficiencia	30	%
Velocidad Nominal	12	m/s
Velocidad de arranque	3	m/s
Máxima velocidad	60	m/s
Área de barrido	12,88	m ²
Baterías - Monoblock Power 250		
Eficiencia	92	%
Capacidad nominal	250	Ah
Voltaje	12	V
Carga mínima	20	%
Generador Diésel – C1.1		
Capacidad Nominal	8	kW

Se seleccionó un inversor con una eficiencia del 94% de la marca Xantrex-GT.

6.1. CASO 1 – ESTACIONES DEL AÑO

Se optó por probar la herramienta en condiciones climáticas opuestas, es decir, en invierno y en verano, esto con el fin de poder observar la lógica computacional de la herramienta.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El lugar seleccionado en España, se encuentra ubicado en la comunidad autónoma de Valencia. Adicionalmente, para este caso se tomó un grupo de 8 viviendas con demanda punta por vivienda de 1,8 kW.

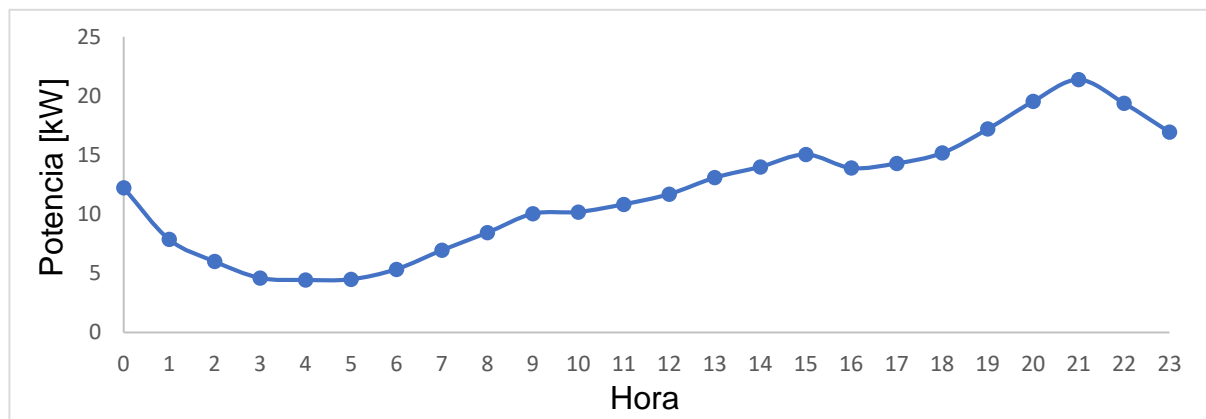
INVIERNO

En el invierno en esta comunidad se pueden llegar a presentar temperaturas de hasta 26,1 °C, con valores irradiancia y velocidad del viento promedio de 762 W/m² y 16,5 m/s respectivamente.

CURVA DE CARGA

Este grupo de viviendas, en el invierno, tuvo una demanda promedio de 11,12 kW. La curva de carga (figura 13) se determinó con los datos promedio de demanda de potencia en este emplazamiento en un día.

Figura 12. Curva de carga diaria mensual de Valencia, España en el invierno



Fuente: Elaboración propia

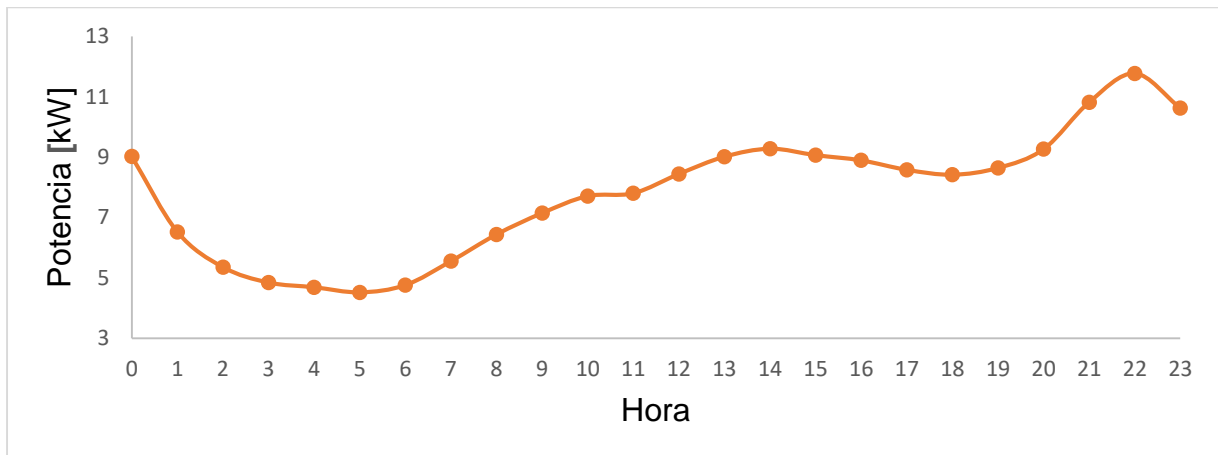
VERANO

Por otro lado, en el verano en esta comunidad se pueden llegar a presentar temperaturas de 37,2 °C, con valores irradiancia promedio de 811 W/m² y velocidad del viento promedio de 8,9 m/s.

CURVA DE CARGA

En el verano este grupo de viviendas tuvo una demanda de potencia promedio de 7,47 kW, la curva de carga del lugar se muestra en la figura 13.

Figura 13. Curva de carga diaria mensual de Valencia, España en el verano



Fuente: Elaboración propia

6.2. VALIDACIÓN DE EFECTIVIDAD: CASO VALENCIA

Una vez caracterizadas las variables y verificado el correcto funcionamiento de la herramienta desarrollada, es requerido validar que la configuración óptima que el programa selecciona, de acuerdo con el criterio de mínimo costo nivelado de la energía, tiene la capacidad de suplir la demanda energética de un sitio específico en cualquier época del año.

Siguiendo con esto, se seleccionó un grupo de 8 viviendas en la comunidad autónoma de Valencia, España como caso de prueba, debido a que se cuenta con una suficiente cantidad de datos de carga, irradiancia, velocidad de viento y temperatura, también porque este país tiene diferentes condiciones climáticas a lo largo del año, lo cual es apropiado para verificar el funcionamiento correcto de la herramienta y validar si la herramienta desarrollada en este trabajo arroja resultados reales.

Las condiciones meteorológicas de Valencia son de 467 W/m² de irradiancia incidente promedio anual diario y 9,1 m/s de velocidad de viento promedio anual diario.

7. RESULTADOS

En este capítulo se realizaron las simulaciones correspondientes, para determinar la efectividad de la herramienta computacional al momento de optimizar una micro-red de energía. A continuación, se presentan los resultados de la aplicación del método de dimensionamiento del sistema híbrido de energía propuesto, en los casos de estudio.

7.1. CASO 1 – ESTACIONES DEL AÑO

Los resultados que se obtienen tras las simulaciones realizadas en la herramienta computacional para el caso 1, se muestran a continuación:

En la siguiente tabla, se muestra la cantidad de equipos que conforman la micro red híbrida de energía para el invierno y para el verano:

Tabla 2. Configuración óptima del sistema híbrido para el invierno y verano según la herramienta computacional

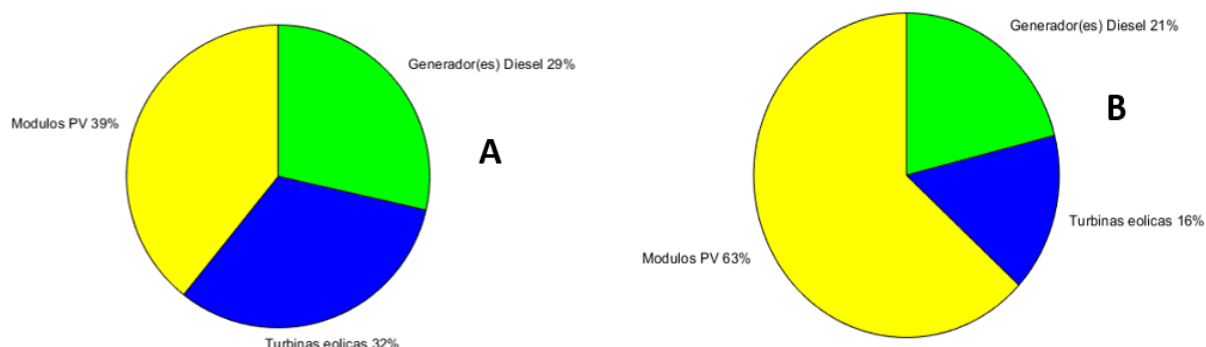
COMPONENTES	CANTIDAD DE EQUIPOS	
	Invierno	Verano
S. fotovoltaico	57	64
S. eólico	3	1
Baterías	5	12
G. diésel	1	1

Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla 2, el sistema híbrido de energía tanto para el invierno como para el verano, funciona con módulos fotovoltaicos, turbinas eólicas y generadores diésel, maximizando el aprovechamiento de las fuentes renovables en estas épocas del año, y reduciendo el uso de tecnologías convencionales, debido al impacto ambiental que suponen el empleo de éstas. El resultado de la optimización en esta ubicación muestra que el sistema híbrido de energía se puede aplicar para este emplazamiento con un alto valor para el factor renovable.

En la figura 14 se observa el porcentaje de energía fotovoltaica, eólica y diésel generada en el sistema híbrido durante el (A) invierno y el (B) verano en este emplazamiento.

Figura 14. Contribución energética en el sistema híbrido para (A) Invierno y (B) Verano



Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura 14, se puede concluir que la producción de energía a partir de módulos fotovoltaicos es significativa aun en la época de invierno. Aunque en el verano se dispone de más horas de sol y por lo tanto se obtiene más energía de una instalación fotovoltaica, en los meses de menos irradiancia como en el invierno aún se consigue una notable cantidad de energía eléctrica a partir de esta tecnología.

En la tabla 3 se desglosa la producción eléctrica por cada uno de los sistemas en el invierno y en el verano, se observa que la producción primaria se obtiene mediante la generación diésel, en segundo lugar, se logra mediante el arreglo fotovoltaico y en tercer lugar mediante la turbina eólica.

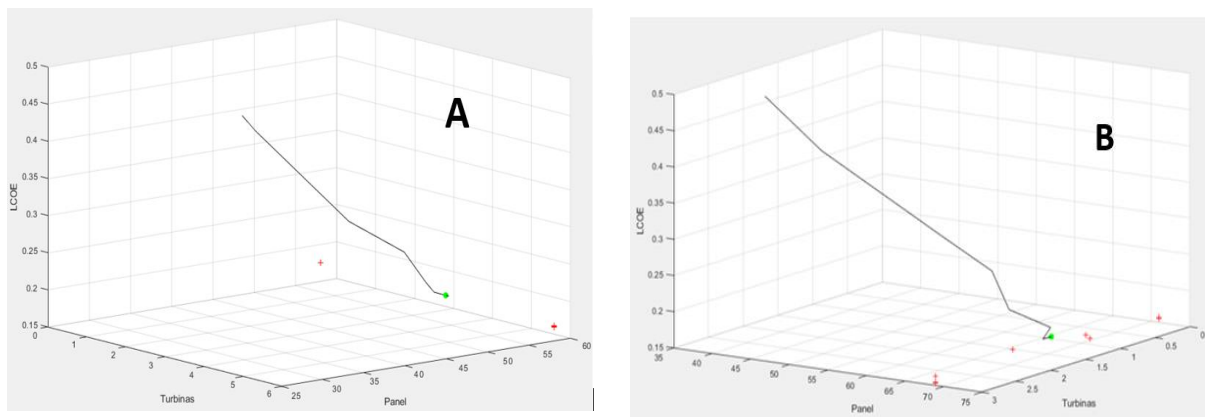
Tabla 3. Producción total mensual de energía según la herramienta computacional para invierno y verano

COMPONENTES	Producción	
	Invierno	Verano
S. fotovoltaico	324 kWh/mes	364.8 kWh/mes
S. eólico	270 kWh/mes	90 kWh/mes
G. diésel	240 kWh/mes	120 kWh/mes
TOTAL	834 kWh/mes	574.8 kWh/mes

Fuente: Elaboración propia.

La figura 15, muestra el trayecto que realiza el algoritmo genético, a medida que se realizan las iteraciones, para lograr encontrar la configuración que tenga el LCOE más bajo y que a su vez cumpla con los requerimientos energéticos, y se observa que se detiene cuando encuentra el punto más óptimo en ambos casos.

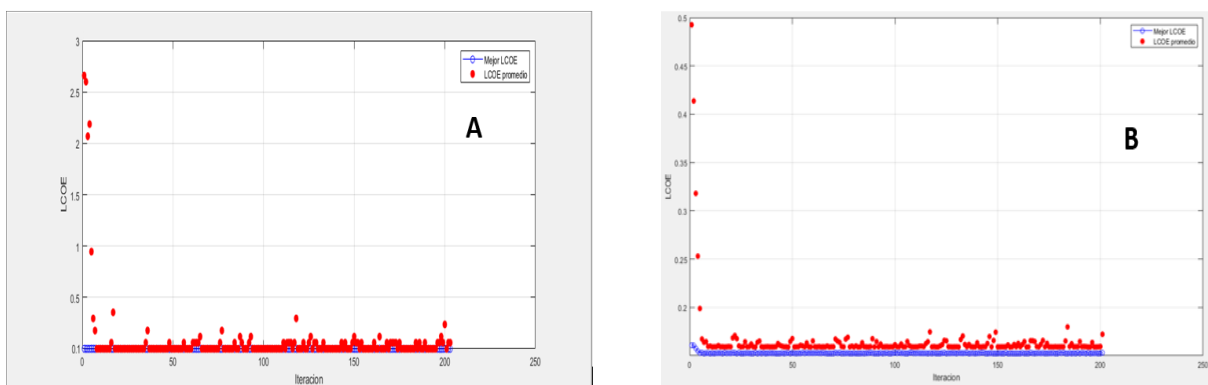
Figura 15. Configuración del sistema y el LCOE para (A) Invierno y (B) Verano



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 16 se muestra la evolución de la función objetivo (LCOE) del problema de optimización, así como la media de la población de individuos para ambos casos de estudio. El algoritmo genético converge rápidamente para el valor final, en ambos casos a partir de la iteración 6 - 8 la función objetivo no presenta variación, y el valor medio de la población coincide con el mejor individuo.

Figura 16. Evolución de la población de individuos del algoritmo genético (A) Invierno y (B) Verano

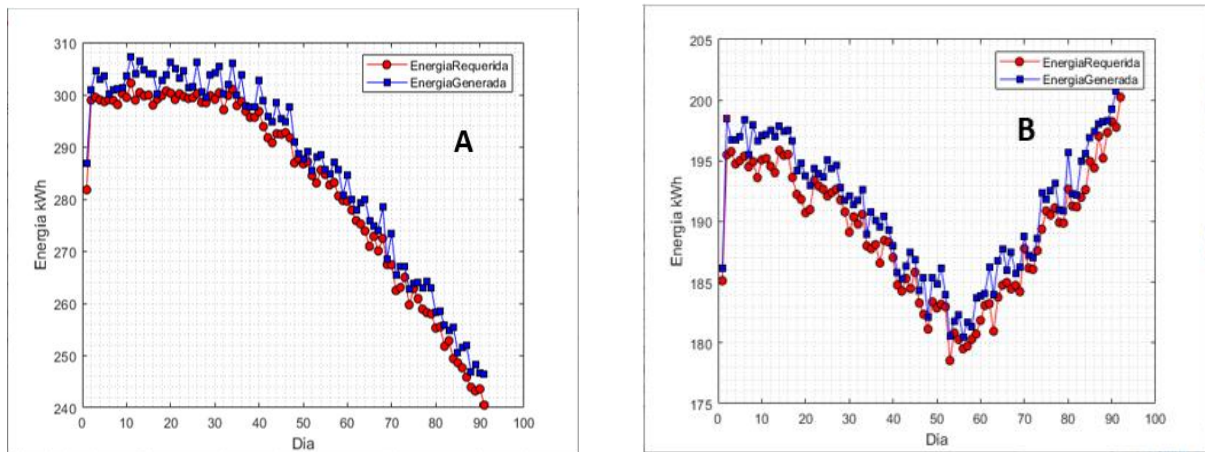


Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la herramienta logra demostrar la efectividad del modelo de optimización porque se minimiza el LCOE en función del número de iteraciones.

En la siguiente figura se puede observar la energía que se genera a partir de la configuración que la herramienta selecciona y comparando esta energía generada con la energía que se requiere en los dos escenarios de estudio.

Figura 17. Energía generada por la configuración seleccionada vs Energía Requerida para (A) Invierno y (B) Verano



Fuente: Elaboración propia.

A partir de la figura 17, se puede concluir que en ambos casos la configuración seleccionada por la herramienta, es capaz de cumplir con la demanda de energía en cualquier intervalo de tiempo, aprovechando el máximo potencial energético que puede obtener a través de los recursos renovables disponibles, todo esto con el fin de lograr un costo nivelado de la energía bajo, que para el caso del invierno es de 0,186 \$/kWh, y para el verano es de 0,172 \$/kWh.

7.2. VALIDACIÓN DE EFECTIVIDAD: CASO VALENCIA

Se realizó la simulación con un año de datos hora a hora de carga, irradiancia, velocidad de viento y temperatura. A continuación, en la tabla 4, se muestra el resultado de la configuración óptima para la micro-red en el caso Valencia:

Tabla 4. Configuración óptima del sistema híbrido para caso Valencia

ELEMENTO	CANTIDAD	CAPACIDAD INSTALADA
Sistema fotovoltaico	71 módulos FV	13.49 kW
Sistema eólico	2 turbinas eólicas	6 kW
Baterías	1 baterías	250 AH – 12 V
Generador diésel	1 generador diésel	8 kW

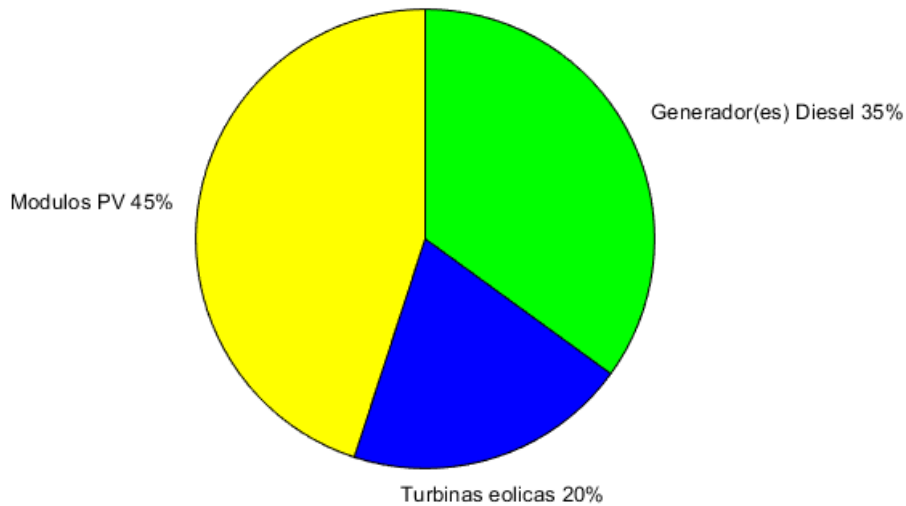
Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior, muestra que la configuración óptima para este emplazamiento está conformada en su mayoría por módulos fotovoltaicos y turbinas eólicas, esto debido a los buenos valores de irradiancia y velocidad de viento que se presentan en este

lugar. También se puede concluir que el programa aprovecha todo el recurso solar disponible debido a que esta tecnología, es más barata en comparación a las otras tecnologías trabajadas en este proyecto.

El porcentaje de contribución de energía fotovoltaica, energía eólica y diésel durante el año se muestra en la figura 18.

Figura 18. Contribución energética de la configuración óptima en el caso Valencia según la herramienta

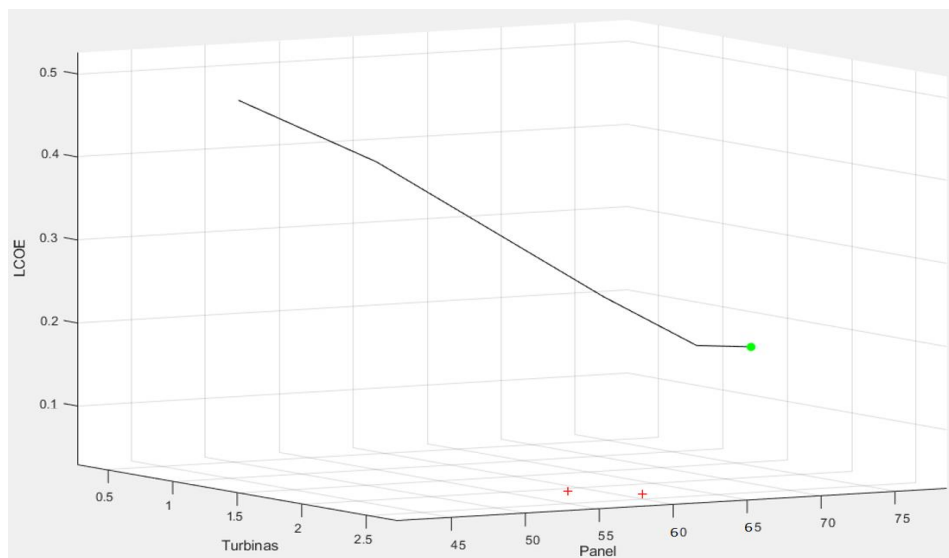


Fuente: Elaboración propia.

De la figura 18, se concluye que en la configuración del sistema híbrido, las energías renovables tienen una participación significativa en la generación energía según la herramienta desarrollada, no obstante, la generación por diésel juega un papel importante a la hora de satisfacer la demanda, lo que quiere decir que a pesar de que las condiciones climáticas son favorables en ciertas épocas del año, no logran cubrir completamente la carga de energía requerida en este emplazamiento.

La figura 19 muestra los resultados de la simulación y se analiza la relación entre el LCOE y la configuración del sistema.

Figura 19. Configuración del sistema y el LCOE para caso Valencia

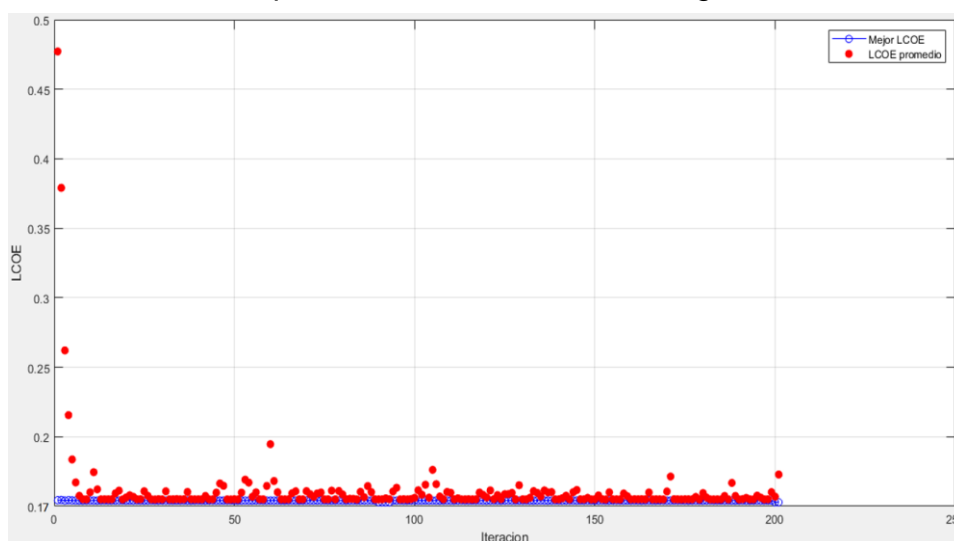


Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior, se observa el recorrido que realiza el LCOE para encontrar la configuración que cumpla con el criterio de evaluación del sistema. Claramente, se puede ver el punto donde identifica el valor mínimo de LCOE, lo que significa que es allí donde se encuentra la mejor configuración para la demanda de energía del lugar de estudio. Esta configuración se considera la óptima porque cumple con el criterio de evaluación del sistema, el valor de LCOE más bajo.

La figura 20 muestra la progresión del LCOE en el problema de optimización, así como el mejor LCOE de la población de individuos para el caso Valencia. Se observa que el valor promedio de la población coincide con el mejor LCOE, que para este caso según la herramienta es de 0,174 \$/kWh.

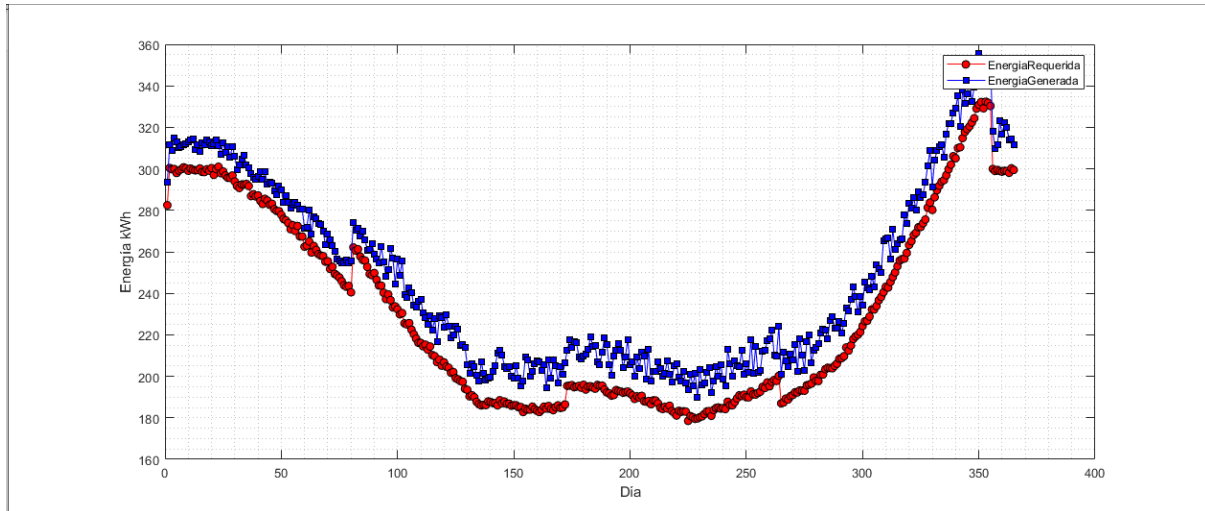
Figura 20. Evolución de la población de individuos del Algoritmo Genético



Fuente: Elaboración propia.

Una comparativa entre la energía requerida por el emplazamiento y la energía generada por la configuración seleccionada por la herramienta diseñada se encuentra en la figura 21.

Figura 21. Energía generada por la configuración seleccionada vs Energía Requerida para caso Valencia



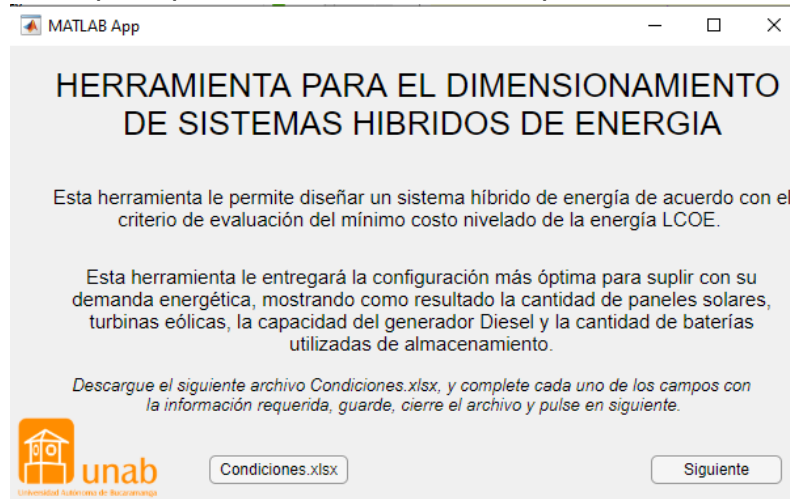
Fuente: Elaboración propia.

Según la figura anterior, la configuración que el programa selecciona como la más óptima para este caso, demuestra que es capaz de suplir la demanda de energía en cualquier momento del año en este emplazamiento.

7.3. INTERFAZ DE LA HERRAMIENTA

Finalmente, se aplicaron todas las funciones anteriores en una interfaz gráfica (GUI), de manera que sea más práctico con el usuario final. Para poder operar la herramienta se deben seguir las siguientes instrucciones: Instalar el archivo *MyAppInstaller_web*, que se encuentra comprimido en la carpeta *Instalador Herramienta de Dimensionamiento de Sistemas*. Luego de finalizada la instalación, se ejecuta la herramienta y aparecerá la ventana principal, tal como se muestra en la figura 22. En esta, se realiza una breve explicación de que es y para que utiliza la herramienta computacional.

Figura 22. Ventana principal de la herramienta computacional



Fuente: Elaboración propia.

Después, así como se menciona en la ventana principal, se debe descargar el archivo *Condiciones.xlsx*, que se encuentra en drive donde se debe llenar la tabla, ingresando los datos de demanda, irradiancia, velocidad de viento y temperatura del emplazamiento donde se realizará el dimensionamiento. En la figura 23, se puede observar la tabla del archivo *Condiciones.xlsx*, con cada una de los campos requeridos.

Figura 23. Tabla del archivo Condiciones.xlsx

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
1																					
2		CONDICIONES AMBIENTALES																			
3	P. requerida (kW)	Irradiancia (W/m2)	V. del viento (m/s)	T. Ambiente (°C)																	
4	0	0	0	0	1																
5	0	0	0	0	2																
6	0	0	0	0	3																
7	0	0	0	0	4																
8	0	0	0	0	5																
9	0	0	0	0	6																
10	0	0	0	0	7																
11	0	0	0	0	8																
12	0	0	0	0	9																
13	0	0	0	0	10																
14	0	0	0	0	11																
15	0	0	0	0	12																
16	0	0	0	0	13																
17	0	0	0	0	14																
18	0	0	0	0	15																
19	0	0	0	0	16																
20	0	0	0	0	17																
21	0	0	0	0	18																
22	0	0	0	0	19																
23	0	0	0	0	20																
24	0	0	0	0	21																
25	0	0	0	0	22																

Fuente: Elaboración propia.

Luego debe ingresar los datos hora a hora, guardar los cambios y cerrar el archivo, seguido se dirige a la ventana principal, se pulsa el botón siguiente y aparecerá la ventana del panel de la herramienta computacional.

En la siguiente figura se muestra la interfaz donde el usuario en primer lugar debe presionar el botón cargar y a continuación debe ingresar las características de los equipos, modulo fotovoltaico, turbina eólica, baterías y la capacidad del generador diésel, de igual forma debe ingresar datos necesarios para calcular el costo nivelado

de energía LCOE, para cada una de las tecnologías implementadas en esta herramienta computacional.

Una vez el usuario ingresa todos los datos de entrada a la herramienta, presiona el botón ejecutar para que el programa realice el proceso de dimensionamiento óptimo de la microrred híbrida de energía para el emplazamiento ingresado.

Figura 24. Ventana del panel de la herramienta computacional

Fuente: Elaboración propia.

Y finalmente, después de terminado el proceso de iteración, la herramienta presentará la configuración de la microrred lo cual es: cantidad de paneles solares, turbinas eólicas, generadores Diésel y la cantidad de baterías utilizadas para el sistema de almacenamiento. En la figura 25, se puede observar la ventana sobre la cual se muestran los resultados del dimensionamiento.

Figura 25. Ventana de resultados de la herramienta computacional

Modulos PV	Turbinas eolicas	Baterias	Generador (es) Diesel
156	2	21	1

LCOE [\$/kWh]
0.165

Fuente: Elaboración propia.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES

En este trabajo se pudo determinar una metodología apropiada para el dimensionamiento óptimo de una microrred, esto, mediante su implementación en el software de simulación Matlab®. De este modo, se seleccionó la técnica de optimización metaheurística Algoritmo Genético para dar solución al problema de dimensionamiento óptimo de sistemas híbridos de generación de energía. A su vez, se seleccionó el criterio económico de costo nivelado de la energía – LCOE, para evaluar el coste de la configuración entregada por la herramienta desarrollada. Basado en lo anterior, se diseñó una interfaz de usuario en el software de simulación Matlab® que dimensiona una microrred, de manera eficaz.

Se evidenció que la herramienta computacional permite determinar y cuantificar cada uno de los componentes requeridos para sistemas híbridos de generación de energía autónomos a partir del uso de recursos renovables (solar y eólico) como principal fuente, cumpliendo con el criterio establecido de mínimo LCOE.

Basándose en los resultados del programa de optimización presentado anteriormente, en este trabajo se analizan distintos casos con diferentes valores de carga, irradiancia, velocidad de viento y temperatura. El más económico se presentó en el caso del verano, en el que el sistema híbrido está formado por 64 módulos fotovoltaicos, 1 aerogenerador, un sistema de almacenamiento de 12 baterías y un generador diésel como fuente de reserva; el LCOE para este caso es de 0,172 \$/kWh, esto ocurre con una contribución fotovoltaica del 63%.

Según los demás casos estudiados, se puede concluir que el aumento del LCOE se debe al incremento del uso del generador diésel, causado por la demanda de energía y los bajos recursos renovables disponibles en estos emplazamientos. En el caso del invierno, según los resultados obtenidos muestran que el aporte energético del recurso eólico está por encima del 30%.

El método propuesto también se aplicó al diseño de un sistema híbrido solar-eólico-diésel con almacenamiento en baterías destinado a suministrar energía a un grupo de 8 viviendas en la ciudad de Valencia en España. El algoritmo genético se basó en la utilización de los conjuntos de datos de irradiación solar horaria, la velocidad del viento y la temperatura ambiente registrados en este emplazamiento para el año 2020, las necesidades de potencia de la carga durante el año y las especificaciones de los dispositivos del sistema.

Con los datos medidos durante un año del caso estudiado, se investigó la contribución energética mensual de cada componente (módulo fotovoltaico, turbinas eólicas y generador diésel) y el balance energético. Las contribuciones energéticas de los

módulos fotovoltaicos y los aerogeneradores varían mucho de un mes a otro, pero se observa una buena complementariedad entre la energía solar y la energía eólica. Además, el uso de datos a largo plazo de los recursos renovables es muy útil para mejorar el rendimiento de la solución óptima.

Los algoritmos han dado buenos resultados en cuanto al dimensionamiento, y la solución óptima es un sistema híbrido solar-eólico-diésel. Aunque una solución únicamente solar o eólica no puede llegar a satisfacer en su totalidad la demanda energética del sitio, y más debido a los bajos valores de la fuente eólica. Por lo tanto, el aprovechamiento del recurso solar en la ciudad de Valencia para estas 8 viviendas puede considerarse la mejor solución para aumentar el acceso a la energía.

Finalmente, se pudo validar que la herramienta desarrollada junto con su interfaz gráfica funciona de forma correcta ante todos los casos de estudio. Con el diseño correcto de la herramienta, se cumple satisfactoriamente los objetivos de este proyecto.

8.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda que se priorice la producción de energía a partir de fuentes renovables, ya que su costo de producción es más bajo en comparación con el costo de producir un kW con un generador diésel.

Para futuros trabajos se recomienda añadir más criterios de evaluación para aumentar la confiabilidad de los resultados.

De igual forma sería interesante la implementación de diferentes métodos de optimización, con el fin de reducir la posibilidad de caer en un mínimo local.

9. REFERENCIAS

- [1] J. A. A. Valencia, «Factibilidad de la implementación de paneles solares fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica en las cabeceras municipales de las zonas no interconectadas de Colombia,» Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2018.
- [2] M. Giraldo, R. Vacca Ramírez y A. Urrego Quintanilla, «Las energías alternativas ¿una oportunidad para Colombia?,» Politécnico Colombiano, 2018.
- [3] J. L. Agustín, «Aplicación de algoritmos genéticos al diseño óptimo de sistemas de distribución de energía eléctrica,» Zaragoza, 1988.
- [4] Siddaiah, R., & Saini, R. P. (2016). A review on planning, configurations, modeling and optimization techniques of hybrid renewable energy systems for off grid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 376–396.
- [5] D. Ciatera Díaz, “Modelo de Optimización Multiobjetivo para Evaluación de Eficiencia en una Empresa de Servicios Eléctricos,” *Dep. Ing. Ind.*, vol. Ingeniería, p. 91, 2015.
- [6] N. P. & Akpan and I. A. Iwok, “Application of Linear Programming for Optimal Use of Raw Materials in Bakery,” *Int. J. Math. Stat. Invent.* www.ijmsi.org, vol. 4, no. 8, pp. 51–57, 2016.
- [7] S. Ashok, “Optimised model for community-based hybrid energy system,” *Renew. Energy*, vol. 32, no. 7, pp. 1155–1164, 2007.
- [8] T. K. Das, D. Chakraborty, and S. Seth, “Energy consumption and prospects for renewable energy technologies in an Indian village,” *Energy*, vol. 15, no. 5, pp. 445–449, 1990.
- [9] L. A. Gen, “ALGORITMOS GE ETICOS 1 Introducción,” pp. 1–34, 1859.
- [10] S. Sengupta, S. Basak, and R. Peters, “Particle Swarm Optimization: A Survey of Historical and Recent Developments with Hybridization Perspectives,” *Mach. Learn. Knowl. Extr.*, vol. 1, no. 1, pp. 157–191, 2018.
- [11] Dorigo, M., Birattari, M., & Stutzle, T. (2006). Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1(4), 28–39.

- [12] Zong Woo Geem, Joong Hoon Kim, & Loganathan, G. V. (2001). A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. *SIMULATION*, 76(2), 60–68.
- [13] P. El, "Un Algoritmo Metaheurístico De Recocido Simulado Para El 3Ap-Axial," *Saber*, vol. 28, no. 3, pp. 566–573, 2016.
- [14] Katsigiannis, Y. A., Georgilakis, P. S., & Karapidakis, E. S. (2012). Hybrid Simulated Annealing–Tabu Search Method for Optimal Sizing of Autonomous Power Systems With Renewables. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3(3), 330–338.
- [15] Lujano-Rojas, J. M., Dufo-López, R., & Bernal-Agustín, J. L. (2013). Probabilistic modelling and analysis of stand-alone hybrid power systems. *Energy*, 63, 19–27.
- [16] Guo, Q., Yu, H., & Xu, A. (2006). A hybrid PSO-GD based intelligent method for machine diagnosis. *Digital Signal Processing*, 16(4), 402–418.
- [17] GOLDBERG and D. E., "Genetic Algorithms in Search," *Optim. Mach.*, 1989.
- [18] Mitchell, Melanie (1996). *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [19] Whitley, D. (1994). *A genetic algorithm tutorial*. *Statistics and Computing*, 4(2).
- [20] "XI. Crossover and Mutation". <http://www.obitko.com/>: Marek Obitko. Retrieved 2011-04-07.
- [21] Rowland J. O. Ekeocha, 2019. "Optimization of Systems," *International Journal of Sciences*, Office ijSciences, vol. 8(03), pages 118-125, March.
- [22] Valencia, P. E. (1997, August). Optimización mediante algoritmos genéticos. In *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* (Vol. 109, No. 2, pp. 83-92).
- [23] Bhandari, B., Lee, K.-T., Lee, G.-Y., Cho, Y.-M., & Ahn, S.-H. (2015). *Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review*. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2(1), 99–112.
- [24] García, E. R. S., González, R. L. P. E. F., & Morales, J. M. F. Análisis del costo nivelado de energía para diversas fuentes renovables al año 2030 y 2050. Un parámetro clave en la toma de decisión de proyectos de inversión. *Serie ponencias*, 19.

- [25] Kaabeche, A., Belhamel, M., & Ibtouen, R. (2011). *Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system*. *Energy*, 36(2), 1214–1222.
- [26] Energetika - Curva I-V de un panel fotovoltaico. (2018). Energiteka. <http://www.energetika.com.ar/Curva%20I-V.html>
- [27] T. Markvart, *Solar Electricity*. WILEY, 2000.
- [28] M. A. Habib, S. A. M. Said, M. A. El-Hadidy, and I. Al-Zaharna, “Optimization procedure of a hybrid photovoltaic wind energy system,” *Energy*, vol. 24, no. 11, pp. 919–929, 1999.
- [29] Notton. G, Cristofari. C, Mattei. M. and Poggi. P. (2005). Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences, *Appl. Therm.Eng*, 25, 2854–2877.
- [30] S. Diaf, G. Notton, M. Belhamel, M. Haddadi, and A. Louche, “Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions,” *Appl. Energy*, vol. 85, no. 10, pp. 968–987, 2008.
- [31] E.-L. J, *Manual de energía eólica*. 2011.
- [32] A. Ilinca, E. McCarthy, J. L. Chaumel, and J. L. Réiveau, “Wind potential assessment of Quebec Province,” *Renew. Energy*, vol. 28, no. 12, pp. 1881–1897, 2003.
- [33] B. Ai, H. Yang, H. Shen, and X. Liao, “Computer-aided design of PV/wind hybrid system,” *Renew. Energy*, vol. 28, no. 10, pp. 1491–1512, 2003.
- [34] S. H. El-Hefnawi, “Photovoltaic diésel-generator hybrid power system sizing,” *Renew. Energy*, vol. 13, no. 1, pp. 33–40, 1998.
- [35] Giangrandi V., L. (2011). “Aspectos técnico económicos para evaluación de proyectos de cogeneración en base a grupos generadores diésel”. Universidad Católica De Chile.
- [36] M. K. Deshmukh and S. S. Deshmukh, “Modeling of hybrid renewable energy systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 1, pp. 235–249, 2008.
- [37] A. Kaabeche, M. Belhamel, and R. Ibtouen, “Techno-economic valuation and optimization of integrated photovoltaic/wind energy conversion system,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 10, pp. 2407–2420, 2011.

- [38] LAZARD. (2020). Levelized Cost of Energy and Levelized Cost of Storage – 2020. <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-and-levelized-cost-of-storage-2020/>
- [39] Predescu, M. (2016). Economic evaluation of small wind turbines and hybrid systems for residential use. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 1, 33.
- [40] ARE's Technology Working Group. (2020, junio). Rural Electrification with Renewable Energy. Alliance for Rural Electrification.