

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE SOFTWARE PARA EL
DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS CON
CARGAS DC USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

**JOSÉ GUILLERMO CARRASCAL HERRERA
HÉCTOR MANUEL GARCÍA GUERRERO**



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

2017

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE SOFTWARE PARA EL
DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS CON
CARGAS DC USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

**JOSÉ GUILLERMO CARRASCAL HERRERA
HÉCTOR MANUEL GARCÍA GUERRERO**

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Directora:

**MÓNICA ANDREA BOTERO LONDOÑO
PhD en Ciencias Físicas**

Co- directores:

**FRANKLIN ALEXANDER SEPÚLVEDA SEPÚLVEDA
PhD en Ingeniería**

**MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS.
PhD en Ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones**

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

2017

AGRADECIMIENTOS

A DIOS que me regalo la vida y de él mana la sabiduría.

A mis padres que con mucho esfuerzo me brindaron su apoyo, amor, confianza y aliento.

A toda mi familia que me apoyaron en este proceso.

A Laura y a su familia por toda la confianza y apoyo que me brindaron.

A Todos los docentes que me inculcaron el deseo de la investigación.

José Guillermo Carrascal Herrera

A Dios que me regalo la fuerza para continuar a pesar de todos los contratiempos y lograr escribir estas últimas líneas de lo que en algún momento intente que fuera el comienzo.

Héctor Miguel García. Luz Mila Guerrero R. Mis padres, mis guías que me han aconsejado y apoyado, los que me han enseñado e inculcado que la familia es como la maquinaria de un reloj en donde todos debemos cuidarnos para que funcione.

Anderson mi hermano la persona con la que siempre contare en la vida.

Mis tíos, abuelos, primos que me apoyaron en este proceso.

Melisa Pineda, Erika Tatiana, Alejandro Balaguer mis amigos los cuales estuvieron en la lucha diaria y constante, además de ser los primeros en compartir pequeños triunfos en la universidad.

PORQUE TODO FINAL ES EL INICIO DE UN NUEVO COMIENZO.

Héctor Manuel García Guerrero

No tengas miedo, que yo estoy contigo; no te desanimes, que yo soy tu Dios. Yo soy quien te da fuerzas, y siempre te ayudaré; siempre te sostendré con mi justiciera mano derecha.

Isaías 41:10

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	17
1.1 OBJETIVOS GENERALES	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. MÉTODO DE SOLUCIÓN PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA AISLADA	18
2.1 ENERGÍA SOLAR	18
2.2 ENERGÍA MÁXIMA DIARIA	19
2.3 DATOS CLIMATOLÓGICOS	21
2.4 COMPONENTES DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO.	22
2.4.1 Paneles Fotovoltaicos.	22
2.4.1.1 Características Eléctricas	23
2.4.1.2 Energía del Panel Solar	24
2.4.1.3 Corriente del grupo fotovoltaico.	25
2.4.1.4 Tensión de cada rama.	25
2.4.1.5 Número de paneles totales.	25
2.4.1.6 Número total de paneles en serie	25
2.4.1.7 Número total de paneles en paralelo.	26
2.4.2 Baterías	26

2.4.2.1 Ciclo de la batería	26
2.4.2.2 Capacidad	27
2.4.2.3 Profundidad de descarga	27
2.4.2.4 Descarga profunda	27
2.4.2.5 Descarga superficial	27
2.4.2.6 Energía de las baterías	27
2.4.2.7 Número total de baterías en paralelo	28
2.4.2.8 Número total de baterías en serie	28
2.4.3 Regulador	29
2.4.3.1 Número de reguladores	29
2.4.3.2 Regulador serie	29
2.4.3.3 Regulador paralelo	30
2.4.3.4 Corriente del regulador	31
2.4.4 Inversor	32
2.4.4.1 Dimensionamiento del inversor	32
2.5 ESTRATEGIA DE OPTIMIZACIÓN	33
2.6 ALGORITMOS GENÉTICOS	33
2.6.1 Parámetros del Algoritmo Genético	34
2.6.2 Descripción del algoritmo	35
2.6.3 Numero de ciclos	41
3. ELEMENTOS UTILIZADOS EN EL DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA E INTERFAZ GRAFICA	43
3.1 SECCIÓN 1. CONSUMO DIARIO Y PARÁMETROS TÉCNICOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.	47

3.2 SECCIÓN 2. ENERGÍA SOLAR	48
3.3 SECCIÓN 3. EJECUCIÓN DE LA HERRAMIENTA Y CUADRO DE RESULTADO.	49
3.4 SECCIÓN 4. PARÁMETROS DEL ALGORITMO GENÉTICO.	50
3.5 SECCIÓN 5. PARÁMETROS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.	52
3.6 VENTAJAS DE LA INTERFAZ	53
4. RESULTADOS	54
4.1 REQUISITOS DEL EMPLAZAMIENTO	54
4.2 DEMANDA DIARIA	55
4.3 EVALUACIÓN DE RECURSO SOLAR	57
4.4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS	58
4.5 RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN LA HERRAMIENTA SOLAR AG.	59
4.6 COMPARACIÓN CON EL SOFTWARE HOGA	64
5. CONCLUSIONES	67
6. TRABAJOS FUTUROS	68
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	69
BIBLIOGRAFÍA	74
ANEXOS	78

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Configuración de un sistema solar fotovoltaico aislado.	22
Figura 2. Configuración serie- paralelo del banco de baterías.	29
Figura 3. Regulador serie.	30
Figura 4. Regulador paralelo.	31
Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo.	42
Figura 6. Interfaz Gráfica de SOLAR AG.	46
Figura 7. Parámetros de consumo y características técnicas del sistema.	48
Figura 8. Parámetros de Irradiación, links de información y grafica de Irradiación.	49
Figura 9. Ventanas de resultado y botón de ejecución “Dimensionamiento”.	50
Figura 10. Parámetros de algoritmo genético.	51
Figura 11. Parámetros de elementos de entrada.	52
Figura 12. Vista superior del emplazamiento.	55
Figura 13. Interfaz de SOLAR AG con los datos de la simulacion.	60
Figura 14. Consumo en DC.	61
Figura 15. Consumo en AC.	61
Figura 16. Grafica de irradiación mensual.	62
Figura 17. Grafica de comportamiento de minimización del algoritmo genético.	63
Figura 18. Comparación de precios SOLAR AG vs HOGA.	66

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tabla de promedio anual de Radiación Solar en Colombia.	19
Tabla 2. Límites máximos y mínimos para cada elemento del sistema.	37
Tabla 3. Perfil de carga para el día crítico.	55
Tabla 4. Distribución de carga horaria para el día crítico.	56
Tabla 5. Datos de irradiación de la NASA.	57
Tabla 6. Tipos de paneles solares, baterías, reguladores e inversores.	58
Tabla 7. Tabla comparativa de entre SOLAR AG y HOGA.	64
Tabla 8. Comparación de precios para diferentes escenarios.	65

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: Tablas de componentes de sistemas fotovoltaicos autónomos.	78
ANEXO B. Ejemplo de cálculo exacto de dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo	83
ANEXO C. Entorno del software e informe HOGA.	88
ANEXO D. Dimensionamiento y selección de conductores y ductos	90

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE SOFTWARE PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS CON CARGAS DC USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS*

AUTOR: Carrascal Herrera, José Guillermo, García Guerrero, Héctor Manuel**

PALABRAS CLAVE: Sistema Fotovoltaico Autónomo, Algoritmo Genético, Panel Solar, Inversor, Regulador, Batería.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo de grado se realiza el diseño de una herramienta de software llamada “SOLAR AG”, escrita en un lenguaje de alto nivel de versión libre como lo es Python y utilizando librerías e intérpretes que facilitan la ejecución de esta. Su nombre es derivado de la luz solar como fuente de energía y del Algoritmo Genético el cual es el encargado de dimensionar y valorar los equipos necesarios en el sistema fotovoltaico autónomo, hasta obtener resultados que probablemente sean los que más se ajustan a la solución esperada según el costo y las especificaciones técnicas.

“SOLAR AG” es una herramienta práctica y para este fin, presenta una interfaz gráfica en donde se visualiza con nombres las secciones y sus módulos en donde se van a ingresar los parámetros requeridos para ejecutarla. Dichas secciones contienen módulos los cuales pueden ser modificados según sean las necesidades del sistema fotovoltaico que se desee y también es una ventaja implícita ya que se permite al usuario convertirse en el diseñador de su sistema fotovoltaico al tener las opciones de ingresar las especificaciones.

En cuanto a la programación, “SOLAR AG” se caracteriza generalmente por ser una programación estructural y funcional, por que objetivamente se logra que la herramienta sea productiva en cuanto al tiempo de depuración del programa y permite llamar a funciones dentro de otras funciones.

De este modo “SOLAR AG” es presentado como una herramienta interactiva obteniendo soluciones reales, funcionales y rápidas.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ing. Mónica Andrea Botero L. Codirectores: Ing. Franklin Sepúlveda, Ing. María Alejandra Mantilla Villalobos.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF A SOFTWARE TOOL FOR THE SIZE OF AUTONOMOUS PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH DC LOADS USING GENETIC ALGORITHMS.¹

AUTHOR: Carrascal Herrera, José Guillermo García Guerrero, Héctor Manuel²

KEYWORDS: Autonomous Photovoltaic System, Genetic Algorithm, solar panel, inverter, regulator, battery.

DESCRIPTION:

In this degree project it is designed a software tool called “SOLAR AG” written in a high-level language of free version as is Python and also using libraries and interpreters that facilitate the execution of this one. Its name came from sunlight as the energy source and the Genetic Algorithm that is responsible for dimensioning and assessing the necessary equipment in the autonomous photovoltaic system in order to obtain results that are probably the ones that best fit with the expected solution according to cost and technical specifications.

“SOLAR AG” is a practical tool and presents a graphical interface where the sections and their modules names are displayed and the required parameters are established to execute it. These sections contain modules that can be modified according to the needs of the photovoltaic system, this is also an advantage due to the fact that the user is allowed to become the designer of their photovoltaic systems by having the option of entering the specifications.

As for programming “SOLAR AG” is generally characterized as a structural and functional programming due to the productive tool in terms of time of debugging of the program and allows to call functions within other functions.

In this way “SOLAR AG” is presented as an interactive tool that obtains real and functional solutions.

¹ Research Work.

² Faculty of Physical – Mechanical Engineering. Electric, Electronic and Telecommunications School. Directed : Ing. Mónica Andrea Botero L. Co-directed: Ing. Franklin Sepúlveda, Ing. Maria Alejandra Mantilla V.

INTRODUCCIÓN

El 2016 fue un año notable para la energía renovable ya que contó con las mayores instalaciones de capacidad instalada hasta la fecha, sin embargo, los desafíos persisten. En este año se vieron cambios que influyeron en el avance de la energía renovable tales como el drástico descenso del precio del combustible fósil y el aumento de la temperatura por causa del calentamiento global [1] .

Actualmente, las energías renovables se han establecido en todo el mundo como una importante fuente de energía. Su crecimiento es impulsado por diversos factores incluyendo el aumento de la rentabilidad de las tecnologías renovables, la iniciativa de políticas aplicadas, el deterioro del medio ambiente por causa de los combustibles fósiles y la seguridad energética [1].

Dentro de los recursos renovables se destacan los recursos fotovoltaicos utilizados para reducir el consumo de combustibles fósiles durante la generación de energía eléctrica. La integración de este tipo de recursos energéticos mejora la confiabilidad y la eficiencia del sistema. Por tanto, es importante estudiar y analizar las diferentes metodologías que involucran los sistemas fotovoltaicos [2].

Una de las metodologías consiste en el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos con fines de optimización de costos. Sin embargo, las características no lineales de los sistemas fotovoltaicos y el elevado número de parámetros que involucran este tipo de sistemas, hacen que en la tarea de diseño óptimo sea necesario el estudio de herramientas metaheurísticas.

En este proyecto se diseñó una herramienta de software que utiliza una metodología metaheurística, Algoritmos Genéticos, la cual se emplea para el

dimensionamiento, cálculo y optimización del costo de un sistema fotovoltaico autónomo. Se asume que se pueden utilizar varios elementos constitutivos del sistema fotovoltaico de diferentes fabricantes.

Como anexo a este proyecto se le agrego la etapa inversora para la utilización de cargas AC, para obtener un mayor alcance, ya que inicialmente solo se contemplaban cargas DC. En este caso se consideraron sistemas fotovoltaicos no interconectados a la red eléctrica o aislada.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVOS GENERALES

Desarrollar una herramienta de software que permita seleccionar adecuadamente los componentes de un sistema fotovoltaico autónomo con cargas DC, empleando algoritmos genéticos y teniendo criterios de minimización de costos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Realizar una base de datos que contenga los componentes de un sistema fotovoltaico autónomo con cargas DC con costos y disponibilidad en el mercado colombiano.
- Seleccionar un método que permita determinar la función de costo y las restricciones dentro del modelo de optimización.
- Desarrollar un método basado en algoritmos genéticos que permita determinar la configuración y los componentes del sistema fotovoltaico autónomo con cargas DC y que además minimice el costo de la implementación.
- Realizar un análisis comparativo del desempeño de la herramienta respecto a un software de dimensionamiento disponible.

2. MÉTODO DE SOLUCIÓN PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA AISLADA

En este capítulo se hace una revisión de la fundamentación teórica necesaria para el desarrollo de la herramienta. También se describen las expresiones matemáticas elegidas para dimensionar el sistema fotovoltaico, es decir, los paneles solares, baterías, reguladores e inversores, que se emplean en el método de optimización para la solución del diseño.

2.1 ENERGÍA SOLAR

El sol es una fuente de energía inagotable, su flujo radiante es de $3,8 \times 10^{26}$ W equivalente a una densidad de $62,5 \text{ MW/m}^2$ de superficie solar. La radiación solar sobre una superficie de la Tierra orientada normalmente a la dirección de los rayos solares conocida como constante solar es de $1,37 \text{ kW/m}^2$ variando de forma aleatoria debido a diversos efectos que provoca sobre ella la atmósfera terrestre [3].

El potencial solar en Colombia se ha evaluado para varias regiones del país (ver Tabla 1), empleando principalmente información de estaciones meteorológicas del IDEAM (Instituto de Estudios Ambientales). Adicionalmente, se han publicado varios estudios que completaron la información sobre radiación solar en el país [4], [5]. El más reciente el “Atlas de Radiación Solar en Colombia” [6].

Tabla 1. Tabla de promedio anual de Radiación Solar en Colombia.

Región del País	Irradiación Solar (kWh/m ² /d)
Guajira	5.0 – 5.5
Costa Atlántica	4.5 – 5.0
Orinoquía – Amazonía	3.0 – 3.5
Andina	4.0 – 4.5
Costa Pacífica	3.0 – 3.5

Fuente: IDEAM Atlas [en línea] disponible en: ideam.gov.co

2.2 ENERGÍA MÁXIMA DIARIA

Uno de los principales componentes que hacen parte del estudio de un sistema fotovoltaico autónomo es la energía demandada. Para esto se debe conocer la potencia de cada equipo y las horas de funcionamiento. Se define la energía total consumida por la demanda de acuerdo a la ecuación 1.1 [7], [8]:

$$E_{diaria} = \sum_{k=1}^c h_k * P_{nek} [Wh] \quad (1.1)$$

Donde:

E_{diaria} : Energía total consumida ya sea en DC o en AC.

c : Número total de cargas

h_k : Número de horas de funcionamiento de la k-ésima carga

P_{nek} : Potencia nominal de la k-ésima carga.

Se define la energía de la instalación como la energía vista en los bornes del regulador de acuerdo a la ecuación 1.2 [7] :

$$E_{ins} = E_{diaria_DC} + \frac{E_{diaria_AC}}{n_{inv}} [Wh] \quad (1.2)$$

En donde:

E_{ist} : Energía de la instalación.

E_{diaria_DC} : Energía total consumida en DC.

E_{diaria_AC} : Energía total consumida en AC.

n_{inv} : Eficiencia del inversor.

Para calcular el consumo máximo diario que va consumir la instalación, se tienen en cuenta las posibles pérdidas del sistema. Para ello se calculan las pérdidas totales de acuerdo a la ecuación 1.3 [8]:

$$Pr_t = [1 - (Pr_b + Pr_c + Pr_r + Pr_j)] \cdot [1 - \frac{(Pr_a \cdot D_{aut})}{P_d}] \quad (1.3)$$

Donde:

Pr_t : Pérdidas totales del sistema.

Pr_b : Pérdidas debido al rendimiento de la batería, por lo general tiene un valor de 5 %.

Pr_c : Pérdidas debido al rendimiento del convertidor si lo hay, las pérdidas oscilan entre el 20% y el 5%.

Pr_r : Pérdidas debido al rendimiento del regulador, las pérdidas varían dependiendo a la tecnología; se suele utilizar 10%.

Pr_j : Pérdidas no contempladas (por efecto joule, caídas de tensión, etc.); se escoge un valor por defecto de 10%.

D_{aut} : Días de autonomía con baja o nula insolación.

P_d : Profundidad de descarga; por defecto se escoge un valor de 60 %.

Por lo tanto, se define la energía máxima diaria como el cociente entre la energía de la instalación sobre las pérdidas totales por un factor de seguridad del 20 % [8].

$$E_{max} = \frac{1,2 * E_{inst}}{Pr_t} [Wh] \quad (1.4)$$

Se puede expresar por unidad de tensión en DC:

$$E_{max} = \frac{1,2 * E_{inst}}{Pr_t * V_{DC}} [Ah] \quad (1.5)$$

2.3 DATOS CLIMATOLÓGICOS

Para calcular la energía que suministra un panel solar, es necesario conocer el recurso solar en este caso la irradiación que es el flujo que incide sobre la unidad de superficie y tiene unidades de W/m^2 .

Se puede definir las horas solar pico (*HSP*) como las horas solares de irradiación diarias. Para obtener el valor de HPS se debe dividir el valor de irradiación (*R*) medidas en $Wh/m^2/d$ entre el valor de irradiancia incidente (*I*) tal como se muestra en la ecuación 1.6 [8]:

$$HPS = \frac{R}{I} \quad (1.6)$$

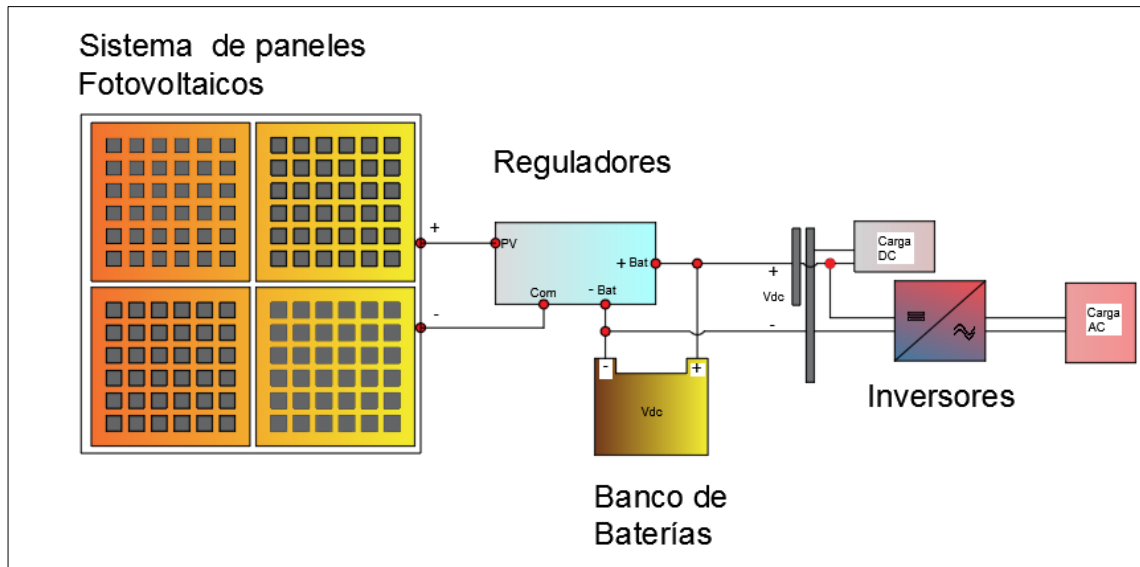
El valor de la irradiancia incidente en condiciones estándar es de mil watts sobre metro cuadrado ($1000 \frac{W}{m^2}$).

Los datos de irradiación (*R*) dependen del lugar. Los datos de irradiación se pueden obtener de bases de datos como por ejemplo las del IDEAM o la base de datos de la NASA [6], [9].

2.4 COMPONENTES DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO.

En la figura 1 se muestra la configuración general del sistema solar fotovoltaico, posteriormente se definirán cada uno de los componentes del sistema.

Figura 1. Configuración de un sistema solar fotovoltaico aislado.



2.4.1 Paneles Fotovoltaicos. La transformación de la radiación solar en energía eléctrica se realiza mediante un dispositivo denominado celda fotovoltaica. El proceso que realiza esta transformación se denomina efecto fotoeléctrico y se produce cuando la radiación solar incide sobre la unión de materiales semiconductores.

Las celdas fotovoltaicas comerciales están fabricadas fundamentalmente a base de Silicio. Este material es modificado químicamente para dar lugar a dos estructuras eléctricamente distintas entre sí, Silicio tipo *p* y Silicio tipo *n*. Una vez estos elementos se ponen en contacto y se exponen a la radiación solar, provocan que los fotones que transportan la energía solar al incidir sobre el dispositivo generen una corriente eléctrica. Convirtiendo así la celda fotovoltaica en una

fuentes generadoras de energía eléctrica. Además la corriente eléctrica generada es proporcional a la irradiancia incidente (ya que al aumentar la irradiancia aumenta el número de fotones) [10].

2.4.1.1 Características Eléctricas Para los cálculos y modelos matemáticos se deben tener en cuenta los siguientes parámetros [10]:

Corriente de cortocircuito: denominado como I_{sc} , es la máxima intensidad que se puede obtener en un panel fotovoltaico. Se calcula midiendo la corriente entre los bornes del panel cuando se provoca un cortocircuito (tensión de salida de cero voltios).

Corriente máxima: denominada como I_m , corresponde con el valor de corriente para la potencia máxima. En algunos casos se indica como I_{mp} .

Tensión en circuito abierto: denominado como V_{oc} , es el valor máximo de tensión que se mediría en un panel si no hubiese paso de corriente entre los bornes del mismo (intensidad de cero amperios).

Tensión nominal: denominado como V_n , es el valor de diseño al que trabaja el panel fotovoltaico. Por ejemplo: 12, 24 o 48 voltios.

Tensión máxima: denominada como V_m , corresponde con el valor de tensión para la potencia máxima. Se toma aproximadamente del 80% de la tensión en circuito abierto. En algunos casos se indica como V_{mp} (de potencia máxima).

Potencia máxima: denominada como P_m , es el valor máximo de potencia que se obtiene entre el producto de la corriente de máxima potencia por la tensión de máxima potencia del panel fotovoltaico. También se denomina potencia pico del

panel; este último término es el más utilizado para los cálculos de una instalación conectada a la red.

2.4.1.2 Energía del Panel Solar Para su dimensionamiento se debe contar con la energía por unidad de tensión en DC (E_{panel}) que este es capaz de generar por día como se expresa en la ecuación 1.7 [8], [11].

$$E_{panel} = I_{panel} * HPS * \eta_{panel} \left[\frac{Ah}{día} \right] \quad (1.7)$$

En donde:

I_{panel} : Corresponde a la corriente máxima o corriente pico.

HPS : Corresponde a las horas de sol pico.

η_{panel} : Corresponde al factor global de funcionamiento.

El factor global de funcionamiento incluye las pérdidas por temperatura, pérdidas por conexionado y dispersión de parámetros, las pérdidas debidas al punto de trabajo del sistema por lo general no coinciden con el punto de máxima potencia [11].

Nota: los fabricantes denotan un factor global de funcionamiento entre 85% y 90%, para efectos de la herramienta de software se tomará el 90%.

Ahora con este hecho se calcula la energía generada por unidad de tensión en DC, por los módulos fotovoltaicos por día mediante la ecuación 1.8 [8] , [12].

$$E_{módulos\ fotovoltaicos} = 0.9 * I_{módulos\ fotovoltaico} * HPS \left[\frac{Ah}{día} \right] \quad (1.8)$$

En donde la corriente de los módulos fotovoltaicos es determinada a través del valor de la corriente pico o corriente máxima, tras el agrupamiento de todos los paneles que forman la instalación como se muestra en la ecuación 1.9.

2.4.1.3 Corriente del grupo fotovoltaico. La corriente del grupo fotovoltaico se calcula multiplicando la corriente de cada rama por el número de ramas en paralelo ($N_{p_{paralelo}}$). Por lo tanto, la corriente está dada por [12]:

$$I_{módulos\ fotovoltaicos} = N_{p_{paralelo}} * I_{panel} \quad (1.9)$$

2.4.1.4 Tensión de cada rama. Se calcula mediante el producto de la tensión de máxima potencia (V_m) de cada módulo fotovoltaico por el número de módulos conectados en serie ($N_{p_{serie}}$) [8]. La tensión en serie de los módulos fotovoltaicos debe cumplir la restricción de ser mayor a la tensión mínima de funcionamiento del regulador ($V_{r_{mín}}$) y menor a la tensión máxima de funcionamiento del regulador ($V_{r_{máx}}$).

$$V_{módulos\ fotovoltaicos} = N_{p_{serie}} * V_m \quad (1.10)$$

2.4.1.5 Número de paneles totales. Se calcula mediante la relación entre la energía máxima y la energía del panel.

$$N_{T_{Panel}} = \frac{E_{max}}{E_{Panel}} \quad (1.11)$$

2.4.1.6 Número total de paneles en serie Se calcula mediante la relación entre la tensión de DC de la carga y la tensión de máxima potencia del panel.

$$N_{p_{serie}} = \frac{V_{DC}}{V_m} \quad (1.12)$$

2.4.1.7 Número total de paneles en paralelo. Se calcula mediante la relación entre el número total de paneles y el número total de paneles en serie.

$$N_{p_{paralelo}} = \frac{V_{T_Panel}}{N_{p_{serie}}} \quad (1.13)$$

2.4.2 Baterías La importancia de este componente dentro del sistema fotovoltaico hace necesario el conocimiento a fondo de las limitaciones intrínsecas del mismo. Sólo así podrá lograrse la correcta instalación y uso del sistema, prolongando su vida útil y grado de fiabilidad.

Generalmente se tienen dos tipos de baterías para las aplicaciones en sistemas fotovoltaicos: Plomo – ácido y Níquel – Cadmio. Cada tipo de batería tiene ventajas y desventajas, por ejemplo, las de Níquel – Cadmio pueden sufrir descargas profundas, permanecer largos periodos de tiempo sin presentar deterioro y además con un menor costo de mantenimiento. Mientras que las de Plomo – ácido son de rápida disponibilidad (tamaño y cantidades), tienen comportamientos moderadamente buenos a bajas y altas temperaturas, y además estas tienen componentes reciclables [13].

2.4.2.1 Ciclo de la batería El ciclo de la batería hace referencia al proceso de carga y descarga. La descarga es el proceso en el que la batería entrega una corriente durante un tiempo definido, a este proceso se le conoce como *régimen de descarga*. La carga es el proceso en el que recibe una corriente durante un tiempo determinado conocido como *régimen de carga*. Una descarga profunda suministra información de la capacidad de la batería y además afecta la vida útil de esta.

Comúnmente la vida útil de una batería finaliza cuando ha alcanzado una pérdida del 20% de su capacidad inicial [11].

2.4.2.2 Capacidad Durante el proceso de descarga, el acumulador o batería transforma la energía potencial química que guarda en su interior en energía eléctrica. Para cargar la batería el proceso se realiza de forma contraria, es decir, se le aplica una corriente eléctrica, y así almacena energía eléctrica en su interior para disponer de ella en otro momento. Cuando la batería se encuentra totalmente cargada, la capacidad es la máxima cantidad de energía eléctrica que puede proporcionar en una descarga completa, a un régimen de descarga y temperatura especificadas. La capacidad de una batería se mide en amperios hora (Ah) relacionado siempre a un determinado tiempo (horas) de descarga. La capacidad nominal es la multiplicación de la intensidad de descarga por la cantidad en horas que ésta actúa. Por ejemplo si la batería tiene 200 Ah C₁₀ (el subíndice 10 significa a 10 horas suministrando energía), por tanto se tienen disponibles 20 amperios durante 10 horas de descarga [14].

2.4.2.3 Profundidad de descarga El régimen de funcionamiento se divide en [11]:

2.4.2.4 Descarga profunda El acumulador está provisto de grandes placas tubulares que pueden soportar grandes descargas hasta llegar a un nivel bajo de carga. Permiten, sin deterioro apreciable, descargas hasta del 80% de su capacidad, teniendo su descarga diaria situada entre el 20-25%.

2.4.2.5 Descarga superficial La batería está compuesta de placas pequeñas que no puede soportar grandes descargas antes de llegar a un bajo nivel de carga. Estas baterías tienen una descarga rutinaria entre el 10 y el 15% y alguna vez alcanzan el 45% en un ciclo más profundo.

2.4.2.6 Energía de las baterías La energía de la batería debe ser capaz de suministrar la energía necesaria a la carga (E_{max}) en los días de autonomía (D_{aut}) sujeto a su profundidad de descarga (P_d). Se define la capacidad de módulo de batería como [8], [15]:

$$E_{baterias} \geq \frac{E_{max} * D_{aut}}{P_d} \quad (1.14)$$

En la figura 2 se ilustra diferentes tipos de configuraciones del banco de baterías dependiendo de criterios como tensión nominal y capacidad. Si se requiere aumentar la tensión se colocan varias baterías en serie y si se quiere aumentar la capacidad se colocan baterías en paralelo.

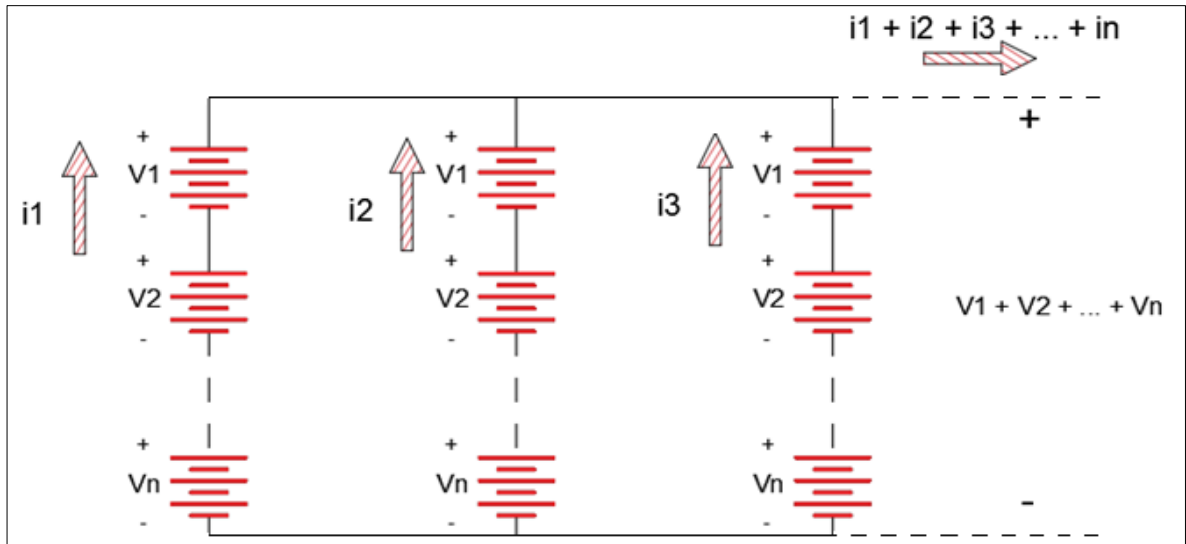
2.4.2.7 Número total de baterías en paralelo Se calcula mediante la relación entre la energía máxima por los días de autonomía entre la profundidad de descarga por la capacidad de la batería.

$$N_{B_{paralelo}} = \frac{E_{max} * D_{aut}}{P_d * C_{bat}} \quad (1.15)$$

2.4.2.8 Número total de baterías en serie Se calcula mediante la relación entre la tensión DC de la carga y la tensión nominal de la batería.

$$N_{B_{serie}} = \frac{V_{DC}}{V_{n_{bateria}}} \quad (1.16)$$

Figura 2. Configuración serie- paralelo del banco de baterías.



2.4.3 Regulador Los sistemas fotovoltaicos autónomos requieren de un sistema de regulación de carga para tener un proceso óptimo del ciclo de la batería, es decir una protección de sobrecargas y sobre descargas. De modo que el regulador controla el estado de la batería, maximizando su vida útil y la energía suministrada por el generador fotovoltaico [8]. Básicamente en caso de sobrecarga, pone el generador fotovoltaico en circuito abierto evitando el paso de corriente del generador hacia la batería.

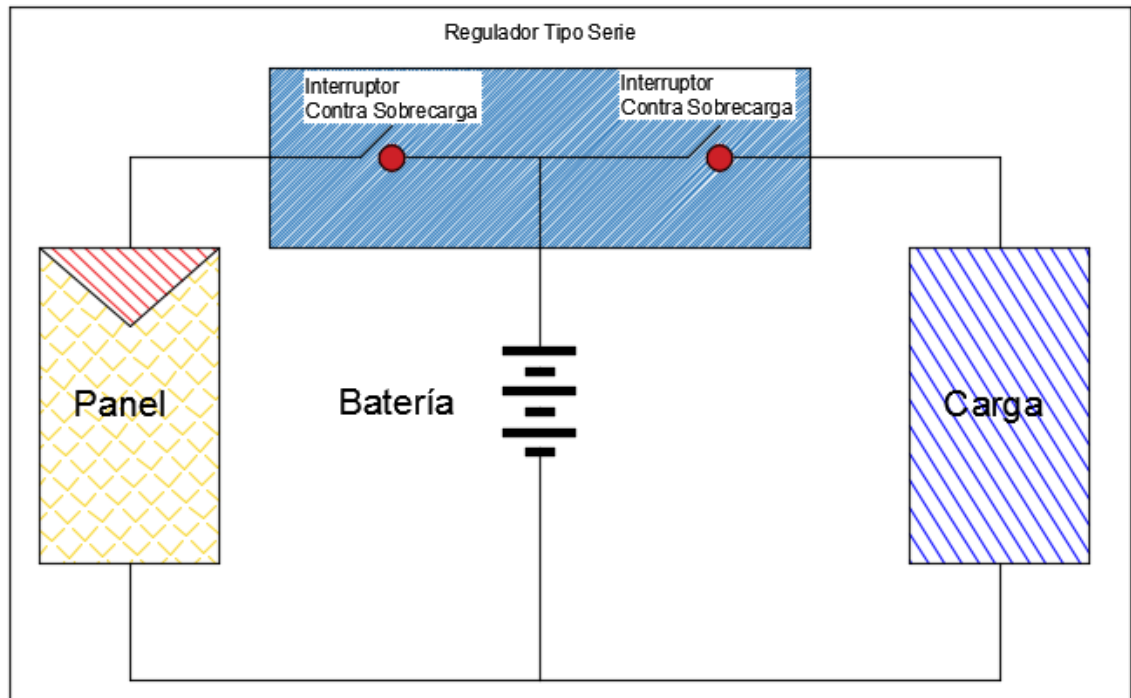
2.4.3.1 Número de reguladores Se calcula mediante la relación del número de paneles en paralelo por la corriente de corto circuito del panel entre la corriente del regulador.

$$N_{reg} = 1,1 * \frac{N_{p\text{paralelo}} * I_{sc}}{I_{regulador}} \quad (1.17)$$

2.4.3.2 Regulador serie La funcionalidad de este es desconectar el panel fotovoltaico del banco de baterías cuando la carga alcanza el máximo nivel de

tensión, esto se realiza mediante interruptores que se instalan entre las baterías y el panel fotovoltaico y entre las baterías y la carga como se observa en la figura 3.

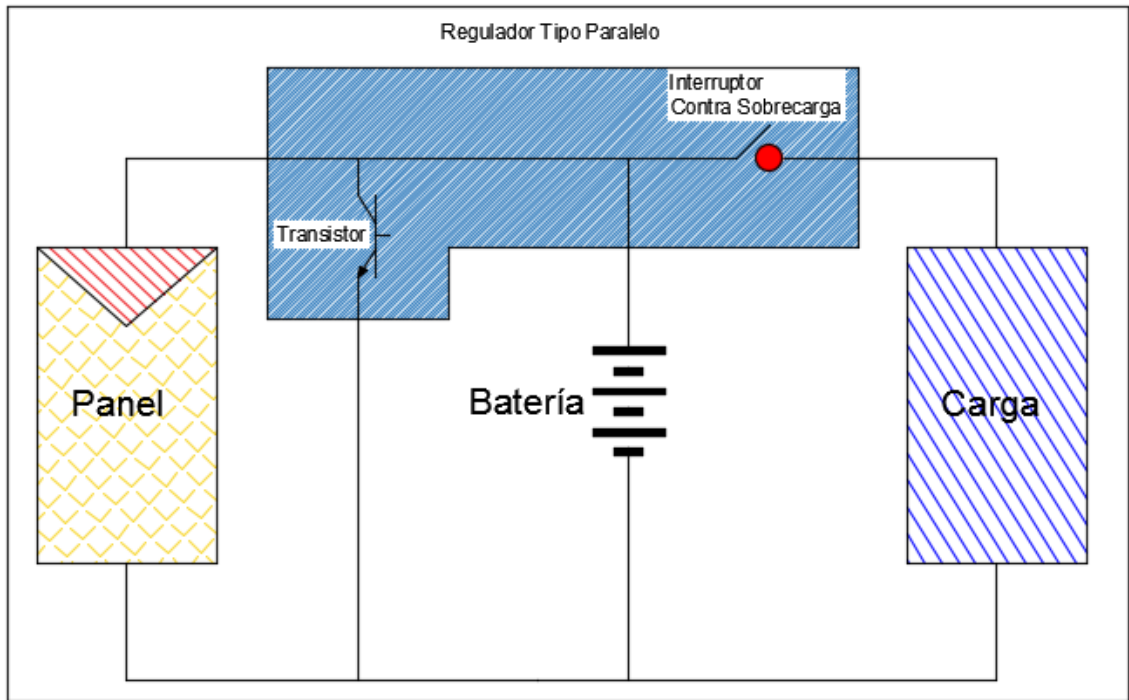
Figura 3. Regulador serie.



2.4.3.3 Regulador paralelo Su función principal es disipar la potencia para suprimir el exceso de energía generada. Su configuración está determinada por un transistor en paralelo con el panel fotovoltaico y la batería como se observa en la figura 4.

La función del transistor queda en función de la tensión de la batería, de modo que este conduce cuando la tensión sea superior a un umbral (V_{sc}) y lo contrario cuando sea inferior.

Figura 4. Regulador paralelo.



2.4.3.4 Corriente del regulador Para determinar el equipo que se va a utilizar se debe saber la intensidad de corriente que podrá soportar el circuito de control de potencia y la tensión de trabajo [16], [17].

Según la expresión:

$$I_{regulador} = 1,1 * I_{sc} * N_{p_{paralelo}} [A] \quad (1.18)$$

Donde:

- ✓ I_{sc} : Corriente de corto circuito del panel solar.
- ✓ $N_{p_{paralelo}}$: Ramas en paralelo de paneles solares.

Además, se multiplica por un margen de seguridad del 10% de tal forma que el regulador no trabaje al límite de la corriente máxima permitida. El margen de

seguridad es primordial y de forma general siempre se elegirá una corriente nominal del regulador mayor que la corriente máxima que va a generar el bloque de paneles solares.

2.4.4 Inversor Transforma la tensión de alimentación DC generada por los paneles fotovoltaicos y la acumulada en las baterías, a la tensión AC de magnitud y frecuencia necesaria. Lo cual resulta necesario para utilizar los equipos eléctricos de corriente alterna.

Un inversor realiza las siguientes funciones [18]:

- Amplificación de la señal de entrada según los niveles de operación de la carga.
- Conversión DC-AC para proporcionar una señal de tensión de salida en AC a la frecuencia y tensión requerida por la carga.

2.4.4.1 Dimensionamiento del inversor Se elegirá de acuerdo a la potencia que deba consumir la carga respecto de la nominal del inversor, es decir, se tomará un inversor cuya potencia de salida sea mayor que la consumida por la carga, además se tendrá en cuenta la tensión a la cual debe trabajar la carga [16], [19] .

Esta relación de potencia esta expresada por:

$$P_{inv} \geq \sum_{k=1}^c P_{nek} [W] \quad (1.19)$$

c : Número total de cargas

P_{nek} : Potencia nominal de la k-ésima carga

Número de inversores

Se calcula mediante la relación de la potencia AC de la carga entre la potencia del inversor.

$$N_{Inv} = \frac{P_{Carga}}{P_{inv}} \quad (1.20)$$

2.5 ESTRATEGIA DE OPTIMIZACIÓN

El tipo de modelamiento que se empleó se basa en un balance de características esenciales como son [20]:

- ✓ Precisión: construir un modelo que describa apropiadamente el problema.
- ✓ Simplicidad: construir un modelo tratable, que se pueda resolver mediante alguna técnica de resolución.
- ✓ Que esté en capacidad de trabajar con funciones de costo no derivables y no convexas.
- ✓ Que esté en capacidad de incluir variables de tipo discreto.

De acuerdo a esto y otros criterios como la resolución de respuestas paralelas se eligió el método de los algoritmos genéticos.

2.6 ALGORITMOS GENÉTICOS

Los Algoritmos Genéticos (AG) son métodos acondicionados para resolver problemas de búsqueda y optimización. Basados en el proceso genético de los organismos vivos a lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza acorde con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes [21]. Para simular este proceso, los Algoritmos Genéticos son

capaces de ir generando soluciones para problemas del mundo real. Los pasos básicos de un algoritmo genético son:

- ✓ Evaluar la puntuación de cada uno de los cromosomas generados.
- ✓ Permitir la reproducción de los cromosomas más aptos para causar una variedad en la población.
- ✓ Mutar el nuevo individuo generado con cierta probabilidad de mutación.
- ✓ Organizar la nueva población.

Estos pasos se repetirán hasta que se dé una condición de terminación. Se puede fijar un número máximo de iteraciones antes de finalizar el algoritmo genético o detenerlo cuando no se produzcan más cambios en la población (convergencia del algoritmo), esta última opción suele ser la más habitual [22].

2.6.1 Parámetros del Algoritmo Genético En el análisis de los algoritmos genéticos existen unos parámetros importantes que son la base del algoritmo. Entre ellos se sugieren [23]:

- ✓ Tamaño de la Población.

Este parámetro indica el número de cromosomas que se tiene en la población para una generación determinada. En caso de que esta medida sea insuficiente, el algoritmo genético tiene pocas posibilidades de realizar reproducciones con lo que se realizaría una búsqueda de soluciones escasa y poco óptima. Por otro lado, si la población es excesiva, el algoritmo genético podrá ser excesivamente lento.

- ✓ Probabilidad de Cruce.

Indica la frecuencia con la que se producen cruces entre los cromosomas padres, es decir, que haya probabilidad de reproducción entre ellos. En caso de que no

exista probabilidad de reproducción, los hijos serán copias exactas de los padres. En caso de haberla, los hijos tendrán partes de los cromosomas de los padres. Si la probabilidad de cruce es del 100% el hijo se crea totalmente por cruce.

✓ Probabilidad de Mutación.

Indica la frecuencia con la que los genes de un cromosoma son mutados. Si no hay mutación, los descendientes son los mismos que había tras la reproducción. En caso de que haya mutaciones, parte del cromosoma descendiente es modificado.

2.6.2 Descripción del algoritmo Basado en las ecuaciones estudiadas en los ítems anteriores y en el método de optimización de los Algoritmos Genéticos se diseñó un algoritmo para el dimensionamiento del sistema. Este algoritmo permite calcular el tipo de panel, el número de paneles en serie/paralelo, tipo de batería, número en serie/paralelo de las baterías, tipo de regulador, número de reguladores, tipo de inversor y número de inversores. A continuación se describen una serie de pasos en donde se detallará el algoritmo.

Paso 1. Generación de la población inicial.

Se llama población inicial al conjunto conformado por un número de individuos iniciales. Los individuos iniciales o cromosomas están conformados por unas características llamadas genes [24], en este caso un individuo estará representado como una solución o configuración posible del sistema fotovoltaico:

$$\mathit{individuo} = [g_1, g_2, g_3, \dots, g_n] \quad (1.21)$$

Donde $g_1, g_2, g_3, \dots, g_n$ son los genes o parámetros del sistema.

Para el planteamiento del algoritmo, cada individuo representa una configuración del sistema autónomo fotovoltaico, y los genes representan los tipos de los componentes. Siendo así, cada individuo estará representado por las siguientes variables:

$$\mathbf{individuo} = [T_{panel}, T_{batería}, T_{regulador}, T_{inversor}] \quad (1.22)$$

Donde:

T_{panel} : Tipo de panel solar.

$T_{batería}$: Tipo de batería.

$T_{regulador}$: Tipo de regulador.

$T_{inversor}$: Tipo de inversor.

Se crean al azar un número de individuos iniciales o configuraciones iniciales que conformarán la población inicial como se observan en la ecuación 1.16.

$$\mathbf{poblacion\ inicial} = [\mathbf{individuo}_1, \mathbf{individuo}_2, \dots, \mathbf{individuo}_n] \quad (1.23)$$

Por tanto, los genes de los individuos iniciales se generan aleatoriamente provocando una variedad de configuraciones diferentes donde cada parámetro de cada configuración está acotado por unos límites mínimos y máximos que varían dependiendo de los parámetros de entrada. Estos límites dependen del número de diferentes tipos de elementos. Por ejemplo en la tabla 2 se resumen los límites mínimos y máximos para el ejemplo propuesto.

Tabla 2. Límites máximos y mínimos para cada elemento del sistema.

Límites				
Parámetros	Mínimos	Máximos	Máximos en binario	Bits
T_{panel}	1	7	111	3
$T_{baterias}$	1	7	111	3
$T_{regulador}$	1	7	111	3
$T_{inversor}$	1	7	111	3

Paso 2. Proceso de Codificación.

Para iniciar el proceso de codificación se cambia cada individuo a números binarios, por ejemplo, si se tiene un individuo 1:

$$individio_1 = [1, 5, 5, 7]$$

Teniendo en cuenta que se reserva una longitud de bits dependiendo del límite máximo para cada gen. Entonces el individuo en binario sería:

$$individio_1 = [001, 101, 101, 111]$$

De forma compacta el individuo 1 quedaría:

$$individio_1 = [001101101111]$$

Paso 3. Selección de los padres y cruzamiento.

Para seleccionar dos individuos para el proceso de cruce se debe evaluar la probabilidad de selección para cada individuo. Hay varios métodos de selección,

en este caso se utilizó el método de la ruleta y se evaluó el costo de cada individuo utilizando la siguiente función objetivo:

$$c_i = c_{panel} * N_{p_{paralelo}} * N_{p_{serie}} + c_{bateria} * N_{b_{paralelo}} * N_{b_{serie}} + c_{reg} * N_{reg} + c_{inv} * N_{inv}$$

(1.24)

Donde:

c_i : Costo de cada individuo o costo del sistema.

c_{panel} : Costo del tipo de panel solar.

$N_{p_{paralelo}}$: Número de ramas de paneles en paralelo.

$N_{p_{serie}}$: Número de paneles en serie.

$c_{bateria}$: Costo del tipo de batería.

$N_{b_{paralelo}}$: Número de ramas de baterías en paralelo.

$N_{b_{serie}}$: Número de baterías en serie.

c_{reg} : Costo del tipo de regulador.

N_{reg} : Número de reguladores.

c_{inv} : Costo del tipo de inversor.

N_{inv} : Número de inversores.

Para la evaluación de la probabilidad de cada individuo se tiene en cuenta que el individuo más económico tendrá mayor probabilidad de ser seleccionado. Los dos individuos seleccionados al azar entran en el proceso de cruzamiento.

En el proceso de cruzamiento se elige un número al azar entre cero y uno, si este número es menor que la probabilidad de cruzamiento se efectúa el cruzamiento entre los individuos, si no se conservan los dos individuos seleccionados y entran en el proceso de mutación. A continuación, se describe el proceso de cruzamiento:

Si el número aleatorio es menor a la probabilidad de reproducción entonces se elige al azar otro número aleatorio entre uno y el número de máximo de bits de cada individuo. Por ejemplo, si el número aleatorio para saber si hay reproducción es 0.3 y la probabilidad de reproducción es 0.7 entonces se efectúa la reproducción. Después se elige otro número aleatorio, si este número es 5 entonces el cruce se efectúa en el quinto bit:

*individuo*₁ = [001101101111]

*individuo*₂ = [011101011011]

Los dos nuevos individuos que se generan en el proceso de cruce son:

*hijo*₁ = [001101011011]

*hijo*₂ = [011101101111]

Así se generan dos nuevas configuraciones.

Paso 4. Proceso de mutación.

En este proceso se le asigna un número aleatorio entre cero y uno ($0 \leq \text{número aleatorio} < 1$) a cada bit, los números que sean menores a la probabilidad de mutación estos son cambiados de ceros a unos o viceversa. Por ejemplo, para el hijo 1 e hijo 2:

Los bits 1,5 y 7 para el hijo 1 y los bits 2 ,6 y 10 para el hijo 2, estos bits cambian como se muestra a continuación.

*hijo*₁ = [10111111011]mutado

$$hijo_2 = [001100101011]mutado$$

Paso 5. Proceso de reducción.

En este proceso se introducen los dos nuevos individuos hijo1 e hijo 2 en la población inicial, después la población pasa por un filtro donde son seleccionados los individuos que cumplan con las restricciones técnicas. Por último, se eligen el 20% de los individuos más económicos de este filtro y se reemplazan en la población inicial donde son eliminados el 20% de los individuos más costosos. Este proceso se describe a continuación:

Proceso de filtrado:

$$población = [individuo_1, individuo_2, \dots, individuo_n, hijo_1, hijo_2]$$



$$\mathbf{Filtro} : E_{módulos\ fotovoltaicos} \geq E_{max} \text{ y } E_{baterías} \geq E_{max} * \frac{D_{aut}}{pd}$$

$$\text{y } I_{Regulador} > I_{módulos\ fotovoltaicos} \text{ y}$$

$$P_{inv} > P_{carga} \text{ y } V_{r_mín} < N_{P_serie} * V_m < V_{r_máx} \text{ y } N_{B_serie} * V_{n_bateria} = V_{DC} \text{ y}$$

$$V_{in_inversor} = V_{DC} \text{ y } V_{out_inversor} = V_{AC}$$



$$población\ filtrada = \left[\begin{matrix} individuo_1, individuo_3 \\ individuo_n, \dots, hijo_1, \end{matrix} \right] : \text{algunos individuos}$$

El proceso de filtrado consiste en seleccionar los sistemas o individuos que cumplan con las restricciones técnicas y energéticas, como que la energía producida por los paneles ($E_{módulos\ fotovoltaicos}$) y las generadas por el banco de baterías ($E_{baterías}$) sean mayores a la energía demandada. Además que la corriente del regulador ($I_{Regulador}$) soporte la corriente de los módulos

fotovoltaicos ($I_{módulos\ fotovoltaicos}$), que la potencia del inversor (P_{inv}) soporte la potencia de la carga (P_{carga}), que la tensión en serie de los paneles este en el rango entre la tensión mínima y máxima de funcionamiento del regulador , que la tensión de las baterías en serie sea igual a la tensión en DC del sistema (V_{DC}), por último que la tensión de entrada ($V_{in\ inversor}$) y de salida del inversor ($V_{out\ inversor}$) sean iguales a la tensión en DC (V_{DC}) y AC (V_{AC}) del sistema respectivamente.

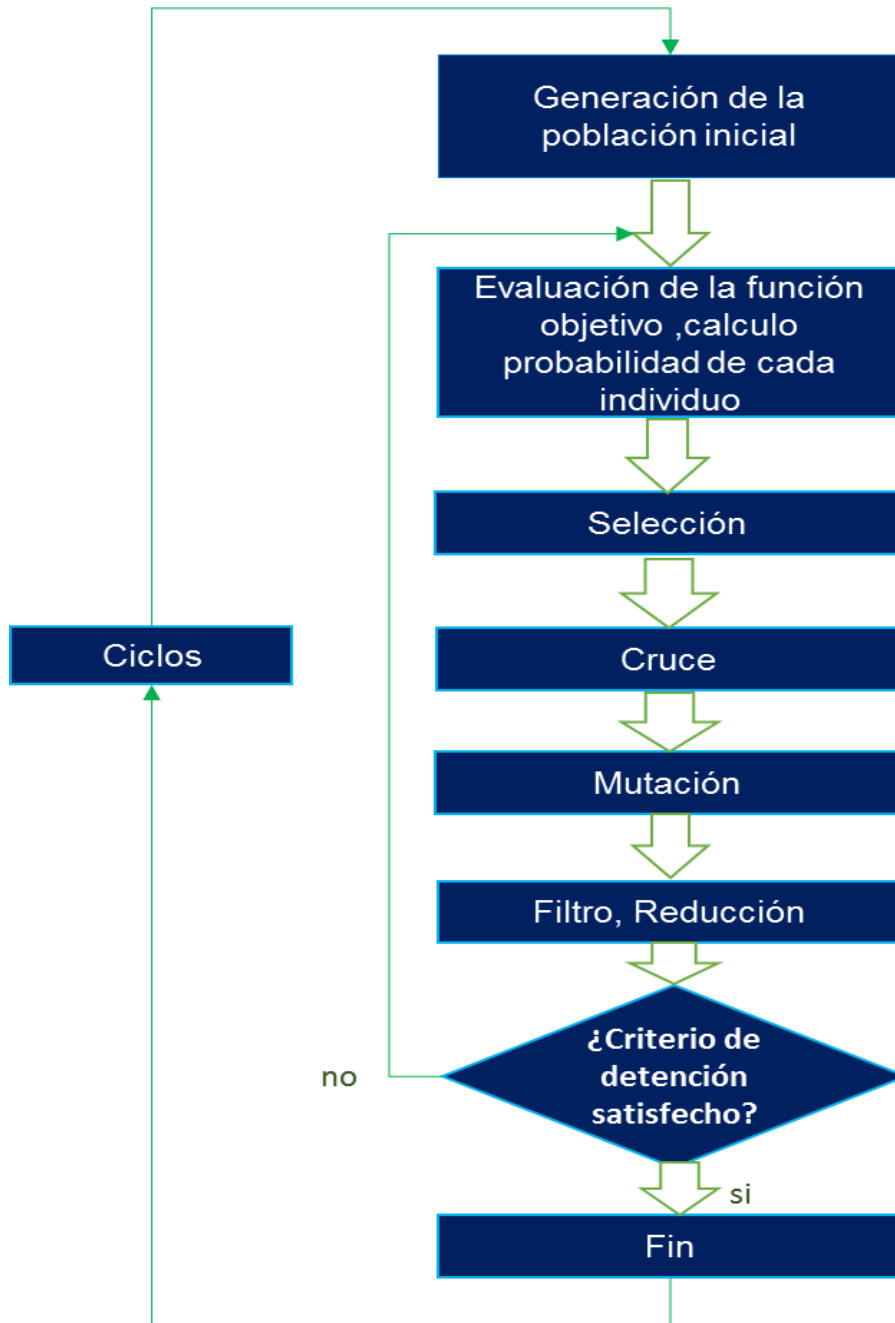
Por último, se selecciona el 20% de los individuos más económicos de la población filtrada y se remplazan en la población inicial eliminando el 20% de los individuos más costosos de la población inicial, creando así una nueva población de igual tamaño. En la figura 5 se resume el algoritmo.

2.6.3 Numero de ciclos Dado que la solución está estrechamente ligada a la población inicial (generada de forma aleatoria), al número de generaciones, a la probabilidad de reproducción y probabilidad de mutación, estas soluciones pueden variar permitiendo una variedad de soluciones viables. Para ello el número de ciclos permite repetir el algoritmo para que se efectúe una comparación de las diferentes soluciones.

El criterio de detención está determinado por el número de generaciones y el número de ciclos, de modo que el algoritmo termina dependiendo de estos dos parámetros.

En la figura 5 se presenta en diagrama de flujo que se emplea en el algoritmo.

Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo.



3. ELEMENTOS UTILIZADOS EN EL DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA E INTERFAZ GRAFICA

La herramienta de software fue desarrollada en PYTHON, un lenguaje de libre distribución que mediante componentes adicionales como TKINTER, IEP y SPYDER logra una mayor interactividad entre el software y el usuario. Además, tiene etiquetas que nombran las ventanas en donde se ingresan los datos, permitiendo que resulte casi intuitivo su funcionamiento. A continuación se resumirán algunas librerías y programas que se utilizaron en el desarrollo de la herramienta de software (SOLAR AG).

PYTHON

Python es un lenguaje de alto nivel como JAVA, C, C++, PERL, RUBY y PHP, etc. Se eligió Python por la velocidad de ejecución, licencia libre y por la sencillez en programación. A continuación, se mencionarán algunas librerías e intérpretes utilizados en el desarrollo de la herramienta.

- ✓ *TKINTER* es un paquete de Python-facto interfaz gráfica de usuario estándar [25].
- ✓ *El webbrowser* es un módulo que proporciona una interfaz de alto nivel para permitir la visualización de documentos basados en la Web para los usuarios [26].
- ✓ *PIL (Imaging Library Python)* este módulo añade capacidades de procesamiento de imágenes para el intérprete de Python. Esta biblioteca es compatible con muchos formatos de archivo, y proporciona potentes capacidades de procesamiento de imágenes y gráficos [27].

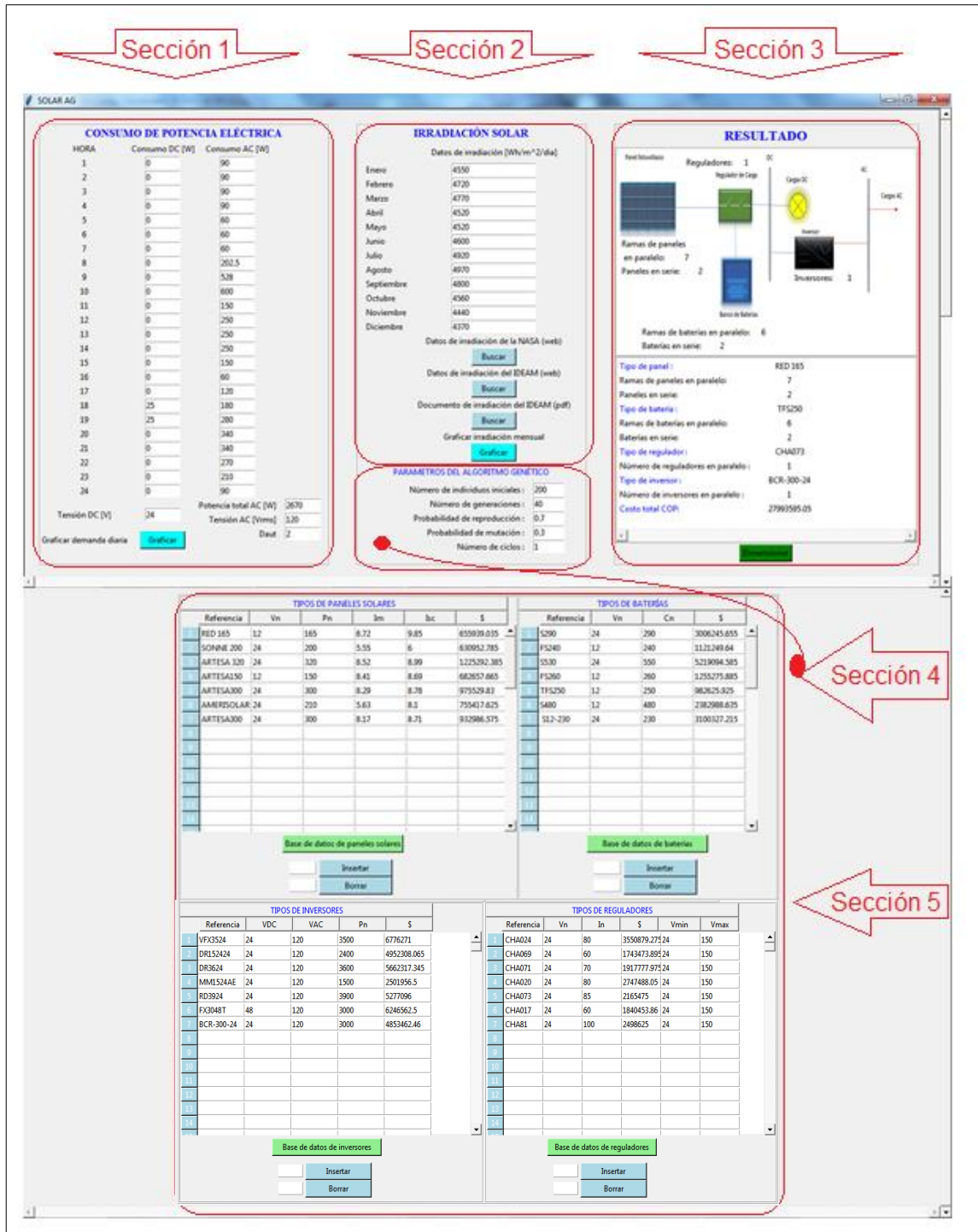
- ✓ *Math* es un módulo que está siempre disponible en Python. Proporciona acceso a las funciones matemáticas definidas por la norma C [28].
- ✓ *Random* es un módulo que implementa generadores de números aleatorios para varias distribuciones [29].
- ✓ *NumPy* es un paquete fundamental para la computación científica con Python. Contiene entre otras cosas una poderosa matriz de dimensiones de objetos, funciones sofisticadas, herramientas para la integración de C / C ++ y Fortran, álgebra lineal, transformada de Fourier, y capacidades de números aleatorios [30].
- ✓ *Matplotlib* es una biblioteca de trazado 2D y 3D de Python que produce figuras de calidad, publicación en una variedad de formatos impresos y entornos interactivos a través de plataformas. Matplotlib se puede utilizar en los scripts de Python, servidores de aplicaciones web, y seis juegos de herramientas de interfaz de usuario gráfica [31].
- ✓ *OS* es un módulo que proporciona una manera portátil de la utilización de la funcionalidad que depende del sistema operativo y que sirve entre otras cosas para abrir archivos [32].
- ✓ *Cx_Freeze* es un conjunto de scripts y módulos para la congelación de los scripts de Python en ejecutables. Cx_Freeze es multiplataforma y funciona en cualquier plataforma de Python. Es compatible con Python 2.7 o superior [33].
- ✓ *SPYDER*
Es un entorno de desarrollo interactivo de Python que proporciona funciones de MATLAB [34].
- ✓ *IEP* (editor interactivo de Python)
Es una multiplataforma IDE de Python, se centró en la interactividad y la introspección, lo que hace que sea muy adecuado para la computación científica. Su diseño práctico está dirigido a la simplicidad y eficiencia [35].

Aparte del lenguaje de programación Python se utilizaron otros programas de libre acceso como es el Bloc de notas, archivos PDF y WinRAR para la digitación de las bases de datos y para el empaquetamiento de todos los archivos.

Manual de usuario

En la siguiente figura se aprecia la interfaz gráfica y se describe a continuación sus diferentes secciones.

Figura 6. Interfaz Gráfica de SOLAR AG.



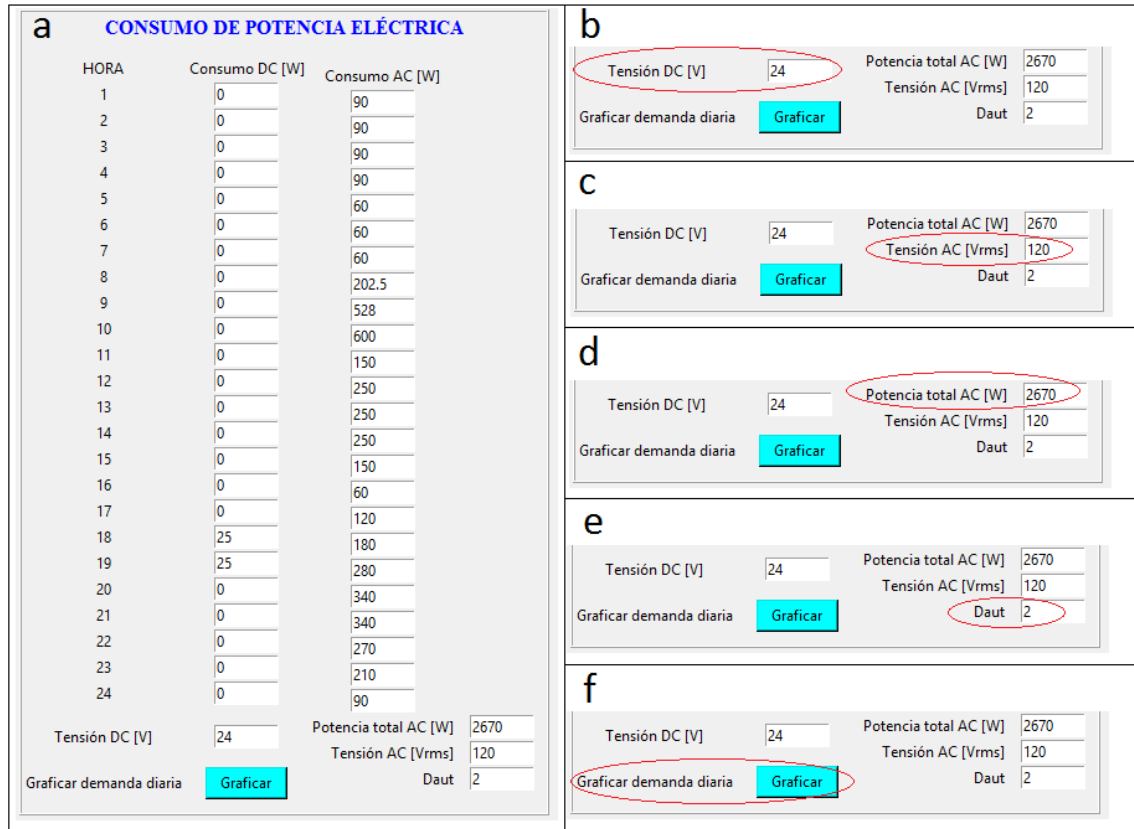
3.1 SECCIÓN 1. CONSUMO DIARIO Y PARÁMETROS TÉCNICOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

En esta sección se deben introducir los datos de consumo de la carga diaria (figura 7.a).

Adicionalmente se incluyen cuatro casillas donde el usuario debe ingresar los datos de tensión DC del sistema (figura 7.b), la tensión de salida AC (figura 7.c), la potencia AC que hace referencia a la potencia nominal de la carga (figura 7.d), es decir a la sumatoria de la potencia nominal de cada uno de los electrodomésticos, y los días de autonomía (Daut) que corresponde al tiempo que se desea que el sistema supla la demanda requerida por la carga (figura 7.e).

Además incluye un botón (figura 7.f) que despliega dos gráficas una concerniente a la demanda DC y otra a la demanda AC.

Figura 7. Parámetros de consumo y características técnicas del sistema.



3.2 SECCIÓN 2. ENERGÍA SOLAR

Contiene los parámetros de la irradiación promedio de cada mes, por defecto contiene los datos que se emplearon en el ejemplo base (figura 8.a), sin embargo, se puede modificar y adicionalmente la herramienta cuenta con botones que le permiten al usuario la recopilación de la información dirigiéndolo al link que determine más conveniente para su estudio; las opciones son: la página web de la NASA (figura 8.b) , del IDEAM (figura 8.c) o se puede presionar el botón de la figura 8.d para abrir el archivo de los datos del IDEAM pdf.

También se dispone de un botón en color cian que grafica la irradiación (Figura 8.e).

Figura 8. Parámetros de Irradiación, links de información y grafica de Irradiación.

a **IRRADIACIÓN SOLAR**

Datos de irradiación [Wh/m²/día]

Enero	4550
Febrero	4720
Marzo	4770
Abril	4520
Mayo	4520
Junio	4600
Julio	4920
Agosto	4970
Septiembre	4800
Octubre	4560
Noviembre	4440
Diciembre	4370

Datos de irradiación de la NASA (web)

Datos de irradiación del IDEAM (web)

Documento de irradiación del IDEAM (pdf)

Graficar irradiación mensual

b Datos de irradiación de la NASA (web)

c Datos de irradiación del IDEAM (web)

d Documento de irradiación del IDEAM (pdf)

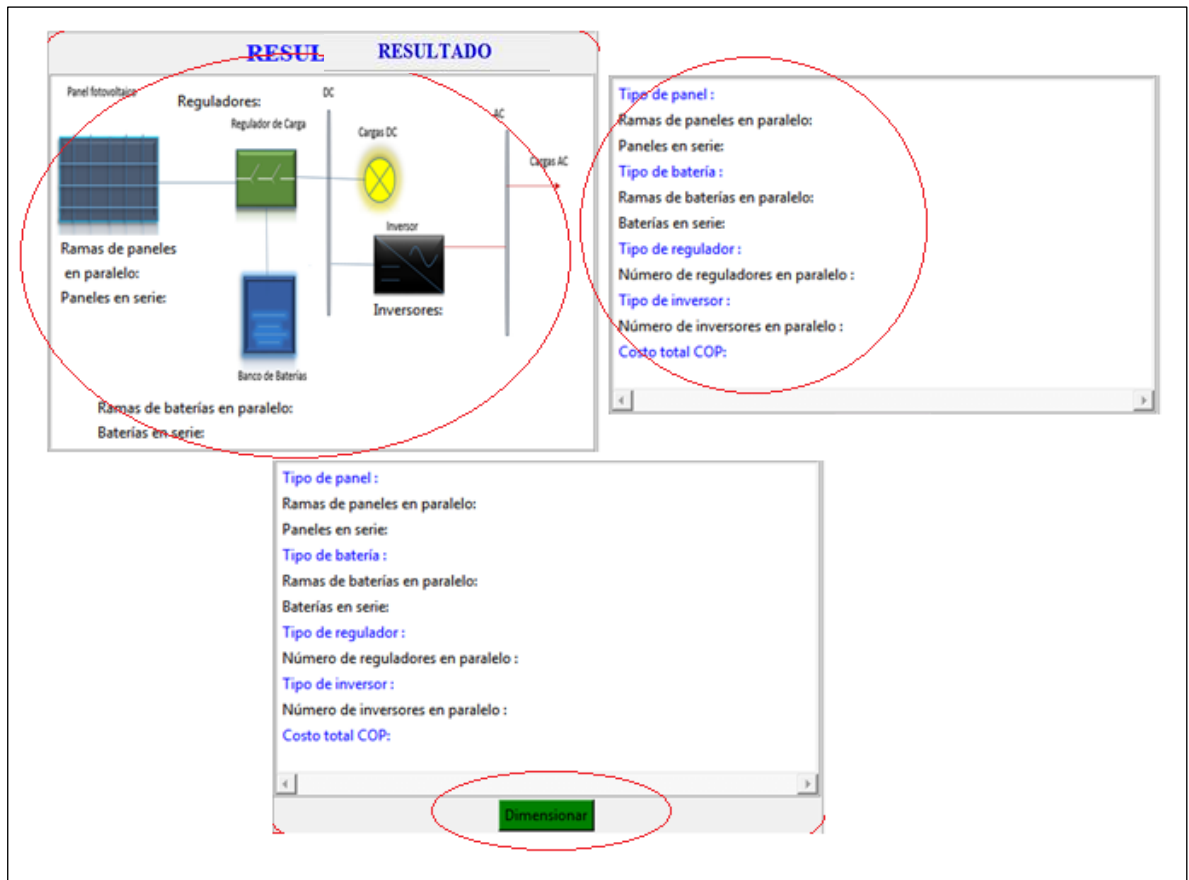
e Graficar irradiación mensual

3.3 SECCIÓN 3. EJECUCIÓN DE LA HERRAMIENTA Y CUADRO DE RESULTADO.

Esta sección dispone de dos ventanas en las cuales se visualizan los resultados. En la ventana superior se visualizan las soluciones, en la parte izquierda (figura 9.a) de forma gráfica y en la ventana superior derecha (figura 9.b) enfrente de las etiquetas nombradas, todas las configuraciones viables para cada ciclo.

En la parte inferior (figura 9.c) se observa un botón de color verde que ejecuta la herramienta, el cual cambia de color verde a rojo mientras está en proceso de encontrar la solución.

Figura 9. Ventanas de resultado y botón de ejecución “Dimensionamiento”.



3.4 SECCIÓN 4. PARÁMETROS DEL ALGORITMO GENÉTICO.

Los valores que se cargan por defecto en los módulos en la herramienta de software desarrollada son: número de individuos iniciales, 200 (figura 10.a); número generaciones, 40 (figura 10.b); probabilidad de reproducción, 0.7 (figura 10.c); y probabilidad de mutación, 0.3 (figura 10.d). También se da la opción de

ingresar el número de ciclos que procesa internamente la herramienta para que genere la mejor opción (figura 10.e).

Con todas estas opciones el usuario puede cambiar las condiciones para hacer un análisis detallado a medida que cambia estos módulos con el fin de obtener un resultado más eficiente. Es decir, el usuario puede hacer que su solución varíe al cambiar estos datos. La herramienta trae unos parámetros por defecto, estos valores se seleccionaron debido al ejemplo realizado en el capítulo 3.

Figura 10. Parámetros de algoritmo genético.

PARAMETROS DEL ALGORITMO GENÉTICO											
a	<table><tr><td>Número de individuos iniciales :</td><td>200</td></tr><tr><td>Número de generaciones :</td><td>40</td></tr><tr><td>Probabilidad de reproducción :</td><td>0.7</td></tr><tr><td>Probabilidad de mutación :</td><td>0.3</td></tr><tr><td>Número de ciclos :</td><td>1</td></tr></table>	Número de individuos iniciales :	200	Número de generaciones :	40	Probabilidad de reproducción :	0.7	Probabilidad de mutación :	0.3	Número de ciclos :	1
Número de individuos iniciales :	200										
Número de generaciones :	40										
Probabilidad de reproducción :	0.7										
Probabilidad de mutación :	0.3										
Número de ciclos :	1										
b	<table><tr><td>Número de individuos iniciales :</td><td>200</td></tr><tr><td>Número de generaciones :</td><td>40</td></tr><tr><td>Probabilidad de reproducción :</td><td>0.7</td></tr><tr><td>Probabilidad de mutación :</td><td>0.3</td></tr><tr><td>Número de ciclos :</td><td>1</td></tr></table>	Número de individuos iniciales :	200	Número de generaciones :	40	Probabilidad de reproducción :	0.7	Probabilidad de mutación :	0.3	Número de ciclos :	1
Número de individuos iniciales :	200										
Número de generaciones :	40										
Probabilidad de reproducción :	0.7										
Probabilidad de mutación :	0.3										
Número de ciclos :	1										
c	<table><tr><td>Número de individuos iniciales :</td><td>200</td></tr><tr><td>Número de generaciones :</td><td>40</td></tr><tr><td>Probabilidad de reproducción :</td><td>0.7</td></tr><tr><td>Probabilidad de mutación :</td><td>0.3</td></tr><tr><td>Número de ciclos :</td><td>1</td></tr></table>	Número de individuos iniciales :	200	Número de generaciones :	40	Probabilidad de reproducción :	0.7	Probabilidad de mutación :	0.3	Número de ciclos :	1
Número de individuos iniciales :	200										
Número de generaciones :	40										
Probabilidad de reproducción :	0.7										
Probabilidad de mutación :	0.3										
Número de ciclos :	1										
d	<table><tr><td>Número de individuos iniciales :</td><td>200</td></tr><tr><td>Número de generaciones :</td><td>40</td></tr><tr><td>Probabilidad de reproducción :</td><td>0.7</td></tr><tr><td>Probabilidad de mutación :</td><td>0.3</td></tr><tr><td>Número de ciclos :</td><td>1</td></tr></table>	Número de individuos iniciales :	200	Número de generaciones :	40	Probabilidad de reproducción :	0.7	Probabilidad de mutación :	0.3	Número de ciclos :	1
Número de individuos iniciales :	200										
Número de generaciones :	40										
Probabilidad de reproducción :	0.7										
Probabilidad de mutación :	0.3										
Número de ciclos :	1										
e	<table><tr><td>Número de individuos iniciales :</td><td>200</td></tr><tr><td>Número de generaciones :</td><td>40</td></tr><tr><td>Probabilidad de reproducción :</td><td>0.7</td></tr><tr><td>Probabilidad de mutación :</td><td>0.3</td></tr><tr><td>Número de ciclos :</td><td>1</td></tr></table>	Número de individuos iniciales :	200	Número de generaciones :	40	Probabilidad de reproducción :	0.7	Probabilidad de mutación :	0.3	Número de ciclos :	1
Número de individuos iniciales :	200										
Número de generaciones :	40										
Probabilidad de reproducción :	0.7										
Probabilidad de mutación :	0.3										
Número de ciclos :	1										

3.5 SECCIÓN 5. PARÁMETROS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

Contiene los parámetros correspondientes a los elementos con que va a contar el sistema, tales como el tipo de paneles solares (figura 11.a), tipo de baterías (figura 11.b), tipo de reguladores (figura 11.c) y tipo inversores (figura 11.d).

Por defecto, la herramienta de software carga algunos elementos típicos con sus respectivos parámetros, pero pueden ser modificados según las necesidades y las condiciones particulares del mercado (ver figura 11). Adicionalmente, cada sección de estos módulos despliega un documento que contiene una base de datos de paneles, baterías, reguladores e inversores. También se pueden utilizar los botones de insertar o borrar para agregar/eliminar equipos de la base de datos a la tabla.

Figura 11. Parámetros de elementos de entrada.

The figure displays four data tables arranged in a 2x2 grid, each representing a different component type. Each table includes a header row with specific parameters and a list of items with their corresponding values. Below each table are two buttons: 'Insertar' (Insert) and 'Borrar' (Delete).

a TIPOS DE PANELES SOLARES

Referencia	Vn	Pn	Im	Isc	\$
RED 165	12	165	8.72	9.85	655939.035
SONNE 200	24	200	5.55	6	630952.785
ARTESA 320	24	320	8.52	8.99	1225292.385
ARTESA150	12	150	8.41	8.69	682657.665
ARTESA300	24	300	8.29	8.78	975529.83
AMERISOLAR	24	210	5.63	8.1	755417.625
ARTESA300	24	300	8.17	8.71	932986.575

b TIPOS DE BATERÍAS

Referencia	Vn	Cn	\$
S290	24	290	3006245.655
F5240	12	240	1121249.64
S530	24	550	5219094.585
F5260	12	260	1255275.885
TFS250	12	250	882625.925
S480	12	480	2382988.635
S12-230	24	230	3100327.215

c TIPOS DE INVERSORES

Referencia	VDC	VAC	Pn	\$
VFX3524	24	120	3500	6776271
DR152424	24	120	2400	4952308.065
DR3624	24	120	3600	5662317.345
MM1524AE	24	120	1500	2501956.5
RD3924	24	120	3900	5277096
FX3048T	48	120	3000	6246562.5
BCR-300-24	24	120	3000	4853462.46

d TIPOS DE REGULADORES

Referencia	Vn	In	\$
CHA024	24	80	3550879.275
CHA069	24	60	1743473.895
CHA071	24	70	1917777.975
CHA020	24	80	2747488.05
CHA073	24	85	2165475
CHA017	24	60	1840453.86
CHA81	24	100	2488625

3.6 VENTAJAS DE LA INTERFAZ

1. Cuenta con etiquetas que direccionan fácilmente al lugar en el que se deben ingresar datos de los elementos de entrada (tipo de paneles, tipo de reguladores, tipos de inversores entre otros).
2. Cuenta con una ventana que arroja los resultados y otra que permite visualizar una imagen con el sistema fotovoltaico autónomo, esto lo hace más didáctico y de mejor comprensión.
3. Cuenta con unos botones de colores que enfocan en donde se debe hacer clic para obtener resultados como gráficas, abrir páginas Web y calcular el dimensionamiento.
4. Permite ingresar parámetros de tensión en DC y en AC, días de autonomía, número de individuos, probabilidad cruzamiento, probabilidad de mutación y número de generaciones, de modo que el usuario se convierte en diseñador de su propio sistema fotovoltaico al elegir estas condiciones.
5. Permite elegir el número de ciclos que desea el usuario, aumentando o disminuyendo la probabilidad de encontrar el valor óptimo.

4. RESULTADOS

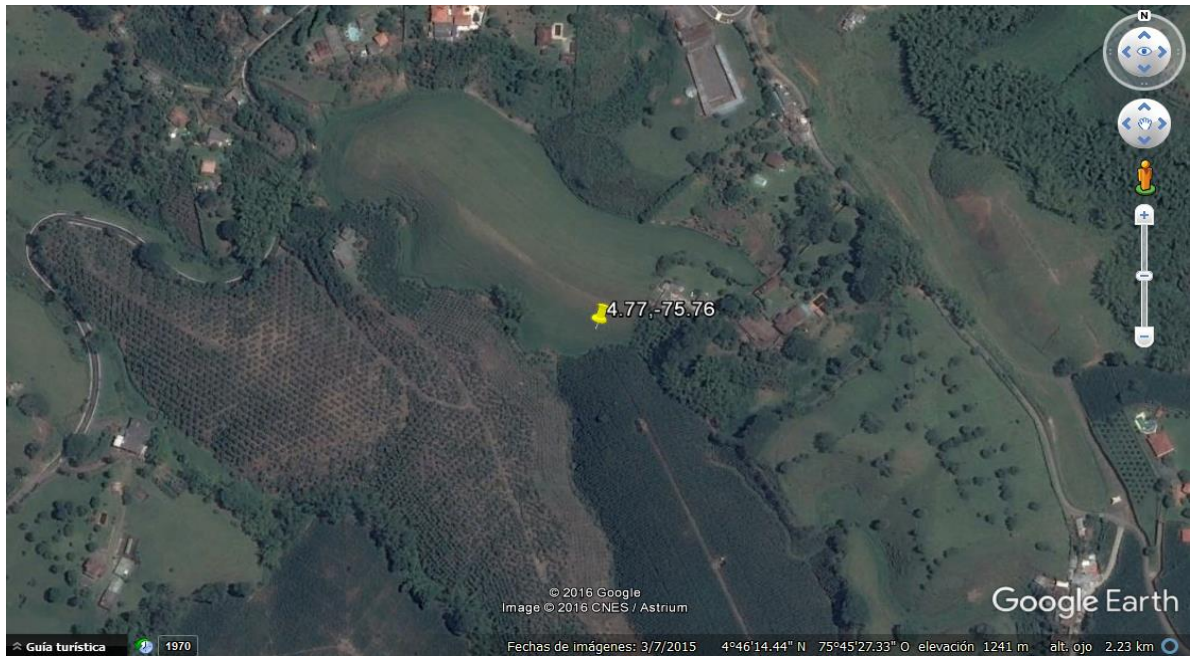
En este capítulo se presenta un ejemplo de dimensionamiento para una vivienda con cargas convencionales para una zona rural de Colombia.

4.1 REQUISITOS DEL EMPLAZAMIENTO

Para el dimensionamiento de la instalación del sistema fotovoltaico autónomo, se debe conocer la ubicación geográfica, la radiación y el perfil de carga.

El emplazamiento donde se desarrolló el ejemplo del proyecto está ubicado en una zona con un buen potencial de radiación y condiciones óptimas de temperatura, cumpliendo con la condición promedio de radiación ($>3\text{HPS}$) y temperaturas entre los 20° y 30° [36]. El lugar elegido se encuentra ubicado en el departamento de Risaralda Colombia, con una latitud de 4.77° N y 75.76° O. En la figura 12 se muestra la localización del emplazamiento.

Figura 12. Vista superior del emplazamiento.



4.2 DEMANDA DIARIA

El sistema autónomo simulado tiene un perfil de carga diario para una casa tradicional, con una carga catalogada como carga domestica ($552 \text{ Wh} < E_{\text{max}} < 40,9 \text{ kW}$) [37]. Se creó un perfil de carga para un día crítico del año, donde se supone el mayor consumo de energía del año. En las tablas 3 y 4 se detallan el perfil de carga y su distribución respectivamente.

Tabla 3. Perfil de carga para el día crítico.

CARGA	Potencia AC [W]	Potencia DC [W]	Tiempo [h] al día	Cantidad	Energía AC [Wh]	Energía DC [Wh]
Nevera	150		8	1	1200	
Lavadora	900		0,42	1	378	
Ventilador	30		7	1	210	
TV	100		6	1	600	
Iluminación	60		8	4	1920	

CARGA	Potencia AC [W]	Potencia DC [W]	Tiempo [h] al día	Cantidad	Energía AC [Wh]	Energía DC [Wh]
AC						
Iluminación DC	0	25	1	2	0	50
Plancha	900		0,5	1	450	
Licuada	350		0,15	1	52,5	
Total	2670				4810,5	50
VDC	24					
VAC	120					

Tabla 4. Distribución de carga horaria para el día crítico³.

HORA	Potencias AC [W]	Potencias DC [W]	Cargas AC	Cargas DC
1	90		VN+ILAC	
2	90		VN+ILAC	
3	90		VN+ILAC	
4	90		VN+ILAC	
5	60		ILAC	
6	60		ILAC	
7	60		ILAC	
8	202,5		NV+LC	
9	528		NV+LV	
10	600		NV+PL	
11	150		NV	
12	250		NV+TV	
13	250		NV+TV	
14	250		NV+TV	
15	150		NV	
16	60		ILAC	
17	120		2ILAC	
18	180	25	3ILAC	ILDC
19	280	25	TV+3ILAC	ILDC
20	340		TV+4ILAC	

³ La sigla *Vn* hace referencia a la carga ventilador, *ILAC* a iluminación AC, *NV* a nevera, *LV* a lavadora, *LC* a licuadora, *PL* a plancha, *TV* a televisión e *ILDC* a iluminación DC.

HORA	Potencias AC [W]	Potencias DC [W]	Cargas AC	Cargas DC
21	340		TV+4ILAC	
22	270		VN+4ILAC	
23	210		VN+3ILAC	
24	90		VN+ILAC	
TOTAL	4810,5	50		

4.3 EVALUACIÓN DE RECURSO SOLAR

Utilizando las bases de datos que proporciona el IDEAM, la NASA o algún centro meteorológico se consultan los datos de irradiación del lugar. Para este caso se empleó la base de datos de la NASA donde se tiene mayor precisión y es la base de datos que utiliza el software RETScreen. En la tabla 5 se presentan los datos de irradiación promedio para el lugar seleccionado.

Tabla 5. Datos de irradiación de la NASA.

Datos de irradiación de la base de datos de la NASA	
Mes	Wh/m ² /día
ENERO	4550
FEBRERO	4720
MARZO	4770
ABRIL	4520
MAYO	4520
JUNIO	4600
JULIO	4920
AGOSTO	4970
SEPTIEMBRE	4800
OCTUBRE	4560
NOVIEMBRE	4440
DICIEMBRE	4370

Fuente: EOSWEB RETS Screen [en línea] disponible en:
<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>

4.4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS

Se eligieron 7 tipos de cada elemento del sistema fotovoltaico autónomo, de la base de datos del ANEXO A. En la tabla 6 se muestran los diferentes equipos de paneles, baterías, reguladores e inversores que fueron introducidos a la herramienta SOLAR AG para la simulación.

Tabla 6. Tipos de paneles solares, baterías, reguladores e inversores.

Paneles solares						
Modelo	Potencia	V _m [V]	I _m [A]	I _{sc} [A]	Precios COP	Marca
RED 165	165	18,92	8,72	9,85	655939,035	REDSOLAR
SONNE 200	200	36,1	5,55	6	630952,785	SONNE PV
ATERSA 320	320	37,56	8,52	8,99	1225292,385	ATERSA
ATERSA150	150	17,84	8,41	8,69	682657,665	ATERSA
ATERSA 300	300	36,19	8,29	8,78	975529,83	KYOCERA
AMERISOLAR 210	210	37.3	5,63	8,1	755417,625	AMERISOLAR
AXITEC 300	300	36.73	8,17	8,71	932986,575	AXITEC
Baterías						
MODELO	C100 [Ah]	VDC[V]	Precios COP		Marca	
S290	290	24	3006245,655		ROLLS	
FS240	240	12	1121249,64		FORMULA STAR	
S530	550	24	5219094,585		ROLLS	
FS260	260	12	1255275,885		FORMULA STAR	
TFS250	250	12	982625,925		UPOWER	
S480	480	12	2382988,635		ROLLS	
S12-230	230	24	3100327,215		SONNENSCHHEIN	
Reguladores						
MODELO	I _N [A]	V _n [V]	Precios COP		Marca	
CHA024	80	24	3550879,275		SCHNEIDER	
CHA069	60	24	1743473,895		VICTRON	
CHA071	70	24	1917777,975		VICTRON	
CHA020	80	24	2747488,05		OUTBACK	
CHA073	85	24	2165475		VICTRON	
CHA017	60	24	1840453,86		SCHNEIDER	
CHA81	100	24	2498625		VICTRON	

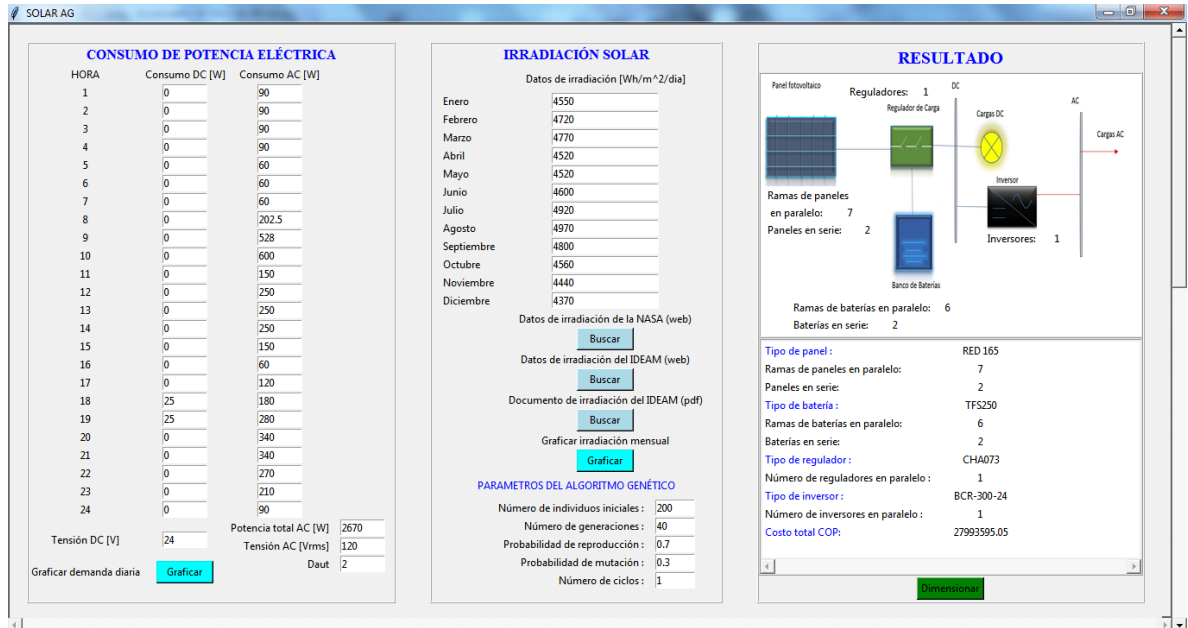
Inversores					
MODELO	Potencia[W]	VDC	VAC	Precios COP	Marca
VFX3524	3500	24	120	6776271	OUTBACK
DR2424	2400	24	120	4952308,065	XANTREX
DR3624	3600	24	120	5662317,345	XANTREX
MM1524AE	1500	24	120	2501956,5	MAGNUM ENERGY
RD3924	3900	24	120	5277096	MAGNUM ENERGY
FX3048T	3000	48	120	6246562,5	OUTBACK
BCR-3000-24	3000	24	120	4853462,46	ARTESA

Fuente: catálogos de SOLAR PLUS, TECHNO SUN, AUTOSOLAR.

4.5 RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN LA HERRAMIENTA SOLAR AG.

Se procedió a introducir los datos de equipos utilizados, datos de consumo DC, consumo AC, tensiones DC, tensiones AC, potencia total nominal de las cargas y datos de irradiación ya descritos en los ítems anteriores. En la figura 13 se muestra la interfaz de SOLAR AG con los datos previamente cargados y los que trae por defecto la herramienta.

Figura 13. Interfaz de SOLAR AG con los datos de la simulación.



Al presionar los botones graficar consumo aparecerán las gráficas de consumo DC y AC, y si se da clic al botón graficar irradiación aparecerán la gráfica de irradiación. En la figura 14, figura 15 y figura 16 se muestra las gráficas de consumo y de irradiación que se obtuvieron.

Figura 14. Consumo en DC.

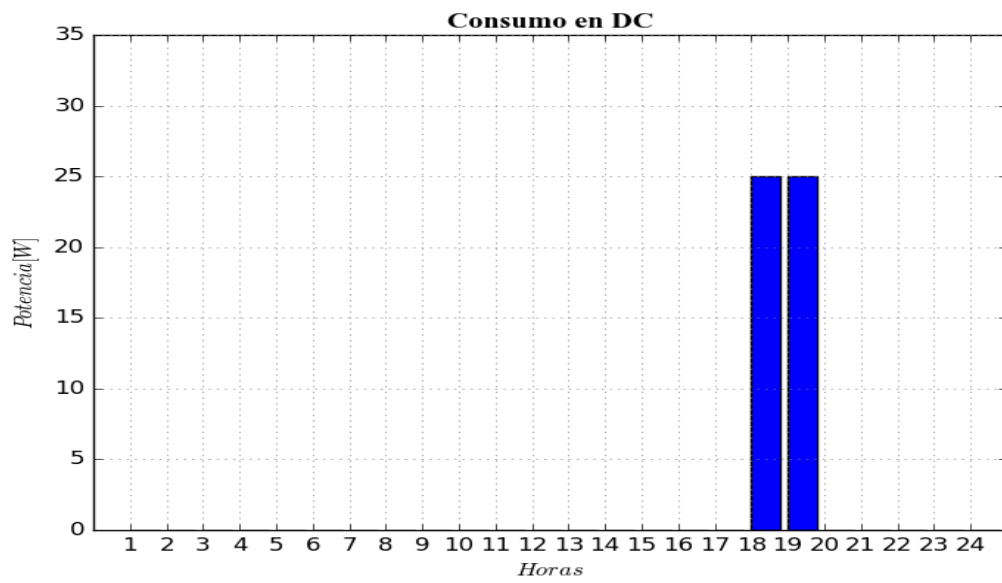


Figura 15. Consumo en AC.

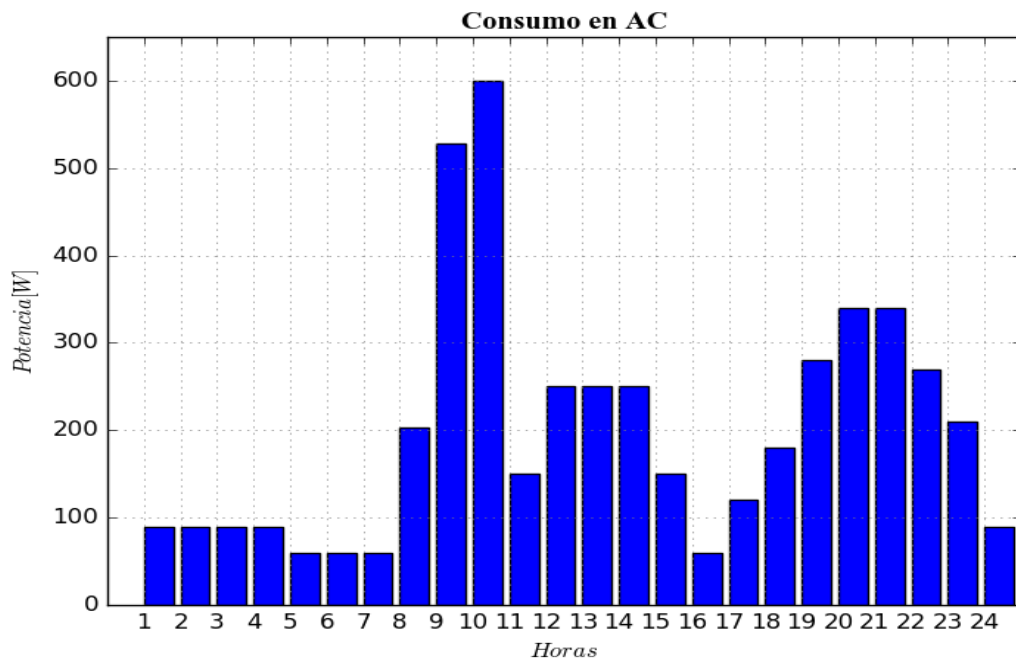
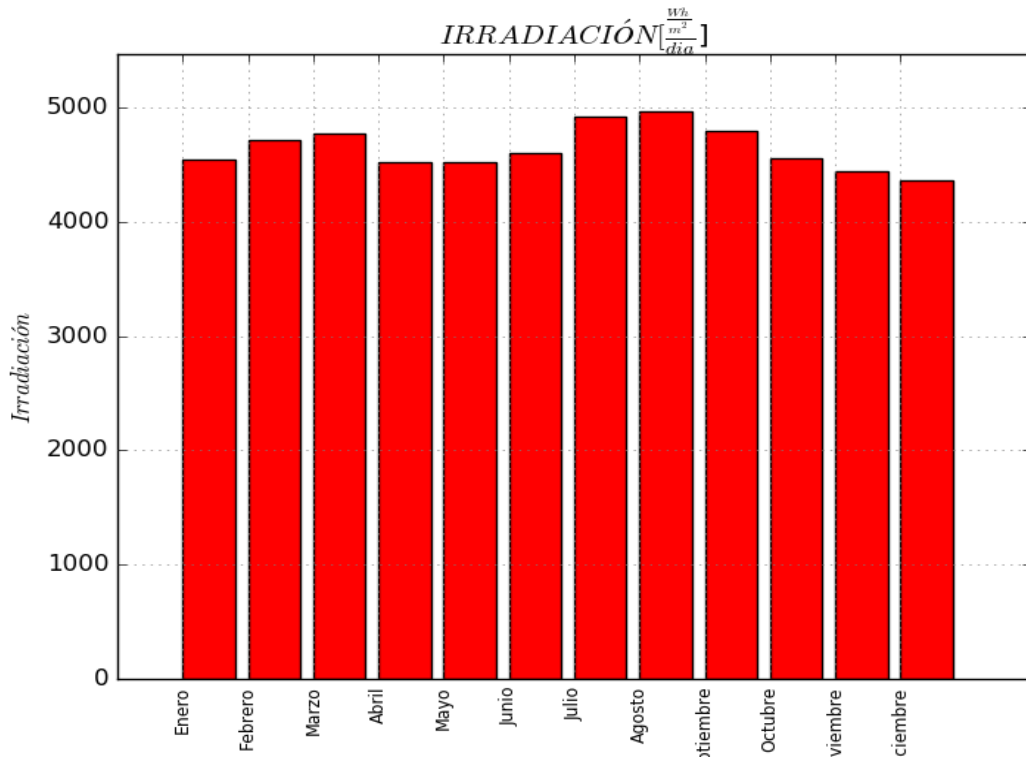


Figura 16. Grafica de irradiación mensual.



Dando clic en el botón dimensionar empieza el proceso de dimensionamiento basado en los algoritmos genéticos, se debe aclarar que se pueden presentar varios resultados validos si se cambian datos de entrada tales como el número de generaciones, y el número de individuos iniciales. Para una población inicial de 200 y un número de generaciones de 40 con 1 ciclo en un tiempo de 0,3 segundos los resultados fueron:

Tipo de panel: 1 (RED 165 de REDSOLAR)

Ramas de paneles en paralelo: 7

Paneles en serie: 2

Tipo de batería: 5 (TFS250 de UPOWER)

Ramas de baterías en paralelo: 6

Baterías en serie: 2

Tipo de regulador: 5 (CHA073 de VICTRON)

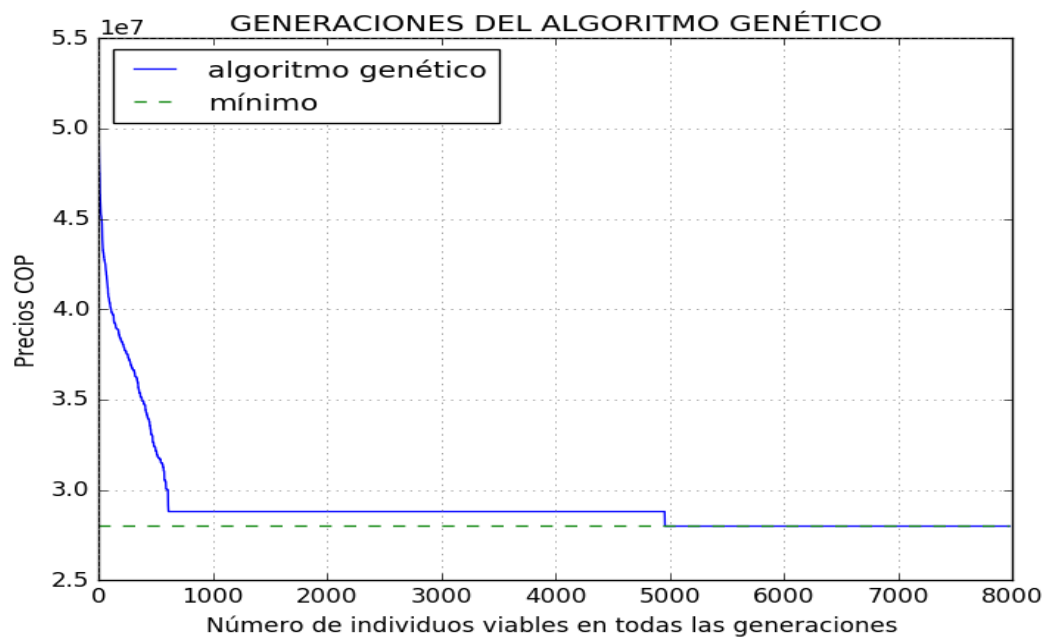
Numero de reguladores: 1

Tipo de inversor: 7(BCR-3000-24 de ARTESA)

Numero de reguladores: 1

Con un precio total de: **\$ 27.993.595**. Además, se obtuvo la gráfica de tendencia del algoritmo genético como se muestra en la figura 17. El resultado obtenido es verificado en el ANEXO B.

Figura 17. Grafica de comportamiento de minimización del algoritmo genético.



En la figura 17 se muestra el comportamiento de los algoritmos genéticos sobre el dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo del ejemplo planteado. Se observa una disminución a medida que transcurre cada generación, eligiendo así los individuos o sistemas más económicos y que cumplan con las restricciones técnicas,

4.6 COMPARACIÓN CON EL SOFTWARE HOGA

Se realizó una simulación del ejemplo planteado en el software HOGA (*Hybrid Optimization by Genetic Algorithms*) [38], con el fin de comparar los resultados obtenidos con la herramienta SOLAR AG. Los resultados obtenidos en HOGA se comparan en la tabla 7. En el ANEXO C se presenta el informe de HOGA y su entorno. En la tabla 7 se puede observar que los resultados de la herramienta SOLAR AG son cercanos a los del software HOGA donde este tiene unos modelos de dimensionamiento y un algoritmo diferente [37]. La cantidad de paneles en serie, la cantidad de baterías en serie, el número de reguladores e inversores son iguales para SOLAR AG y HOGA, donde se difiere en la cantidad de paneles y baterías en paralelo. Esta diferencia se puede presentar porque el método para la obtención de la energía necesaria para suplir la demanda es diferente para ambas herramientas.

Tabla 7. Tabla comparativa de entre SOLAR AG y HOGA.

Herramienta	SOLAR AG	HOGA
Tipo de panel solar	RED 165	RED 165
Número de paneles en paralelo	7	6
Número de paneles en serie	2	2
Tipo de baterías	TFS250	TFS250
Número de baterías en paralelo	6	4
Número de baterías en serie	2	2
Tipo de regulador	CHA073	CHA073
Número de reguladores	1	1
Tipo de inversor	BCR-3000-24	BCR-300-24
Tipo de inversor	1	1
Costo total COP	27993595,1	27494869,5

Para ilustrar otro ejemplo se realizó una comparación de precios entre la herramienta SOLAR AG y el software HOGA para diez (10) localidades no

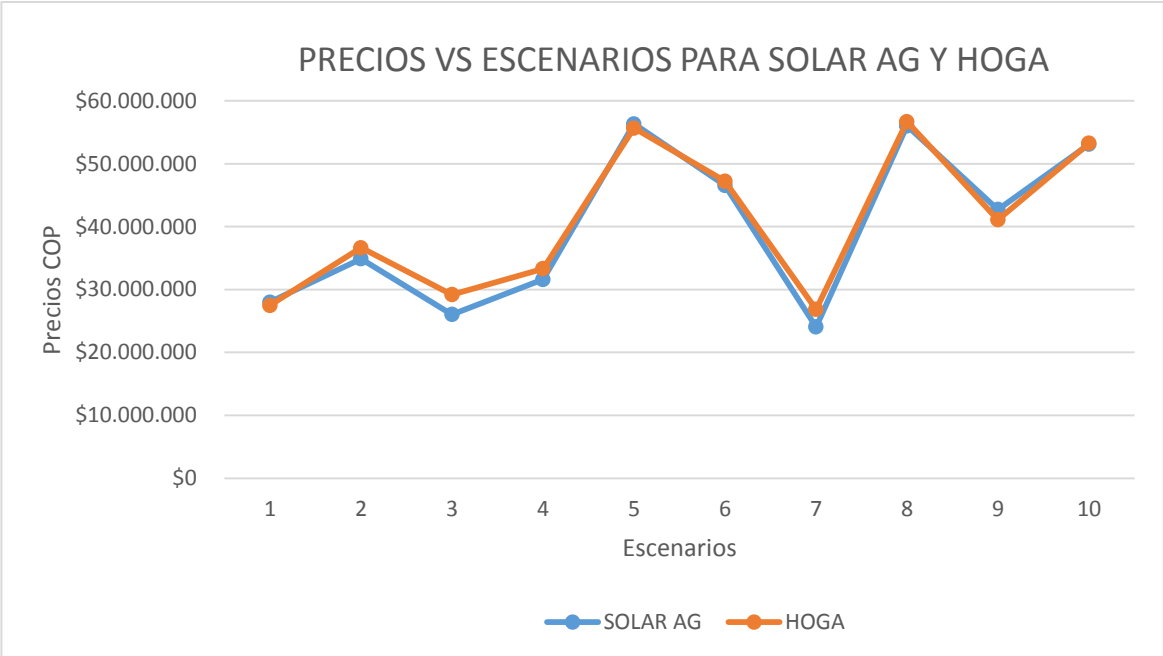
interconectadas o aisladas en diferentes partes de Colombia. En la tabla 8 se muestra las diferentes localidades con sus respectivos parámetros.

Tabla 8. Comparación de precios para diferentes escenarios.

Escenario	Lugar	HPS	Demanda [W]	Costo "SOLAR AG"	Costo "HOGA"
1	Risaralda	4,37	4810,5	\$ 27.993.595	\$ 27.494.870
2	Unguía	4,01	6310	\$ 34.881.005	\$ 36.646.500
3	Solano	3,69	4150	\$ 26.028.343	\$ 29.177.277
4	Guapi	3,97	5350	\$ 31.603.875	\$ 33.315.001
5	Puerto Carreño	4,35	9700	\$ 56.318.275	\$ 55.662.336
6	Inírida	4,03	7510	\$ 46.560.278	\$ 47.216.217
7	Leticia	4,03	2850	\$ 24.063.091	\$ 26.838.564
8	Mitú	3,92	9000	\$ 56.018.773	\$ 56.674.712
9	La Uribe	4,64	7960	\$ 42.725.088	\$ 41.086.523
10	La Primavera	4,22	10600	\$ 53.098.979,49	\$ 53.254.028

En la figura 18 se compara los precios de los diferentes escenarios para la herramienta SOLAR AG y el software HOGA. Donde en la mayoría de los casos estudiados SOLAR AG presenta menores costos. Hay tres localidades Risaralda, Puerto Carreño y la Uribe donde el costo de SOLAR AG es levemente mayor. Esta diferencia podría presentarse por los diferentes métodos de dimensionamiento que utilizan ambas herramientas.

Figura 18. Comparación de precios SOLAR AG vs HOGA.



5. CONCLUSIONES

1. Se desarrolló una herramienta de software en Python que permite realizar el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos autónomos usando algoritmos genéticos. Esta herramienta cuenta con una interfaz que permite al usuario interactuar de forma práctica y directa, sin necesidad de utilizar herramientas adicionales.
2. SOLAR AG le permite al usuario ser un diseñador de futuros proyectos, ya que:
 - 2.1. Permite la simulación de varios escenarios con diferentes tipos de cargas, lugares y tecnologías.
 - 2.2. Permite el análisis y estudio de los algoritmos genéticos en la aplicación de los sistemas fotovoltaicos autónomos.
 - 2.3. Permite la visualización de la demanda, el recurso solar y la tendencia de minimización del algoritmo genético.
3. La simplicidad de la herramienta permite facilidad en el manejo, incluyendo a toda la población interesada en las energías renovables independiente si son especialistas en el área o no, permitiendo el avance y desarrollo de los sistemas fotovoltaicos.
4. Los resultados obtenidos por SOLAR AG y el software HOGA son similares, lo cual lo cual se puede concluir que los resultados obtenidos la herramienta de software SOLAR AG son aceptables en comparación a la herramienta HOGA.

6. TRABAJOS FUTUROS

Se sugiere que el siguiente paso sea implementar más tecnologías y variables, para tener un mayor desempeño del algoritmo genético en un entorno donde abarque y contemple más posibilidades en el momento de sugerir una solución.

El algoritmo desarrollado se podría aplicar para un mayor número de tecnologías en la integración de sistemas híbridos como la utilización de aerogeneradores, plantas diésel, convertidores, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] K. U. Hasbani, «UNECE RENEWABLE ENERGY STATUS REPORT,» REN21, p. 90, 2016.

- [2] A.-S. ., K. E. A. Abdullrahman A, «Techno-economic optimization of hybrid power system using genetic algorithm,» INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH, p. 17, 2014.

- [3] C. A. Sarria, «Simulación De Sistemas Híbridos Fotovoltaico / Biogás / Propano Para Generación De Energía Eléctrica De Una Vivienda Empleando La Herramienta Computacional Homer.,» Santiago de Cali, 2012.

- [4] H. R. Murcia, «Development of Solar Energy in Colombia and its Prospects,» revista de ingeniería. Universidad de los Andes, vol. #28, p. 7, 2009.

- [5] H. García, A. Corredor, L. Calderón y M. Gómez, «Análisis costo beneficio de energías renovables,» Bogotá, Colombia, 2013.

- [6] IDEAM, «Atlas de Radiación Solar,» UPME, [En línea]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>. [Último acceso: 16 4 2016].

- [7] E. HARPER, WL ABC DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN SISTEMAS EÓLICOS Y FOTOVOLTAICOS, MEXICO: LIMUSA, 2015.

- [8] M. P. Aparicio, Energía Solar Fotovoltaica Cálculo de una instalación aislada, Barcelona: Marcombo, 2010.
- [9] NASA, «La meteorología de superficie y la energía solar,» Centro de Tecnología de Energía CANMET, 4 marzo 2008. [En línea]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>. [Último acceso: 7 4 2016].
- [10] Universidad Nacional Autónoma de México, «CELDA FOTVOLTAICA,» de DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN Y ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DE UN COMEDOR INDUSTRIAL, México, p. 26.
- [11] M. A. ABELLA, DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS FOTVOLTAICOS AUTÓNOMOS, MADRID : CIEMAT, 2012.
- [12] L. H. Jorge Aguilera, Curso de Energía Solar Fotovoltaica, Andalucía: UNIVERSIDAD DE JAÉN , 2010.
- [13] R. B. S. Frutos, «PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NUEVOS CONDUCTORES IÓNICOS DE LITIO CON ESTRUCTURA TIPO GRANATE PARA SU UTILIZACIÓN COMO ELECTROLITOS EN BATERÍAS DE ESTADO SÓLIDO,» Madrid, España, 2014.
- [14] ENTE VASCO DE LA ENERGIA, «LA ENERGIA SOLAR FOTVOLTAICA EN EL PAIS VASCO,» EVE, vol. 1.ª Edición, p. 90, Octubre 2000.
- [15] C. R. P. Mora, Diseño de un sistema eléctrico fotovoltaico para una comunidad aislada, Costa Rica: Universidad de Costa Rica , 2008.

- [16] L. G. d. Marzoa, «Boletín Solar Fotovoltaica Autónoma SunField Europe,» Santiago de Compostela,, SunField Europe.
- [17] L. P. Viñas, DIMENSIONADO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- [18] M. A. Abella, «MASTER EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MERCADO ENERGÉTICO / ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA,» CIEMAT, MADRID.
- [19] A. O. OSACAN SANTAMARIA, ESTUDIO TÉCNICO Y FINANCIERO DE IMPLEMENTACIÓN DE PANELES SOLARES ENFOCADOS A CENTROS COMERCIALES, BUCARAMANGA: UIS, 2009.
- [20] N. H. Rodríguez, «C. A. Ruinformática Aplicada a la Ingeniería de Procesos (Orientación I) Modelado y Optimización,» 2001.
- [21] I. I. y. P. L. Abdelmalik Moujahid. [En línea]. Available: <http://www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/t2geneticos.pdf>.
- [22] A. P. T. Jorge Arranz de la Peña, «ALGORITMOS GENÉTICOS,» Madrid, España.
- [23] D. GOLDDRERG, GENETIC ALGORITHMS, TUSCALOOSA: THE UNIVERSITY ALABAMA, 1985.
- [24] M. A. QUINTERO, M. JEREZ y M. ABLAN, Métodos heurísticos para la planificación y el manejo forestal, Bogota: Univerdidad de los ANDES, 2009.

- [25] [En línea]. Available: <https://wiki.python.org/moin/TkInter>.
- [26] Python.org, «Python,» Python, [En línea]. Available: <https://docs.python.org/2/library/webbrowser.html>. [Último acceso: 2016 8 30].
- [27] PIL, «Python Imaging Library,» PIL de Python, [En línea]. Available: <http://www.pythonware.com/products/pil/>. [Último acceso: 2016 8 30].
- [28] «Python.org,» Python, [En línea]. Available: <https://docs.python.org/2/library/math.html>. [Último acceso: 28 8 2016].
- [29] «Python,» Python.org, [En línea]. Available: <https://docs.python.org/2/library/random.html>. [Último acceso: 29 8 2016].
- [30] «NumPy,» NumPy.org, [En línea]. Available: <http://www.numpy.org/>. [Último acceso: 29 8 2016].
- [31] «Matplotlib,» matplotlib.org, [En línea]. Available: <http://matplotlib.org/>. [Último acceso: 29 8 2016].
- [32] «Python,» Python.org, [En línea]. Available: <https://docs.python.org/3/library/os.html>. [Último acceso: 29 8 2016].
- [33] «Cx-freeze,» cx-freeze, [En línea]. Available: <http://cx-freeze.sourceforge.net/>. [Último acceso: 29 8 2016].
- [34] PYTHON, «Python,» [En línea]. Available: <https://pypi.python.org/pypi/spyder>.

- [35] PYTHON, «PYTHON,» [En línea]. Available: <https://pypi.python.org/pypi/iep>.
- [36] P. P. V. BARRIOS, J. M. R. LÓPEZ, G. A. O. PINTO y G. O. PLATA, «Evaluación del potencial solar y eólico del campus central de la universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramnga ,Colombia,» Revista UIS, vol. 13, nº 2, p. 9, 2014.
- [37] R. D. LOPEZ y J. B. AGUSTIN, «Design and control strategies of PV-Diesel systems using genetic algorithms.,» SCIENCE DIRECT, p. 14, 2004.
- [38] R. D. López, «Hybrid-Renewable Optimization by Genetic Algorithms,» HOGA, [En línea]. Available: <http://hoga-renewable.es.tl/Espa%F1ol.htm>. [Último acceso: 15 8 2016].

BIBLIOGRAFÍA

A.-S. . ABDULLRAHMAN K. E. A. A, «Techno-economic optimization of hybrid power system using genetic algorithm,» International journal of energy research, p. 17, 2014.

ABELLA, M. A. «Master en energías renovables y mercado energético / energía solar fotovoltaica,» Madrid: CIEMAT,

ABELLA, M. A. Dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos autónomos, Madrid : Ciemat, 2012.

AGUILERA, L. H. Jorge Curso de Energía Solar Fotovoltaica, Andalucía: UNIVERSIDAD DE JAÉN , 2010.

APARICIO, M. P. Eneía Solar Fotovoltaica Cálculo de una instalación aislada, Barcelona: Marcombo, 2010.

ARRANZ DE LA PEÑA A. P. T. Jorge, «Algoritmos genéticos,» Madrid, España.

BARRIOS, P. P. V. LÓPEZ, J. M. R. PINTO G. A. O. y PLATA G. O., «Evaluación del potencial solar y eólico del campus central de la universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramnga ,Colombia,» Revista UIS, vol. 13, nº 2, p. 9, 2014.

CX-FREEZE, «Cx-freeze,» [En línea]. [Último acceso: 29 8 2016]. Disponible en: <http://cx-freeze.sourceforge.net/>.

ENTE VASCO DE LA ENERGIA, «La energía solar fotovoltaica en el país vasco,» EVE, vol. 1.ª Edición, p. 90, Octubre 2000.

FRUTOS, R. B. S. «Preparación y caracterización de nuevos conductores iónicos de litio con estructura tipo granate para su utilización como electrolitos en baterías de estado sólido,» Madrid, España, 2014.

GARCÍA, H. CORREDOR, A. CALDERÓN L. y GÓMEZ, M. «Análisis costo beneficio de energías renovables,» Bogotá, Colombia, 2013.

GOLDDRERG, D. Genetic algorithms, tuscaloosa: the University Alabama, 1985.

HARPER, E. WL ABC De las instalaciones eléctricas en sistemas eólicos y fotovoltaicos, Mexico: Limusa, 2015.

HASBANI K. U., «Unecce renewable energy status report,» REN21, p. 90, 2016.

I. I. y. ABDELMALIK MOUJAHID. P. L. [En línea]. Disponible en: <http://www.sc.ehu.es/ccwbyes/docencia/mmcc/docs/t2geneticos.pdf>.

IDEAM, «Atlas de Radiación Solar,» UPME, [En línea]. [Último acceso: 16 4 2016]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.

LOPEZ R. D. y AGUSTIN, J. B. «Design and control strategies of PV-Disel systems using genetic algorithms.,» SCIENCE DIRECT, p. 14, 2004.

LÓPEZ, R. D. «Hybrid-Renewable Optimization by Genetic Algorithms,» HOGA, [En línea]. [Último acceso: 15 8 2016]. Disponible en: <http://hoga-renewable.es.tl/Espa%F1ol.htm>.

MARZOA, L. G. d. «Boletín Solar Fotovoltaica Autónoma SunField Europe,» Santiago de Compostela,, SunField Europe.

Matplotlib.Org, «Matplotlib,» [En línea]. [Último acceso: 29 8 2016]. Disponible en: <http://matplotlib.org/>.

MORA, C. R. P. Diseño de un sistema eléctrico fotovoltaico para una comunidad aislada, Costa Rica: Universidad de Costa Rica , 2008.

MURCIA H. R., «Development of Solar Energy in Colombia and its Prospects,» revista de ingeniería. Universidad de los Andes, vol. #28, p. 7, 2009.

NASA, «La meteorología de superficie y la energía solar,» Centro de Tecnología de Energía CANMET, 4 marzo 2008. [En línea]. [Último acceso: 7 4 2016]. disponible en: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>.

NUMPY.ORG, «NumPy,» [En línea]. [Último acceso: 29 8 2016]. Disponible en: <http://www.numpy.org/>.

OSACAN SANTAMARIA, A. O. Estudio técnico y financiero de implementación de paneles solares enfocados a centros comerciales, Bucaramanga: UIS, 2009.

PIL, «Python Imaging Library,» PIL de Python, [En línea]. [Último acceso: 2016 8 30]. Disponible en: <http://www.pythonware.com/products/pil/>.

PYTHON, «PYTHON,» [En línea]. Disponible en: <https://pypi.python.org/pypi/iep>.

PYTHON, «Python,» [En línea]. Disponible en: <https://pypi.python.org/pypi/spyder>.

PYTHON, «Python.org,» [En línea]. . [Último acceso: 28 8 2016]. Disponible en: <https://docs.python.org/2/library/math.html>

PYTHON.ORG, «Python,» [En línea]. [Último acceso: 29 8 2016]. Disponible en: <https://docs.python.org/2/library/random.html>.

PYTHON.ORG, «Python,» [En línea]. [Último acceso: 29 8 2016]. Disponible en: <https://docs.python.org/3/library/os.html>.

PYTHON.org, «Python,» Python, [En línea]. [Último acceso: 2016 8 30]. Disponible en: <https://docs.python.org/2/library/webbrowser.html>.

QUINTERO, M. A. JEREZ M. y ABLAN, M. Métodos heurísticos para la planificación y el manejo forestal, Bogota: Univerdidad de los ANDES, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://wiki.python.org/moin/TkInter>.

RODRÍGUEZ, N. H. «C. A. Ruinformática Aplicada a la Ingeniería de Procesos (Orientación I) Modelado y Optimización,» 2001.

SARRIA C. A., «Simulación De Sistemas Híbridos Fotovoltaico / Biogás / Propano Para Generación De Energía Eléctrica De Una Vivienda Empleando La Herramienta Computacional Homer.,» Santiago de Cali, 2012.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO, «Celdas fotovoltaicas,» de diseño de una instalación y alimentación eléctrica de un comedor industrial, Mexico, p. 26.

VIÑAS, L. P. Dimensionado de sistemas fotovoltaicos, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.

ANEXOS

ANEXO A: Tablas de componentes de sistemas fotovoltaicos autónomos.

Tabla 9. Tipos de paneles solares.

Paneles solares				
Tensión nominal [V]	Potencia Nominal [W]	Precio COP	Descripción	Marca
12	2	83787,225	Amorfo	SOLARCELL
12	5	112871,22	Monocristalino	ATERSA
12	6	207918,915	Amorfo	SOLARCELL
12	10	134592,6	Monocristalino	ATERSA
12	12	364632,675	Amorfo	SOLARCELL
12	25	181700,01	Policristalono	ATERSA
12	20	185031,51	Policristalono	VICTRON
12	30	265820,385	Policristalono	VICTRON
12	40	269651,61	Policristalono	VICTRON
12	50	344676,99	Policristalono	VICTRON
12	70	822880,5	Policristalono	KYOCERA
12	75	426298,74	Policristalono	ATERSA
12	80	500657,82	Policristalono	VICTRON
12	80	595005,9	Monocristalino	VICTRON
12	95	1105724,85	Policristalono	KYOCERA
12	100	627654,6	Policristalono	VICTRON
12	100	677227,32	Monocristalino	VICTRON
12	100	505688,385	Policristalono	ATERSA
12	150	682657,665	Policristalono	ATERSA
12	150	533006,685	Policristalono	SONNE
12	165	655272,735	Monocristalino	RED SOLAR
24	190	655272,735	Policristalono	RED SOLAR
24	200	630952,785	Policristalono	SONNE
24	210	836306,445	Monocristalino	AMERISOLAR
24	235	2155247,295	Monocristalino	PANASONIC
24	260	771741,975	Policristalono	JINKO
24	300	975529,83	Policristalono	ATERSA

Paneles solares				
Tensión nominal [V]	Potencia Nominal [W]	Precio COP	Descripción	Marca
24	300	932986,575	Policristalono	AXITEC
24	310	940415,82	Policristalono	AMERISOLAR
24	310	1031565,66	Policristalono	ATERSA
24	310	1152365,85	Monocristalino	ATERSA
24	315	1188679,2	Monocristalino	ATERSA
24	320	985391,07	Policristalono	KYOCERA
24	320	1225292,385	Monocristalino	ATERSA

Tabla 10. Tipos de reguladores.

Regulador				
Descripción	Tensión [V]	Marca	Cap. Corriente [A]	Precio COP
PWM	12	MORNINGSTAR	6	\$ 188.717,10
		MORNINGSTAR	6	\$ 111.498,75
		MORNINGSTAR	10	\$ 257.336,20
		MORNINGSTAR	20	\$ 348.808,90
		MORNINGSTAR	25	\$ 566.122,15
	24	MORNINGSTAR	10	\$ 360.264,85
		MORNINGSTAR	20	\$ 457.480,10
	24	TECHNO SUN	10	\$ 137.092,45
		MORNINGSTAR	10	\$ 150.122,50
		TECHNO SUN	10	\$ 64.275,75
		MORNINGSTAR	15	\$ 571.835,55
		VICTRON	20	\$ 124.616,25
		VICTRON	30	\$ 167.758,25
		TECHNO SUN	40	\$ 863.627,05
	12/24/48	SCHNEIDER	60	\$ 1.840.453,86
		SCHNEIDER	40	\$ 336.361,85
		MORNINGSTAR	45	\$ 629.027,85
	MPPT	12/24/48	MORNINGSTAR	60
SCHNEIDER			80	\$ 3.550.879,28
OUTBACK			80	\$ 2.747.488,05
VITRON			45	\$ 1.372.965,00
24		MORNINGSTAR	60	\$ 2.247.319,25
		VICTRON	10	\$ 247.775,00

Regulador				
Descripción	Tensión [V]	Marca	Cap. Corriente [A]	Precio COP
		VICTRON	15	\$ 262.350,00
		VICTRON	30	\$ 583.000,00
		VICTRON	50	\$ 874.500,00
		VICTRON	60	\$ 1.743.473,90
		VICTRON	70	\$ 1.917.777,98
		VICTRON	85	\$ 2.165.475,00
		MORNINGSTAR	40	\$ 2.035.719,40
		MORNINGSTAR	25	\$ 1.370.050,00

Tabla 11. Tipos de baterías.

BATERÍAS			
Capacidad C100 [Ah]	VDC	Precio COP	Marca
AGM			
7,2	12	57834,84	UPOWER
8	12	89883,87	VICTRON
26	12	230773,005	RITAR
60	12	412972,74	ME
100	12	566588,205	UPOWER
220	12	1750703,25	VITRON
250	12	982625,925	UPOWER
GEL			
17	12	289840,5	SONNENSCHNEIN
27	12	330951,21	SONNENSCHNEIN
60	12	491396,25	SONNENSCHNEIN
85	12	664534,305	SONNENSCHNEIN
150	12	907000,875	ME
230	24	3100327,215	SONNENSCHNEIN
265	12	3006212,34	TROJAN
ESTACIONARIAS			
290	24	3006245,655	ROLLS
294	12	979461	TUDOR
393	12	3998266,41	BAE
440	12	4751485,245	TUDOR
480	12	2382988,635	ROLLS
550	24	5219094,585	ROLLS

BATERÍAS			
Capacidad C100 [Ah]	VDC	Precio COP	Marca
583	12	4795627,62	BAE
PLOMO ACIDO			
66	24	647610,285	FORMULA STAR
85	12	272250,18	UPOWER
117	12	695983,665	TROJAN
155	12	685689,33	FORMULA STAR
166	12	1005346,755	TROJAN
240	12	1121249,64	FORMULA STAR
260	12	1255275,885	FORMULA STAR

Tabla 12. Tipos de inversores.

Potencia [kW]	Tensión de entrada [V]	Tensión de salida [V]	Precio COP	Descripción	Marca
1,5	24	120	2501956,5	senoidal	MAGNUN ENERGY
2,4	24	120	4952308,065	senoidal	XANTREX
2,5	24	120	6246562,5	senoidal	OUTBACK
2,8	12	120	6729630	senoidal	OUTBACK
3	24	120	4853462,46	senoidal	ATERSA
3	48	120	6246562,5	senoidal	OUTBACK
3,5	24	120	6776271	senoidal	OUTBACK
3,6	24	120	5662317,345	senoidal	XANTREX
3,6	48	120	6779602,5	senoidal	OUTBACK
3,9	24	120	5277096	senoidal	MAGNUN ENERGY
4	25,2	120/242	9705092,595	senoidal	XANTREX
4,2	48	120	14898468	senoidal	SUNNY ISLAND
4,4	48	120/240	7192708,5	senoidal	MAGNUN ENERGY
4,5	50,4	120/241	9982340,025	senoidal	XANTREX
5	48	120	18869616	senoidal	SUNNY ISLAND
6	50,4	120/240	12669694,5	senoidal	XANTREX
0,15	12	230	365774	senoidal	VICTRON
0,15	12	220	552014	senoidal	VICTRON
0,175	12	230	412385	senoidal	VICTRON
0,175	48	230	518491	senoidal	VICTRON
0,25	12	230	526595	senoidal	VICTRON
0,3	12	230	438066	senoidal	VICTRON

Potencia [kW]	Tensión de entrada [V]	Tensión de salida [V]	Precio COP	Descripción	Marca
0,3	12	220	839024	senoidal	VICTRON
0,3	48	230	673336	senoidal	VICTRON
0,5	12	230	882312	senoidal	VICTRON
0,6	12	220	1348071	senoidal	VICTRON
0,6	24	220	1373840	senoidal	VICTRON
0,7	12	220	715312	senoidal	VICTRON
0,8	48	220	3089609	senoidal	VICTRON
0,85	12	230	1612607	senoidal	VICTRON
1	24	230	1748242	senoidal	VICTRON
1,4	12	220	1059194	senoidal	VICTRON
1,4	48	230	2386306	senoidal	VICTRON
1,5	24	220	564869	senoidal	VICTRON
1,5	48	230	3231919	senoidal	VICTRON
1,75	24	230	412677	senoidal	VICTRON
2	12	230	1543667	senoidal	VICTRON

ANEXO B. Ejemplo de cálculo exacto de dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo

Para el primer ejemplo propuesto en el capítulo 3 se realizó los cálculos utilizando las ecuaciones y el algoritmo planteado en este proyecto para la verificación del resultado obtenido en la herramienta de software SOLAR AG.

Utilizando la ecuación (1.1), la ecuación (1.2) y las tablas 3 y 4 con una eficiencia de 0,85 para el inversor. Se obtiene la energía vista en los bornes del regulador.

$$E_{ins} = E_{diaria_DC} + \frac{E_{diaria_AC}}{n_{inv}} \text{ [Wh]} \quad (1.2)$$
$$E_{ins} = 50 + \frac{4810,5}{0,85} = 5709,412 \text{ [Wh]}$$

Se calculan las pérdidas de todo el sistema utilizando la ecuación (1.3) y utilizando las pérdidas de los equipos y del efecto joule definidas en el capítulo 1.

$$Pr_t = \left[1 - (Pr_b + Pr_c + Pr_r + Pr_j)\right] \cdot \left[1 - \frac{(Pr_a \cdot D_{aut})}{P_d}\right] \quad (1.3)$$
$$Pr_t = \left[1 - (0,10 + 0 + 0,10 + 0,10)\right] \cdot \left[1 - \frac{(0,005 \cdot 2)}{0,6}\right] = 0,688$$

Utilizando la ecuación (1.4) y (1.5) se calcula la energía máxima de la carga.

$$E_{max} = \frac{1,2 \cdot E_{inst}}{Pr_t} \text{ [Wh]} \quad (1.4)$$
$$E_{max} = \frac{1,2 \cdot 5709,412}{0,688} = 9953,454 \text{ [Wh]}$$

De igual la energía máxima de la carga se puede expresar en unidades de [Ah] si se divide por la tensión DC del sistema

$$E_{\max} = \frac{1,2 * E_{\text{inst}}}{P_{r_t} * V_{DC}} \text{ [Ah]} \quad (1.5)$$

$$E_{\max} = \frac{1,2 * 5709,412}{0,688 * 24} = 414,727 \text{ [Ah]}$$

En la tabla 13 se muestra el tipo de panel, el tipo de batería, el tipo de regulador y el tipo de inversor de la solución del ejemplo, donde se muestra características técnicas de estos elementos.

Tabla 13. Características técnicas de los elementos del sistema.

Modelo	Potencia	Vm [V]	Im[A]	Isc[A]	Precio	Marca
RED 165	165	18,92	8,72	9,85	655939,035	REDSOLAR
Batería						
Modelo	C100 [Ah]	VDC	Precio	Marca		
TFS250	250	12	982625,925	UPOWER		
Regulador						
Modelo	IN [A]	Vn [V]	Vmín	Vmáx	Marca	Precio
CHA073	85	24	24	150	VICTRON	2165475
Inversor						
Modelo	Potencia [W]	VDC	VAC	Precio	Marca	
BCR-300-24	3000	24	120	4853462,46	ARTESA	

Los algoritmos genéticos se hacen necesarios cuando se quiere reducir la evaluación de una combinación para diferentes tipos de elementos. En este caso solo se presenta un tipo de cada elemento por lo tanto se evaluara de forma exacta para calcular el número de cada elemento.

Utilizando la ecuación (1.6), la ecuación (1.7) y recurriendo a las tabla 5. Se observa que el mes de diciembre es el mes que tiene menor irradiación promedio

con una irradiación de 4370 Wh/m²/día. Dado a esto se calcula la energía del panel por unidad de tensión

$$E_{panel} = I_{panel} * HPS * \eta_{panel} \left[\frac{Ah}{día} \right] \quad (1.7)$$

$$E_{panel} = 8,72 * 4,37 * 0,9 = 34,296 \left[\frac{Ah}{día} \right]$$

Utilizando las ecuaciones (1.11), (1.12) y (1.13) se calcula el número de paneles totales, el número de paneles serie y el número de paneles en paralelo respectivamente.

$$N_{T_panel} = \frac{E_{max}}{E_{panel}} \quad (1.11)$$

$$N_{T_panel} = \frac{414,727}{34,296} \approx 13$$

$$N_{p_serie} = \frac{V_{DC}}{V_m} \quad (1.12)$$

$$N_{p_serie} = \frac{24}{18,92} \approx 2$$

$$N_{p_paralelo} = \frac{V_{T_panel}}{N_{p_serie}} \quad (1.13)$$

$$N_{p_paralelo} = \frac{13}{2} \approx 7$$

Por lo tanto el número total de paneles se corrige a:

$$N_{T_panel} = N_{p_serie} * N_{p_paralelo} = 14$$

Utilizando la ecuación (1.15) y la ecuación (1.16) se calcula el número de baterías en paralelo y el número de baterías en serie:

$$N_{B_paralelo} = \frac{E_{max} * D_{aut}}{P_d * C_{bat}} \quad (1.15)$$

$$N_{B_{paralelo}} = \frac{414,727 * 2}{0,6 * 250} \approx 6$$

$$N_{B_{serie}} = \frac{V_{DC}}{Vn_{bateria}} \quad (1.16)$$

$$N_{B_{serie}} = \frac{24}{12} = 2$$

Se calcula el número de reguladores utilizando la ecuación (1.17)

$$N_{reg} = 1,1 * \frac{N_{pparalelo} * I_{sc}}{I_{regulador}} \quad (1.17)$$

$$N_{reg} = 1,1 * \frac{7 * 9,85}{85} \approx 1$$

Por último se calcula el número de inversores utilizando la ecuación (1.20)

$$N_{Inv} = \frac{P_{Carga}}{P_{inv}} \quad (1.20)$$

$$N_{Inv} = \frac{2670}{3000} \approx 1$$

Habiendo calculado el número de elementos, se calculó el costo de los elementos del sistema utilizando la ecuación (1.24)

$$ci = c_{panel} * N_{pparalelo} * N_{pserie} + c_{bateria} * N_{bparalelo} * N_{bserie} + c_{reg} * N_{reg} + c_{inv} * N_{inv} \quad (1.24)$$

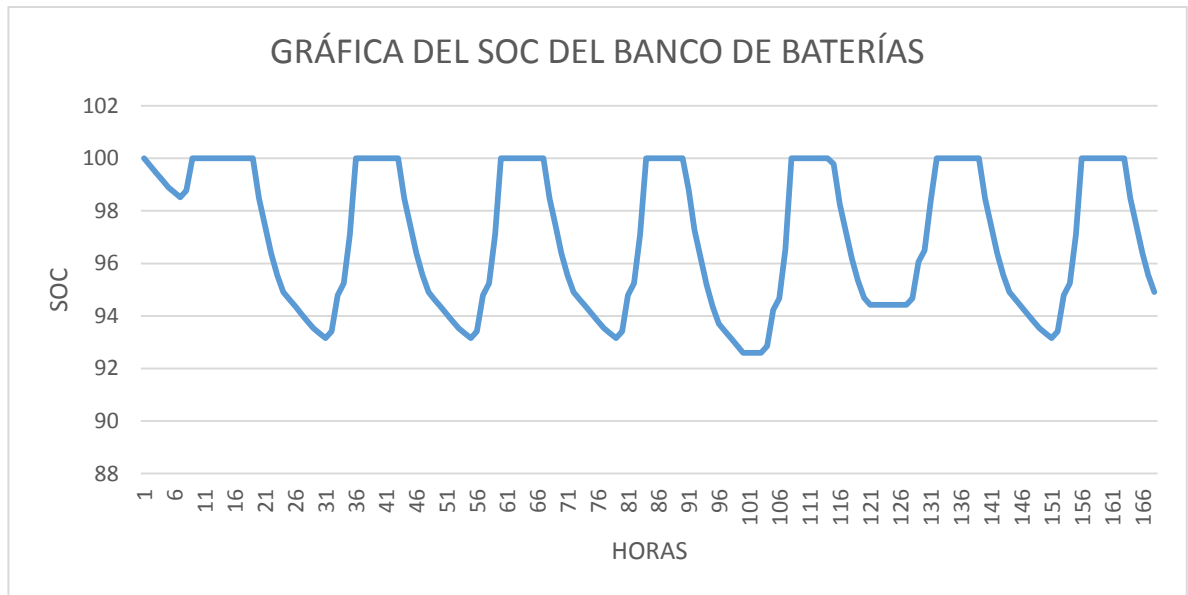
$$ci = \$27.993.595,05$$

Cabe resaltar que el método exacto y el método combinatorio se complicarían si se tuviera en cuenta cientos de elementos para un sistema fotovoltaico, por lo tanto se hace necesario la utilización de técnicas como los algoritmos genéticos para reducir el costo de tiempo computacional para la valoración de las posibles

configuraciones. Por ello se creó la herramienta SOLAR AG que dimensiona sistemas fotovoltaicos reduciendo el costo computacional.

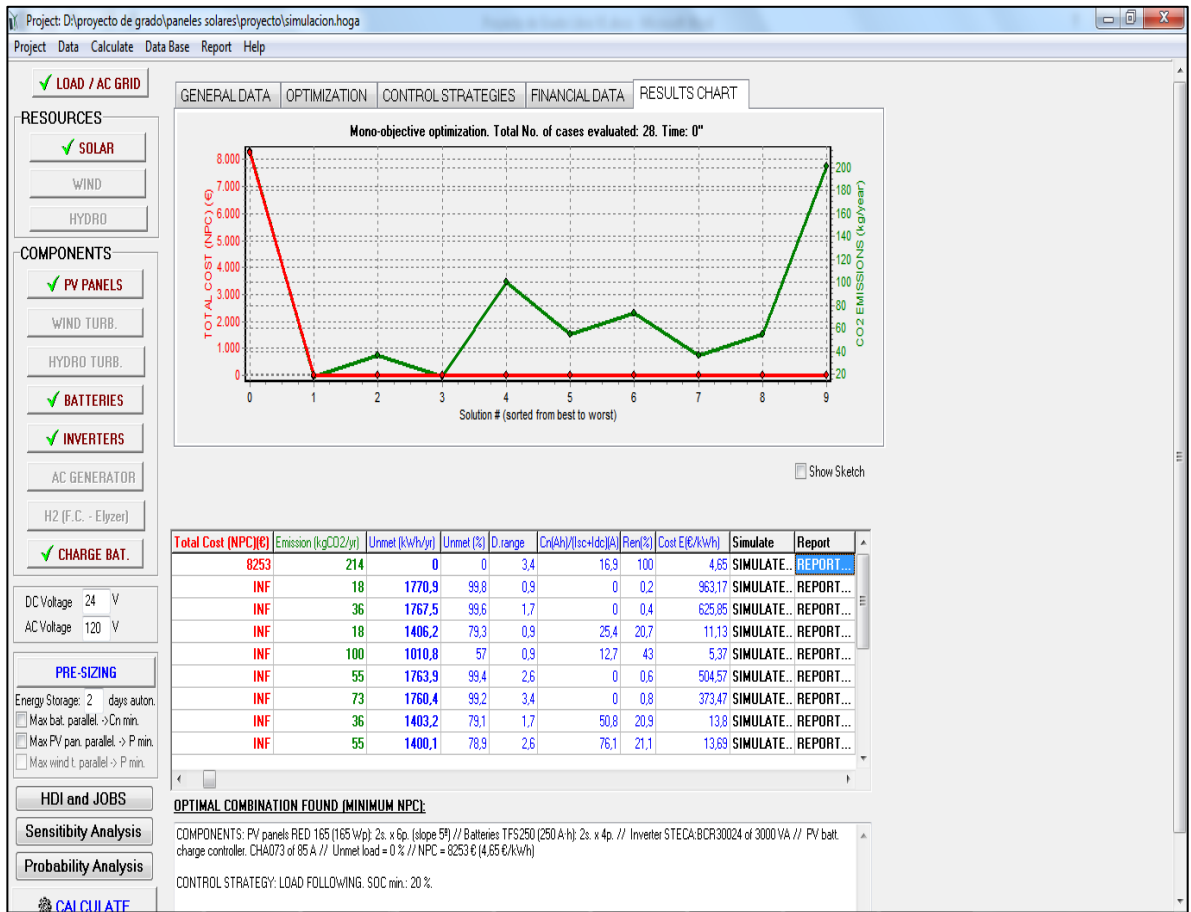
Para comprobar técnicamente si los equipos funcionan se observa que la tensión en serie de los paneles está dentro de los límites de funcionamiento del regulador. Además se hizo un análisis de carga de la batería utilizando el método SOC para verificar si la batería elegida es la mejor. En la figura 19 se muestra el estado de carga y descarga de la batería, donde se observa que la batería mantiene su carga, permitiendo así un buen funcionamiento del sistema.

Figura 19. Estado de carga de la batería TFS250 de UPOWER.



ANEXO C. Entorno del software e informe HOGA.

Figura 20. Interfaz de HOGA.



En la figura 21 se muestra el informe de HOGA donde data el resultado de la simulación.

Figura 21. Informe de HOGA.

Project: simulacion.hoga. Solution # 0

DC Voltage: 24 V. AC Voltage: 120 V

COMPONENTS:

PV panels RED 165 (165 Wp): 2 serial x 6 par. P total = 1,98 kWp, 5° slope

Batteries TFS250 (Cn=250 A·h): 2 s. x 4 p. E total = 24 kWh (3,4 d.aut.)

Without Wind Turbines

Without Hydro Turbine

Without AC Generator

Without Fuel Cell

Without Electrolyzer

Inverter STECA:BCR30024, rated power 3000 VA

PV Battery charge controller CHA073 of 85 A

Without battery charger

CONTROL STRATEGY:

LOAD FOLLOWING. SOC min. batteries = 20 %

IF POWER DELIVERED BY RENEWABLE SOURCES IS HIGHER THAN LOAD: CHARGE

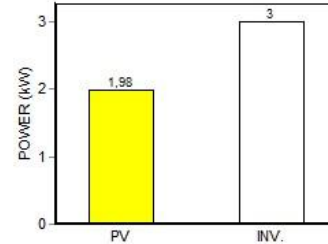
The Batteries are charged with the spare power from renewable

IF POWER DELIVERED BY RENEWABLE SOURCES IS LOWER THAN LOAD: DISCHARGE

The whole not supplied power to meet the load must be supplied by the Batteries. If the Batteries cannot supply the whole, the rest will be unmet load.

There is no AC Generator

There is no Fuel Cell



Initial Investment: 7266 €. Loan: 80 %, annual quota: 827,6 €. Cost AC gen. fuel during 1st. year: 0 €

NPC OF THE SYSTEM (1 years lifetime): (comparing to only AC grid, 1776kWh/yr. NPC=3362 €)

Total System Costs (NPC): 8253 €. Levelized cost of energy: 4,65 €/kWh

PV Generator Costs (NPC): 2402 €

Battery bank Costs (NPC): 2409 €

Auxiliary Components Costs (NPC): 650 €

Inverter Costs (NPC): 1456 €

ENERGY DURING 1 YEAR:

Overall Load Energy: 1774 kWh/yr. From Renewable: 100%

Unmet load: 0 kWh/yr (0 % demand)

Excess Energy: 325 kWh/yr

Energy delivered by PV generator: 2822 kWh/yr

Energy delivered by Wind Turbines: 0 kWh/yr

Energy delivered by Hydro Turbine: 0 kWh/yr

Energy delivered by AC Generator: 0 kWh/yr

Hours of AC Generator operation: 0 h/yr

Energy delivered by Fuel Cell: 0 kWh/yr

Hours of Fuel Cell operation: 0 h/yr

Energy at Electrolyzer: 0 kWh/yr

Hours of Electrolyzer operation: 0 h/yr

Energy charged by Batteries: 1317 kWh/yr

Energy discharged by Batteries: 1318 kWh/yr

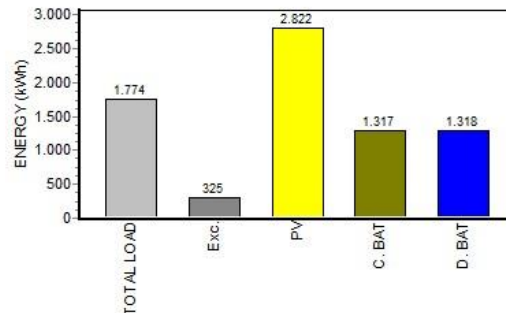
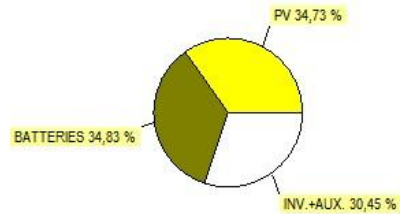
Batteries Lifetime: 6,16 years

E. sold to AC grid: 0 kWh/yr

E. Purchased from AC grid: 0 kWh/yr

Total CO2 emissions: 214 kg CO2/yr; Emissions generated by AC generator (due to consumption of 0 litro/yr): 0 kg CO2/yr

H2 sold in one year: 0 kg H2/yr /// HDI: 0,5423. Jobs created during system lifetime: 0,0025



ANEXO D. Dimensionamiento y selección de conductores y ductos

Conductores

La corriente para el dimensionamiento de los conductores debe incrementarse en un 25%, correspondido a la capacidad de corriente de los conductores, según como se estipula en el art. 690-8 NTC 2050.

En la tabla 14 se presenta los cálculos para los tramos del sistema fotovoltaico propuesto como ejemplo.

Tabla 14 Calculo de corriente de los tramos

	Tramo		I_nom [A]	I_dimensionamiento [A]	
	Inicio	Fin			
1	Módulos Panel	Regulador	68,95	$68,95 * 1,25 * 1,2$	103,425
2	Regulador	Baterías	15	$15 * 1,25 * 1,2$	22,5
3	Regulador	B3	1,041	$1,041 * 1,25 * 1,2$	1,5615
4	Regulador	Inversor	25	$25 * 1,25$	31,25
5	Inversor	B4	22,25	$22,25 * 1,25$	27,8125

Tramo 1. La corriente de este tramo es la corriente de salida del módulo de paneles, multiplicada por el factor de 1.25 y 1.2 por radiación de 1200 W.

Tramo 2. Es la corriente de salida del regulador hacia el banco de baterías, multiplicada por el factor de 1.25 y 1.2 por radiación de 1200 W.

Tramo 3. Es la corriente de salida del regulador hacia la carga dc, multiplicada por el factor de 1.25 y 1.2 por radiación de 1200 W.

Tramo 4. Es la corriente del regulador hacia el inversor Es la corriente de salida del regulador hacia el banco de baterías, multiplicada por el factor de 1.25.

Tramo 5. Es la corriente del inversor hacia la carga AC. Es la corriente de salida del regulador hacia el banco de baterías, multiplicada por el factor de 1.25.

La distribución de la regulación por tramos a través del sistema fotovoltaico se presenta en la tabla 15.

Tabla 15. Regulación por tramo del sistema fotovoltaico.

	Tramo		I_nom	I_dimensionamiento	Regulación Propuesta	Longitud	
	Inicio	Fin					
1	Módulos Panel	Regulador	68,95	68,95*1,25*1,2	103,425	1,20%	8,4
2	Regulador	Baterías	15	15*1,25*1,2	22,5	0,80%	3,9
3	Regulador	B3	1,041	1,041*1,25*1,2	1,5615	0,70%	4
4	Regulador	Inversor	25	25*1,25	31,25	0,30%	1,5
5	Inversor	B4	22,25	22,25*1,25	27,8125	2,00%	110
						5,00%	

A continuación se presenta un cálculo tipo de conductores para los tramos de corriente alterna y corriente continua,

La regulación para sistemas DC se calculara a partir de la expresión matemática:

$$\delta\% = \frac{200 * p * i * L}{S * V}$$

Donde:

P: resistividad

I: corriente eléctrica

L: Longitud del tramo

S: sección transversal del conductor en mm²

V: tensión

En sistemas AC tetrafilares la expresión utilizada es:

$$\delta\% = \frac{K_G * \sqrt{3} * i * L (10^{-3})}{V}$$

Donde:

K_G: constante de regulación dependiente del conductor y del factor de potencia.

En la tabla 16 se muestra el resultado de los cálculos efectuados para determinar la regulación y el cálculo de los conductores.

Tabla 16. Cálculos de regulación y tipo de conductor

Tramo	resistividad (p)	0,019608	1,19	2#2 THW AWG
1	corriente (i)	92		
	longitud (L)	8,4		
	sección transversal (s)	67,24		
	tensión (V)	37,84		
Tramo	resistividad (p)	0,019608	0,79	2#6 THW AWG
2	corriente (i)	52		
	longitud (L)	3,9		
	sección transversal (s)	26,6		
	tensión (V)	37,84		
Tramo	resistividad (p)	0,019608	0,68	2#4 THW AWG
3	corriente (i)	69		
	longitud (L)	4		
	sección transversal (s)	42,28		
	tensión (V)	37,84		
Tramo	resistividad (p)	0,019608	0,34	2#6 THW AWG
4	corriente (i)	69		
	longitud (L)	1		
	sección transversal (s)	21,14		
	tensión (V)	37,84		

Tramo	constante de regulación (kg)	144,602	1,95	1#6 THW AWG
5	corriente (i)	8,5		
	longitud (L)	110		
	tensión (V)	120		

Calculo de ductería para el sistema fotovoltaico.

Apoyándonos en la figura 22 “Tabla C9. Número máximo de conductores y alambres de aparatos en tubo conduit rígido de PVC Schedule 80 (según la Tabla 1, Capítulo 9)” se determina el tipo de tubería a utilizar, (la tubería esta embebida en concreto entre 75 y 90 cm de profundidad)

Figura 22. Tabla C9 Número máximo de conductores y alambres de aparatos en tubo conduit rígido de PVC.

Letras de tipo	Sección transversal del conductor		Tamaño comercial mm pulgadas												
	mm ²	AWG kemil	16 ½	21 ¾	27 1	36 1 ¼	41 1 ½	53 2	63 2 ½	78 3	91 3 ½	103 4	129 5	155 6	
RH	2,08	14	4	8	13	23	32	55	79	123	166	215	341	490	
	3,30	12	3	6	10	19	26	44	63	99	133	173	274	394	
RHH, RHW, RHW-2	2,08	14	3	5	9	17	23	39	56	88	118	153	243	349	
	3,30	12	2	4	7	14	19	32	46	73	98	127	202	290	
RH, RHH, RHW, RHW-2	5,25	10	1	3	6	11	15	26	37	59	79	103	163	234	
	8,36	8	1	1	3	6	8	13	19	31	41	54	85	122	
	13,29	6	1	1	2	4	6	11	16	24	33	43	68	98	
	21,14	4	1	1	1	3	5	8	12	19	26	33	53	77	
	26,66	3	0	1	1	3	4	7	11	17	23	29	47	67	
	33,62	2	0	1	1	3	4	6	9	14	20	25	41	58	
	42,20	1	0	1	1	1	2	4	6	9	13	17	27	38	
	53,50	1/0	0	0	1	1	1	3	5	8	11	15	23	33	
	67,44	2/0	0	0	1	1	1	3	4	7	10	13	20	29	
	85,02	3/0	0	0	1	1	1	3	4	6	8	11	17	25	
	107,21	4/0	0	0	0	1	1	2	3	5	7	9	15	21	
	126,67	250	0	0	0	1	1	1	2	4	5	7	11	16	
	152,01	300	0	0	0	1	1	1	2	3	5	6	10	14	
	177,34	350	0	0	0	1	1	1	1	3	4	5	9	13	
	202,68	400	0	0	0	0	1	1	1	3	4	5	8	12	
	253,35	500	0	0	0	0	1	1	1	2	3	4	7	10	
304,02	600	0	0	0	0	0	1	1	1	3	3	6	8		
354,69	700	0	0	0	0	0	1	1	1	2	3	5	7		
380,02	750	0	0	0	0	0	1	1	1	2	3	5	7		
405,38	800	0	0	0	0	0	1	1	1	2	3	4	7		
506,70	1000	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	4	5		
633,38	1250	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	3	4		
760,05	1500	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	4		
886,73	1750	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	3		
1013,4	2000	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	3		

Fuente: CODIGO ELECTRICO COLOMBIANO NTC 2050

A continuación se presentan en la tabla 17 el tipo de ductería empleada en el sistema fotovoltaico

Tabla 17. Calculo de ductería para conductores del sistema fotovoltaico.

Tramo			Conductores	Ductería PVC
	Inicio	Fin		
1	Módulos Panel	Regulador	2# 2 TW AWG	φ 1"
2	Regulador	Baterías	2# 6 TW AWG	φ 3/4"
3	Regulador	B3	2# 4 TW AWG	φ 3/4"
4	Regulador	Inversor	2# 6 TW AWG	φ 3/4"
5	Inversor	B4	1# 6 TW AWG	φ 1/2"

Calculo de protecciones para el sistema fotovoltaico.

A continuación se muestra en la tabla 18 el valor de las protecciones que se debe utilizar, esto basándonos en un aproximado ya que no está contemplado dentro de los objetivos del proyecto.

Tabla 18. Valor recomendado para instalación de las protecciones.

Tramo			Conductores	Protecciones
	Inicio	Fin		
1	Módulos Panel	Regulador	2# 2 TW AWG	<=92 A
2	Regulador	Baterías	2# 6 TW AWG	<=52 A
3	Regulador	B3	2# 4 TW AWG	<=69 A
4	Regulador	Inversor	2# 6 TW AWG	<=69 A
5	Inversor	B4	1# 6 TW AWG	<=55 A

Figura 23. Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico.

