



# POSGRADOS

## MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

RPC-SO-30-No.508-2019

OPCIÓN DE  
TITULACIÓN:

ARTÍCULO PROFESIONAL DE ALTO NIVEL

TEMA:

DIMENSIONAMIENTO DE UNA MICRORRED CON  
ENERGÍAS RENOVABLES INCORPORANDO ENERGÍA  
TERMOSOLAR

AUTOR:

RICHARD RODRIGO TORRES LEONES

FERNANDO RUBÉN VÉLEZ BALDA

DIRECTOR:

GARY OMAR AMPUÑO AVILÉS

GUAYAQUIL - ECUADOR  
2023

**Autor(es):**



***RICHARD RODRIGO TORRES LEONES***

Ingeniero en Eléctrico Mecánica con mención en Gestión Empresarial Industrial

Candidato a Magister en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Universidad Politécnica Salesiana, Sede Guayaquil.

[rtorres12@est.ups.edu.ec](mailto:rtorres12@est.ups.edu.ec)

[torresleones1978@hotmail.es](mailto:torresleones1978@hotmail.es)



***FERNANDO RUBÉN VÉLEZ BALDA***

Ingeniero en Eléctrico Mecánica con mención en Gestión Empresarial Industrial

Candidato a Magister en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Universidad Politécnica Salesiana, Sede Guayaquil.

[fvelezb@est.ups.edu.ec](mailto:fvelezb@est.ups.edu.ec)

[ruben\\_velez\\_electric@hotmail.com](mailto:ruben_velez_electric@hotmail.com)

**Dirigido por:**



***GARY OMAR AMPUÑO AVILÉS***

Ingeniero en Electrónica con mención en Sistemas Industriales

Magister en Automatización y Control Industrial

Doctor en Energías Renovables

Universidad Politécnica Salesiana, Sede Guayaquil.

[gampuno@ups.edu.ec](mailto:gampuno@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

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

**DERECHOS RESERVADOS**

©2023 Universidad Politécnica Salesiana.

GUAYAQUIL – ECUADOR – SUDAMÉRICA

RICHARD RODRIGO TORRES LEONES

FERNANDO RUBÉN VÉLEZ BALDA

**DIMENSIONAMIENTO DE UNA MICRORRED CON ENERGÍAS RENOVABLES INCORPORANDO ENERGÍA TERMOSOLAR**

# Dimensionamiento De Una Microrred Con Energías Renovables Incorporando Energía Termosolar

Richard Rodrigo Torres Leones  
 Universidad Politécnica Salesiana  
 Guayaquil, Ecuador  
[rtorresl2@est.ups.edu.ec](mailto:rtorresl2@est.ups.edu.ec)

Fernando Rubén Vélez Balda  
 Universidad Politécnica Salesiana  
 Guayaquil, Ecuador  
[fvelezb@est.ups.edu.ec](mailto:fvelezb@est.ups.edu.ec)

Gary Omar Ampuño Avilés  
 Universidad Politécnica Salesiana  
 Guayaquil, Ecuador  
[gampuño@ups.edu.ec](mailto:gampuño@ups.edu.ec)

**Resumen**—Se realizó un estudio para dimensionar un sistema híbrido autónomo en la Isla de San Cristóbal de las Islas Galápagos, Ecuador, con el objetivo de abastecer de energía de manera sostenible a los habitantes. Se incorporó una fuente renovable, la energía solar térmica, utilizando la herramienta para resolver problemas de optimización de diseño de SIMULINK (SDO) de MATLAB. El enfoque se basó en recopilar datos de consumo de energía de los habitantes de años anteriores. Estos datos se utilizaron para establecer variables como son, carga, producción de energía eléctrica renovable y se estableció una función objetivo que representará el rendimiento del sistema híbrido autónomo en términos de suministro de energía y uso de recursos. Se aplicaron tres algoritmos de optimización: Genético, Hipercubo Latino y Nelder-Mead. Los resultados mostraron que el algoritmo de Nelder-Mead logró la mayor optimización, suministrando 11,690,000 kWh/año de energía. Sin embargo, se observó que se requería una mayor cantidad de baterías, lo que resultó en un estado de carga del 33.72%. El estudio concluye que el sistema híbrido autónomo dimensionado con energía solar térmica logró una optimización significativa en el suministro de energía. El algoritmo de Nelder-Mead demostró ser el más efectivo en este sentido. Sin embargo, es importante tener en cuenta el mayor uso de baterías necesario para lograr este rendimiento. Estos resultados son relevantes para la implementación de sistemas híbridos autónomos en áreas protegidas como las Islas Galápagos, donde se busca reducir el impacto ambiental y promover el uso de fuentes de energía renovable.

**Palabras claves**—Optimización, SIMULINK, MATLAB, Variables y Algoritmos.

## Glosario de términos

Término	Definición
AG	Algoritmo Genético.
BAT	Estado de la Batería.
CF	Combustibles Fósiles.
CI	Combustión Interna.
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono.
DCS	Sistema Colector Distribuido.
DG	Generadores a Diésel.
DSS	Subestación de Distribución.
ELECGALAPAGOS	Empresa Eléctrica de las Galápagos.
EO	Energía Eólica.
ESS	Sistema de Almacenamiento de Energía.
FMAM	Fondo para el Medio Ambiente Mundial.
FO	Función Objetivo.
FV	Fotovoltaico.
GEI	Gases de Efecto Invernadero.
HOMER	Optimización Híbrida de Múltiples Recursos Energéticos.
ISC	Isla San Cristóbal.
LH	Algoritmo de Hipercubo Latino.
MAE	Ministerio del Ambiente.
MATLAB	Laboratorio de Matrices.

NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio.
NDC	Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional.
NM	Algoritmo de Nelder – Mead.
PA	Plomo-Ácido.
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
PV	Potencia Nominal del Módulo FV.
SCF	Campo de Colectores Solares.
SDO	Optimización del Diseño de Simulink.
SGE	Sistema de Gestión de Energía.
SH	Sistema Híbrido.
SIMULINK	Herramienta de MATLAB para Simular el Comportamiento de los Sistemas Dinámicos.
SOC	Estado de Carga.
ST	Solar Térmica.
WT	Potencia Eléctrica del Aerogenerador.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos, la comunidad científica advierte que se está presentando un crecimiento acelerado en la concentración de GEI, que comúnmente son producidos por una mala acción de los seres humanos. Esto se considera un gran problema que debe ser tratado rápidamente, tal como se indica en el 'Acuerdo de París' [1], donde se propone mitigar el calentamiento global a al menos 2°C y preferiblemente a 1.5°C para reducir los efectos del cambio climático. El objetivo es satisfacer la demanda de energía eléctrica y reducir el consumo de energías no renovables, a fin de reducir las emisiones de GEI. Ecuador reafirmó su incorporación al 'Acuerdo de París' en 2017 [2], y presentó por primera vez las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) en 2019.

Hoy en día, es evidente el uso excesivo de los combustibles fósiles mediante la implementación de centrales térmicas, y esta acción ocasiona daños irreparables a las generaciones futuras debido a la contaminación del aire con las emisiones de CO<sub>2</sub>, como lo afirma el 'Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente' [3].

El autor Tarasov A. [4] llevó a cabo un estudio metodológico para la descarbonización de un sistema energético aislado, con el fin de obtener energía para zonas remotas y rurales en diferentes partes del mundo. Por otro lado, el trabajo realizado por los autores Nema et al. [5] indica que el suministro de energía y la satisfacción de la demanda de un gran número de usuarios se pueden lograr mediante la implementación de sistemas híbridos autónomos, utilizando energía eólica y fotovoltaica.

Los Planes Nacionales del Estado Ecuatoriano, a través del Ministerio del Ambiente y del Agua (MAE), abordan dos

puntos: adaptación y mitigación. La mitigación se refiere a las políticas y tecnologías que permiten reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de los GEI. En este sentido, las autoridades, a través del MAE, han implementado programas como "Socio Bosque" y "Bosque Páramo", además de impulsar políticas para reducir la dependencia de las centrales térmicas en favor de fuentes de energía renovables como la hidroeléctrica, la energía eólica, la energía fotovoltaica y la energía termosolar [6]. Por ello, el Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025 [7] asume que la forma ideal de vivir implica la preservación de la diversidad cultural, la felicidad y el cuidado del medio ambiente, cuya relación se deriva de los recursos naturales y la biodiversidad [8].

Con el fin de lograr un desarrollo sostenible para el año 2030, se siguen las pautas establecidas en [9]. Como indican los autores Viebahn et al. [10], solo a partir de la década de 1990 los países y las comunidades internacionales comenzaron a asumir compromisos cuantitativos concretos para reducir las emisiones que contribuyen al cambio climático. Para lograrlo, se utiliza la tecnología solar térmica, tal como afirman los autores [11-13].

En España, las plantas termosolares han adquirido protagonismo en la última década, contando con medio centenar de instalaciones en diferentes provincias, que en conjunto aportan un total de 2303.9 MW [14-15].

En 2018, la generación anual de energía fue de 4423.86 MWh, y la provincia de Badajoz fue la que más contribuyó, con 1268.221 MWh, representando el 29% de la energía solar térmica.

La energía solar térmica también se utiliza en lugares aislados, como islas que no tienen acceso a las redes eléctricas continentales. El objetivo de esta investigación es plantear un estudio para el dimensionamiento de una microrred con energías renovables, incorporando la fuente de energía solar térmica como recurso renovable para abastecer de energía en la ISC. Esta energía será suministrada por una generadora de energía solar térmica de 1 MW. La microrred propuesta en esta investigación combinará diferentes fuentes renovables, como la energía eólica, la energía fotovoltaica y la energía de generadores diésel, junto con la implementación de la fuente de energía solar térmica. La investigación está organizada de la siguiente manera: Sección 2: Estado del Arte; Sección 3: Materiales y Métodos; Sección 4: Resultados; y Sección 5: Conclusiones de la investigación, junto con sus respectivas referencias bibliográficas.

## II. ESTADO DEL ARTE

A nivel mundial existen publicaciones enfocadas en el dimensionamiento adecuado de sistemas de generación de microrredes. El objetivo de estos estudios es determinar medidas óptimas para implementar energías renovables en sistemas de generación distribuida.

Proyectos realizados por los autores Maccari et al., como por ejemplo del de Archimedes ubicadas en la Isla Sicilia del país de Italia maneja una capacidad de 4.72 MWe y que ocupa 14 hectáreas para satisfacer la demanda de una cierta cantidad de usuarios [16-17] y el proyecto de Lucas et al, de la planta Holaniku en Keahole Point ubicada en el Estado de Hawai del país de Estados Unidos, logra manejar una capacidad de 2 MWe y ocupa 1.8 hectáreas [18], son ejemplos de centrales de generación de energía solar térmica funcionales que contribuyen a la obtención de energía y calefacción, reduciendo el consumo de combustibles fósiles. En

comunidades aisladas, remotas o insulares, el desarrollo de infraestructuras energéticas es un desafío, y los recursos convencionales deben ser transportados repetidamente para satisfacer la demanda a través del uso de combustibles fósiles en generadores diésel. Por esta razón, las comunidades insulares están invirtiendo en fuentes locales de energía con el fin de reducir el impacto medioambiental autóctono y minimizar los costos de la electricidad. Un ejemplo de esto son las Islas Galápagos, ubicadas a 1000 km de la costa de Ecuador, conocidas y apreciadas por su fauna y biodiversidad únicas [19].

El archipiélago está compuesto por 19 islas, pero solo 5 están habitadas. Baltra y Santa Cruz son las únicas islas lo suficientemente cercanas geográficamente como para compartir una red eléctrica, conectadas a través de un cable submarino, mientras que Floreana, Isabela y la ISC tienen redes eléctricas independientes. En todas las islas, solo el 15% de la energía eléctrica proviene de fuentes renovables, siendo la energía eólica la principal fuente en Baltra y la ISC. Con una población de aproximadamente 35,000 personas en las islas y una tasa de crecimiento demográfico entre el 3% y el 7%, junto con el aumento del turismo en los últimos años, se espera un incremento en el consumo de electricidad. Esto requerirá un aumento en la capacidad de generación, y el 'Plan Maestro de Electricidad' [20] prevé un aumento del 40% para el año 2025 en comparación con 2016. Por esta razón, numerosas compañías eléctricas ven estas islas como una oportunidad de negocio para satisfacer la demanda en horas pico. Trabajos realizados por los autores Lata et al. [21], así como también por los autores Kaviani et al. [22], han logrado obtener configuraciones adecuadas que integran métodos de optimización mediante sistemas híbridos con energías renovables, como la hidroeléctrica y la energía fotovoltaica. Otra área de optimización es la distribución eficiente de la demanda, es decir, mejorar el rendimiento de cada sistema de generación en función de los factores meteorológicos y la carga o descarga.

## III. MATERIALES Y METODOLOGÍA

El estudio se centra en el dimensionamiento de plantas de energía solar térmica (ST) y en el diseño de sistemas híbridos (SH) que incorporan energías renovables. Se utilizan diversos materiales en esta investigación, y se emplean diferentes tipos de algoritmos en los modelos de evaluación de la generación energética. Estos modelos se implementan utilizando el programa de simulación SIMULINK de MATLAB.

### A. Modelo de los componentes del SH.

Antes de abordar el dimensionamiento del sistema híbrido (SH) propuesto para la microrred, es necesario analizar los modelos dinámicos que se utilizarán en la simulación. Dadas las características específicas de la microrred, se implementarán modelos de generación de energía fotovoltaica (FV), eólica (EO), generadores diésel con combustión interna (DG de CI) y modelos de generación de energía solar térmica (ST) en conjunto con sistemas de almacenamiento de energía (DCS).

#### 1) Modelización de módulos FV.

Un módulo fotovoltaico (FV) está compuesto por un conjunto de células FV que se conectan en serie y en paralelo. Los diferentes fenómenos eléctricos que se generan en la salida del módulo FV son causados por la diferencia de potencial y

la corriente eléctrica que se produce mediante la conversión de la radiación solar. Actualmente, los módulos FV son uno de los equipos de energía renovable más utilizados debido a sus características, como su capacidad para disipar el calor presente en el interior de las células, su aislamiento eléctrico externo, su facilidad de limpieza e instalación, y su alta rigidez mecánica [23]. Para la implementación de un sistema híbrido (SH) con módulos FV, es importante conocer la potencia suministrada por los dispositivos (PPV) en kW.

El modelo dinámico de los paneles FV incorpora la predicción solar, como se muestra en trabajos realizados por los autores [24-25], donde se evalúan modelos empíricos para obtener un valor estimado de la radiación solar global diaria. También se incorporan datos meteorológicos, como la longitud, latitud, altitud, duración de la insolación, índice de luminosidad, humedad, presión atmosférica, temperatura, meses del año, nubosidad, velocidad del viento, radiación difusa y presión atmosférica.

La ecuación (1) muestra la potencia de salida del generador FV.

$$P_{PV} = P_{PV, rated} \cdot d_r \cdot \left( \frac{G_T}{G_{T, STC}} \right) \quad (1)$$

Donde la potencia nominal de los módulos FV es  $P_{PV, rated}$  medida en kW, el factor de escala es  $d_r$  y es adimensional, la radiación incidente es  $G_{T, STC}$  donde es necesario que la unidad sea constante con un valor de  $1 \text{ kW/m}^2$ , la radiación solar incidente en el sistema FV es  $G_T$  y su unidad es  $\text{kW/m}^2$ .

### 2) Modelado de turbinas EO.

La energía eólica es generada por aerogeneradores que aprovechan la energía cinética del viento para producir electricidad.

Esta forma de energía, conocida como energía eólica (EO) se ha vuelto la fuente renovable más económica y es compatible con los programas de conservación del medio ambiente. Muchos países han implementado programas y ofrecen incentivos para promover esta tecnología.

La ecuación (2) muestra la potencia producida por una central eólica [26].

$$P_{WT} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \theta) \quad (2)$$

Donde  $P_{WT}$  es la potencia eléctrica a la salida del aerogenerador medida en W,  $A$  es la superficie en  $\text{m}^2$  que traspasa el flujo de aire,  $\rho$  es la densidad del aire en  $\text{kg/m}^3$ ,  $C_p$  es el coeficiente de rendimiento de la turbina EO,  $v$  es la velocidad del viento  $\text{m/s}$ ,  $\lambda$  es la velocidad específica y  $\theta$  es el ángulo formado entre la pala y la dirección de la  $\lambda$  [27-28]. El aerogenerador opera con una velocidad de rotor variable, ajustando el ángulo de las palas para adaptarse a diferentes velocidades del viento.

Cuando la velocidad del viento supera el valor nominal, el aerogenerador funciona a potencia constante mediante el ajuste del ángulo de las palas.

Esto permite optimizar el rendimiento y la eficiencia del aerogenerador en diversas condiciones de viento.

### 3) Modelado de batería.

En sistemas fotovoltaicos (FV), es común utilizar baterías de ácido-plomo (PA) debido a sus ventajas, especialmente cuando se combinan con sistemas eólicos (EO). Sin embargo, es importante tener en cuenta el estado de funcionamiento normal de la batería, ya que resulta difícil predecir cuándo se extraerá o suministrará energía a la misma.

La batería de ácido-plomo (PA) se caracteriza principalmente por su Estado de Carga (SOC, por sus siglas en inglés). Sin embargo, no todos los Sistemas de Almacenamiento Energético (ESS, por sus siglas en inglés) son adecuados, ya que pueden experimentar pérdidas durante los procesos de carga y descarga, así como durante los períodos de almacenamiento.

En un momento determinado, la batería (BAT) está relacionada con el SOC, el consumo de energía y el estado de producción del sistema híbrido (SH) durante un intervalo de tiempo ( $t-1$ ) a ( $t$ ).

La potencia total generada por los aerogeneradores (WT) y los paneles solares (PV) en el tiempo  $t$  se puede calcular mediante la ecuación (3).

$$P_g = P_{WT} + P_{PV} \quad (3)$$

Durante el tiempo de carga, cuando la producción total de las unidades WT y FV es superior a la carga, la capacidad disponible del banco de baterías en el tiempo  $t$  puede obtenerse mediante lo indicado por los autores Mehrbankhomartash et al. [29], en la cual implementaron la ecuación (4).

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1-\sigma) + \left[ E_g(t) - \frac{E_L(t)}{\eta_{inv}} \right] \eta_{b(c,f)} \quad (4)$$

Donde  $SOC(t)$  y  $SOC(t-1)$  son los niveles asignados de la carga del banco de baterías en los momentos ( $t$ ) y ( $t-1$ ) (en kWh),  $\sigma$  es la tasa de autodescarga horaria,  $E_g$  es la energía generada y  $E_L$  es la demanda de carga en kWh, mientras que  $\eta_{inv}$  es la eficiencia del inversor. A su vez,  $\eta_{bc}$  y  $\eta_{bf}$ ; son aquellos estados de la batería que pueden estar en carga y descarga respectivamente. Los estudios realizados por otros investigadores como [30-31] proporcionan información sobre la autodescarga de las baterías de PA, donde se detalla que la autodescarga es del 25% durante 6 meses para una temperatura de almacenamiento de  $20^\circ\text{C}$ , lo que equivale a un 0.14% diario.

### 4) Modelado del DG.

Los sistemas híbridos (SH) que se componen únicamente de sistemas renovables, como módulos FV y turbinas EO, son vulnerables a condiciones climáticas adversas, como días nublados o falta de viento. Para garantizar el suministro eléctrico en estas condiciones, es necesario incorporar otro tipo de energía, como un generador diésel (DG). La puesta en marcha o parada del DG se controla mediante estrategias de desacoplamiento y el estado de carga de las baterías. La función objetivo (FO) del sistema se define mediante los valores asignados a cada fuente de energía renovable, como EO y FV, así como el comportamiento del consumo de energía de las baterías y las cargas. Una estrategia básica para iniciar la operación del DG es el seguimiento de potencia, que se determina utilizando la ecuación (5).

$$P_{DG} = P_{WT} + P_{PV} - P_L - P_{BAT} \quad (5)$$

Si el valor resultante de la ecuación (5) se encuentra fuera del rango de los valores máximos y mínimos establecidos en la función objetivo asignada, no será posible satisfacer la carga dentro del sistema híbrido (SH) únicamente con las fuentes de energía renovable. En este caso, será necesario utilizar el generador diésel (DG) para complementar la potencia total requerida. El modelo del DG se basa en la tasa de consumo de combustible (CF), así como en la velocidad y potencia mecánica de salida del motor [32]. La ecuación (6) describe las características mecánicas y eléctricas que influyen en el modelo del DG, donde  $P_{Dm}$  representa la potencia mecánica asignada al motor diésel.

$$P_{Dm} = V_H \frac{\omega_m}{\pi K} p_k \quad (6)$$

Donde;  $p_k$  es la presión media efectiva real del motor,  $V_H$  es el volumen total de carrera del motor y su unidad es  $m^3$ ,  $\omega_m$  es la velocidad del motor de combustión y su unidad es  $rad/s$ ,  $K$  es el valor numérico de las carreras o también conocido como los tiempos del motor a diésel.

### 5) Modelado termosolar.

Los modelos de campos con energía solar térmica (ST), descritos en investigaciones anteriores [33-36], constan de varios componentes, incluyendo un sistema de captación de radiación solar (SCF), tanques de almacenamiento térmico, una turbina accionada por vapor, un sistema de generación de vapor y un generador diésel (DG) convencional. En el SCF, la radiación solar se utiliza para calentar un fluido, elevando su temperatura y almacenando la energía térmica para su uso tanto durante el día como durante la noche.

El objetivo es generar vapor utilizando esta energía térmica, que luego se utiliza para accionar las turbinas en un sistema de generación de energía eléctrica. El vapor acciona las turbinas, que están conectadas a un generador eléctrico, generando así electricidad que se inyecta a la red eléctrica, especialmente durante los períodos de alta demanda. Esta combinación de componentes, el SCF y el sistema de generación de vapor, se conoce como Sistema de Concentración Solar y Generación de Potencia (DCS), y se representa mediante la ecuación (7).

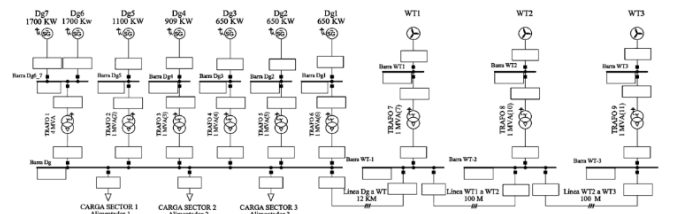
$$P(T_{out}) = I_r \cdot K_{opt} \cdot n_o \cdot G - \left( 1.12 \cdot \left( \frac{T_{out} + T_{in}}{2} \right) - T_a \right) \cdot L \cdot nope \cdot \eta_{alm} \cdot \eta_{PCS} [W_e] \quad (7)$$

Donde  $I_r$  es la radiación solar en  $W/m^2$ ,  $K_{opt}$  es la eficiencia óptica,  $G$  es la apertura del colector en  $m$ ,  $T_{in}$  es la temperatura de entrada,  $T_{out}$  es la temperatura de salida y  $T_a$  es la temperatura ambiente, y la unidad de todas las temperaturas es  $^{\circ}C$ ,  $L$  es la longitud de la línea de tuberías en  $m$ ,  $nope$  es el número de lazos operativos,  $\eta_{alm}$  es la eficiencia de almacenamiento térmico elegida y la conversión de energía ST a eléctrica se define como  $\eta_{PCS}$ .

### B. Problema de estudio: Análisis de la incorporación de la energía ST de concentración en los sistemas eléctricos de la ISC, Galápagos – Ecuador.

El estudio se centra en el dimensionamiento de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica para abastecer a las

viviendas de los habitantes de la Isla San Cristóbal (ISC), que forma parte de las Islas Galápagos en Ecuador. La ISC está ubicada a 960 km al oeste de la costa continental y se compone de 19 islas y 200 islotes volcánicos con una superficie total de 8010 km<sup>2</sup> [37]. Las Islas Galápagos son reconocidas a nivel mundial por su importancia en términos de ecosistemas y biodiversidad, ya que el 96% de su territorio es un parque nacional que alberga numerosas especies vegetales y animales endémicas. Con el objetivo de reducir el uso de combustibles fósiles (CF), [38] inició un proyecto de electrificación en la ISC bajo los auspicios del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Parte de este proyecto fue la instalación de un parque eólico (EO) de 2.4 MW en la ISC [39-40], compuesto por tres aerogeneradores de 800 kW cada uno (WT1, WT2 y WT3) [41]. Este parque eólico cubre aproximadamente el 37% de la demanda eléctrica de la isla [42]. La figura 1 muestra el diagrama eléctrico unifilar de las redes eléctricas de la ISC [43-44], que tiene una potencia efectiva de 7.35 MW [45-46]. La central eléctrica convencional de la ISC consta de tres unidades generadoras síncronas de 813 kVA (DG1, DG2 y DG3), cada una acoplada a un motor diésel. Estas unidades inyectan la energía eléctrica generada a las barras trifásicas con un nivel de 13.2 kV de la Subestación de Distribución Secundaria (DSS), desde donde se distribuye la energía a diferentes puntos de consumo en la isla.

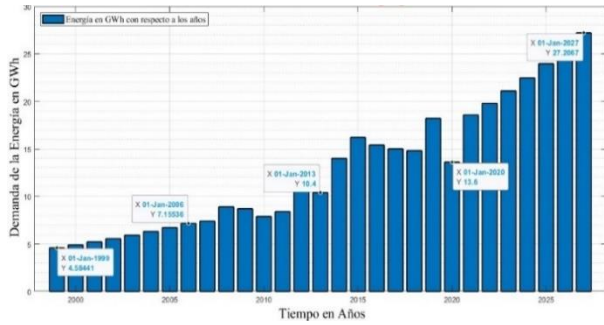


**Fig. 1.** Diagrama unifilar de las redes eléctricas de la ISC – Galápagos – Ecuador.

En el año 2018, la población de la ISC era de 7,475 habitantes y se contabilizaban aproximadamente 700 vehículos de combustión interna (CI). Según el estudio mencionado en [47], se estima que se consumieron alrededor de 100,000 galones de diésel y 800,000 galones de gasolina en ese año en la isla.

La demanda eléctrica de los 3,000 clientes registrados en la empresa eléctrica ELECGALAPAGOS se estima en 9.40 GWh anuales, como se menciona en trabajos anteriores como [48-49]. De esa demanda, aproximadamente el 67% fue cubierto por los generadores térmicos. Además, se registra un consumo de 500,000 galones de diésel al año en los grupos electrógenos que utilizan motores de combustión interna, según se afirma en la "Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2017" [50]. Según el informe "Resumen Ejecutivo de Rendición de Cuentas 2017" [51] de la empresa ELECGALAPAGOS, se proyecta que para el año 2027, la demanda eléctrica alcanzará los 27.20 GWh, lo que representa un aumento de 5.93 veces en comparación con el

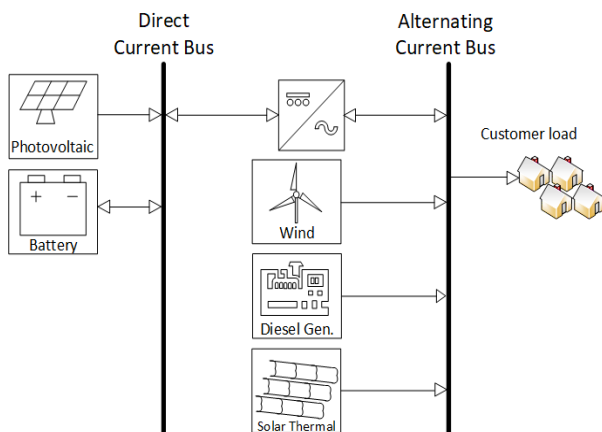
registro de 1999, que fue de 4.58 GWh. Esta proyección se muestra en la figura 2.



**Fig. 2.** Estimación de la energía anual de la ISC – Galápagos – Ecuador. (Enero 1999 – Octubre 2027).

### 1) Microrred en la ISC, que incorpora plantas de energía solar.

Las microrredes de la ISC están conformadas por generadores basados en energías limpias, como FV, EO y ST. Estas fuentes sustentan la energía proveniente de la generación hidroeléctrica o de motores de CI, y se ubican en áreas aisladas, como islas a las que no llegan las líneas eléctricas. Un ejemplo de esto es la ISC, donde parte del componente de energía renovable que ingresa al WT<sub>1-3</sub> es a través de aerogeneradores comerciales. La curva especificada para este modelo es detallada por los autores Ochoa et al. [52]. Además, esta información se emplea en programas de simulación de energía renovable, describiendo la "Velocidad del viento de conexión" como la velocidad del viento más baja con el fin de producir energía en el aerogenerador, y la "Velocidad del viento de corte" indicando la velocidad máxima del viento donde la potencia eléctrica  $P_{(WT,máx)}$  alcanza los 800 kW. Se interconectan 2 sistemas de energía FV a las redes de energía, específicamente en el área de distribución de ELEGALAPAGOS en baja tensión. El primer arreglo tiene una potencia de 5.1 kW y está instalado en la "Escuela Pedro Pablo Andrade", y el segundo arreglo tiene una potencia de 2.5 kW y está en la "Sala de control" de los aerogeneradores. Entre los dos arreglos, suman un total de 12.5 kW, tal como afirman en [53-54]. En esta investigación se diseña una microrred incorporando energía ST tal como está detallada en la figura 3, la microrred proveerá de energía eléctrica en la ISC a los diversos consumidores tomando en consideración la estimación de la energía mostrada en la figura 2.



**Fig. 3.** Propuesta de diseño del SH.

### 2) Incorporación de energía ST en el SH.

Uno de los principales retos según los indicadores de desarrollo mundial [55-57], es revertir el elevado indicador de concentración de GEI generados comúnmente por los CF que son aplicados en la generación eléctrica y procesos industriales.

Y, de acuerdo con el "Balance Energético Nacional 2021" [58], las emisiones de GEI han producido hasta ese año 38 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>. Con esto se prevé encontrar diferentes formas de cómo generar energía limpia o con menor afectación al medio ambiente [59-60]. Una de las tecnologías que mayor impacto ha tenido en Europa son las plantas termo solares o DCS con almacenamiento térmico. Trabajos como [61-63] describen la implementación de energía ST en combustión con calderas de carburante o gas para reducir las muestras de emisiones de CO<sub>2</sub>. Con este enfoque, la investigación realizada describe el calentamiento de fluidos mediante colectores solares con el fin de calentar fluidos como el aceite o el agua y, por ende, obtener energía. La energía ST se utiliza para calefacción o producción de vapor para generadores eléctricos.

Los investigadores [64-65], detallan cuales son los colectores solares más utilizados, tales como: de placa plana, parabólicos compuestos, de tubo de vacío, de canal parabólico, de lente de Fresnel, de disco parabólico y heliostatos.

### C. Optimización del SH

El enfoque de optimización consiste en minimizar la función de coste de operación en función de los requisitos energéticos de la carga L, así como de las restricciones operativas del DG y el DCS, para este estudio no se tienen en cuenta los costes de funcionamiento diarios del DCS, PV y WT, por lo que sólo se considera el coste del combustible consumido, por ende, la tarea principal del algoritmo de control desarrollado, es reducir al mínimo el coste de funcionamiento del DG y maximizar el uso del DCS, FV y WT durante el proceso de la obtención de energía.

La no linealidad en la fluctuación de la demanda de la carga L y la curva del consumo de los CF que emiten los DG, así como los límites de operación del DCS han sido considerados en el modelo desarrollado para el caso del SH de la ISC, dado que encontrar una óptima solución ha sido un gran dilema, por este motivo se emplean los valores estimados mostrados en la figura 2.

Para estimar las medidas, se formuló un problema de optimización utilizando la SDO de MATLAB, trabajos de investigación como los mostrados en [66-68] donde se puede apreciar el uso de la herramienta SDO para encontrar los puntos óptimos de diversos SH con la implementación de energías renovables y no renovables en microrredes.

El SDO ajusta los diversos indicadores, los cuales pueden ser valores asignados a variables que son de diseño, con el fin de satisfacer las diferentes restricciones que son especificadas en el modelo, así como también los objetivos.

La formulación exacta de la optimización depende del método de optimización utilizado, como el AG [69], el LH [70] y el NM [71].

### 1) Problema de optimización.

En esta investigación, el objetivo es encontrar el valor óptimo del costo de operación del SH propuesto, que está compuesto

por los DG, el DCS y las unidades de aerogeneradores para la EO y los sistemas FV, con la incorporación de la energía ST. Se busca optimizar este costo de operación durante las 24 horas del día.

El SH se plantea como un flujo de potencia, sin importar si la generación proviene de fuentes renovables o combustibles. Toda la potencia generada llega a una barra designada y se suministra a la demanda de los usuarios. Por lo tanto, se establece que la potencia generada  $P_G$  debe ser mayor que la potencia demandada  $P_L$ , como se muestra en la ecuación (8). Esto implica una restricción en el sistema, donde el balance de la suma de las potencias generadas, tanto renovables como no renovables, debe ser mayor que la suma de las demandas, como se expresa en la ecuación (9).

$$P_G \geq P_L \quad (8)$$

$$\sum P_{Gr} \geq \sum P_L \quad (9)$$

Para cada generador, se satisfacen las funciones de costo  $CP_G$  de la ecuación (10).

$$CP_G = aP_G^2 + bP_G + c \quad (10)$$

Donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son las propiedades del generador. El siguiente problema de optimización se resuelve planteando una FO dada por la ecuación (11).

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{i=1}^{n_{Gr}} (aP_{Gr(i)}^2 + bP_{Gr(i)} + c) \\ & + \sum_{i=1}^{m_{Gnr}} (aP_{Gnr(i)}^2 + bP_{Gnr(i)} \\ & + c) + \sum_{k=1}^{o_{Bess}} C_k P_{Bat} \end{aligned} \quad (11)$$

Sujeto a:

$$\sum P_{Gr} + \sum P_{Gnr} + \sum P_{Bat} \geq P_L \quad (12)$$

$$\sum P_{Gr}^{carat.} \leq P_{Gr}^{max} \quad (13)$$

$$\sum P_{Gnr}^{carat.} \leq P_{Gnr}^{max} \quad (12)$$

$$\sum P_{Bat}^{carat.} \leq P_{Bat}^{max} \quad (13)$$

Donde *carat.* son las variables meteorológicas y las características de los generadores, *Gnr* se establece como la generación de energías renovables, *max* es la potencia máxima instalada, *Gr* es la generación con energías renovables, y por último *n* es la cantidad numérica de los DG.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el desarrollo de este estudio, se supone que la demanda de energía de la carga PL es satisfecha por el sistema DCS. Cuando el DCS es capaz de proporcionar suficiente energía para abastecer la carga, no se requiere energía adicional.

En este caso, la energía eléctrica generada en exceso se acumula y se almacena como energía ST.

Sin embargo, cuando el DCS no puede satisfacer completamente la demanda de energía de la carga PL, se recurre a la energía adicional proveniente de los sistemas WT y PV, que aprovechan el viento y la radiación solar, respectivamente.

Estos sistemas complementan la energía suministrada por el DCS. Si incluso con la contribución de los sistemas WT y PV la demanda de energía PL no puede ser totalmente satisfecha, se recurre al sistema de DG como último recurso.

Este sistema se activa para equilibrar la escasez de energía y garantizar que los consumidores o usuarios de las diversas viviendas tengan la energía que necesitan.

El diagrama en la figura 4 ilustra cómo se lleva a cabo el procedimiento de simulación y optimización en este contexto.

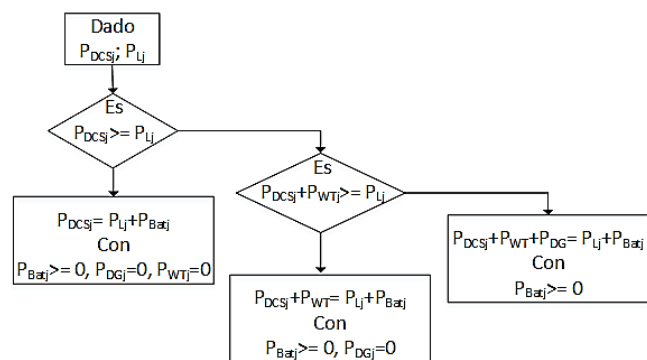


Fig. 4. Esquema del procedimiento de la simulación y su respectiva optimización.

Donde;  $P_{DCS}$  es la potencia suministrada por el DCS,  $P_L$  es la potencia consumida o demandada por los usuarios,  $P_{Bat}$  es la potencia que los colectores almacenan o entregan al SH,  $P_{WT}$  es la potencia procedente por los aerogeneradores y  $P_{DG}$  es la potencia suministrada por los DG.

La solución del problema de optimización consiste en encontrar los valores ideales de los parámetros estimados establecidos como la potencia a entregar por cada sistema de generación o el número de dispositivos que componen los sistemas, las variables para optimizar, en el sistema FV es la cabida de potencia  $P_{Pv}$ .

El sistema WT es el número de aerogeneradores que funcionarán  $N_{WT}$ , con las potencias renovables sumadas y haciendo la diferencia con la potencia demandada  $P_L$  se establece la cantidad de baterías  $N_{Bat}$  del ESS necesarias para alimentar el sistema. Por último, es necesario conocer la cantidad de generadores de combustión  $N_{DG}$  que deben funcionar para entregar potencia al sistema en caso de condiciones atmosféricas irregulares que disminuyan la potencia de todo el sistema eléctrico conformado por energía renovable y tradicionales.

Se definen indicadores numéricos iniciales mostrados en la Tabla 1,  $P_{Pv}$  es la potencia base FV de 950 kW,  $P_{WT}$  es la potencia base del sistema EO de 800 kW,  $P_{Bat}$  es la potencia base de las baterías de 330 kWh y  $P_{DG}$  es la potencia base del grupo generador de combustión de 1700 kW.



**Tabla 1.** Los datos de las variables ingresan al SDO considerando un aumento en el campo de la batería del ESS.

Sistema de generación	Valor inicial (kW)	Restricciones Mínimo (kW)	Restricciones Máximo (kW)
WT	800	800	2400
DG	1700	1700	9759
PV	950	100	950
DCS	1000	1000	1000

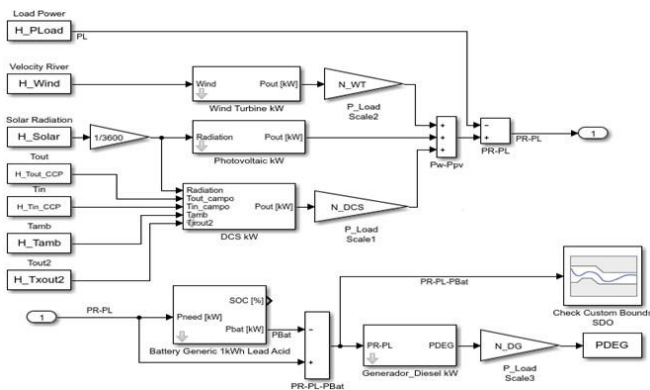
  

Variable por optimizar	Valor inicial (kW)	Restricciones Mínimo (kW)	Restricciones Máximo (kW)
$N_{DG}$	2	1	7
$N_{Bat}$	5000	660	7000
$P_{PV}$	952	100	952
$N_{WT}$	3	0	3

Las restricciones propuestas se basan en la potencia y el tamaño de la infraestructura requerida para cada sistema. Debido a la reserva de flora y fauna en la ISC y otras islas del archipiélago de las Galápagos, no se pueden realizar construcciones o edificaciones que afecten el entorno natural. El modelo de investigación se presenta en la figura 5, que muestra un sistema completo.

En el bloque "Comprobar límites personalizados" del SDO (Optimización Distribuida Secuencial), se ingresan los parámetros como las potencias y el número de elementos de cada sistema, tal como se ha mencionado en párrafos anteriores.

Este bloque se encarga de verificar las restricciones y limitaciones establecidas en el sistema para garantizar su funcionamiento óptimo.



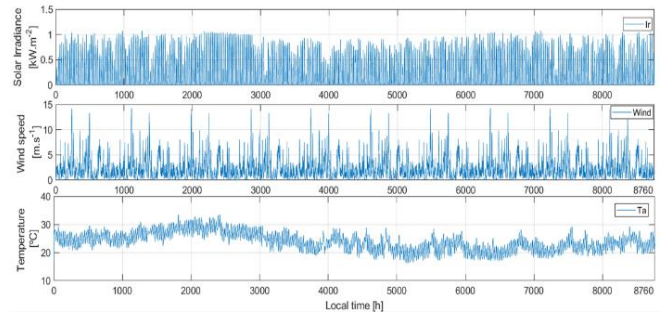
**Fig. 5.** Diagrama de bloques implementados en el SDO.

Existen programas comerciales que proporcionan los valores numéricos de los datos de entrada y generan hojas de datos que se pueden importar a la interfaz de MATLAB para su análisis con los algoritmos de optimización.

La figura 6 muestra datos meteorológicos reales, como la irradiancia solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento, registrados en intervalos de una hora durante todo un año de 365 días.

Estos valores numéricos se obtienen mediante la exportación de datos a través del programa HOMER, respaldado por los datos numéricos proporcionados por la NASA.

Estos datos son fundamentales para realizar el análisis y la simulación de la generación de energía en el sistema propuesto.



**Fig. 6.** Valores numéricos de la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la radiación aplicadas en las simulaciones del SH.

El campo DCS, el generador FV y el sistema de aerogeneradores utilizan los valores asignados como entrada, los cuales se detallan a continuación; H\_Solar, H\_Wind y H\_Tamb con el fin de simular y lograr una eficiente optimización del sistema.

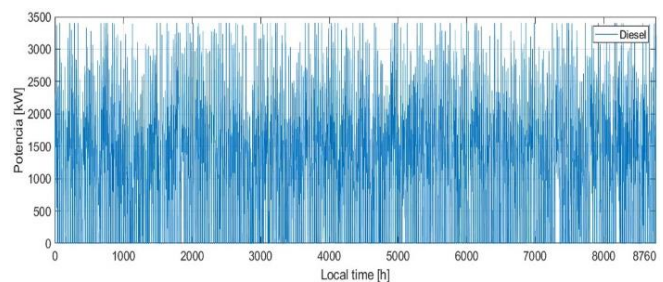
#### A. Resultados de la simulación del caso de estudio y su discusión.

La electrificación en la Isla de San Cristóbal (ISC) en las Galápagos, Ecuador, ha enfrentado dificultades debido a los desafíos geográficos asociados con las redes de distribución y transmisión de energía.

Para abordar estos problemas, la simulación con el algoritmo propuesto busca resolverlos mediante la implementación de energía termosolar. El diseño del dimensionamiento técnico en esta investigación se realiza utilizando el método de búsqueda de patrones SDO, que se describe en detalle en las Tablas 2a y 2b.

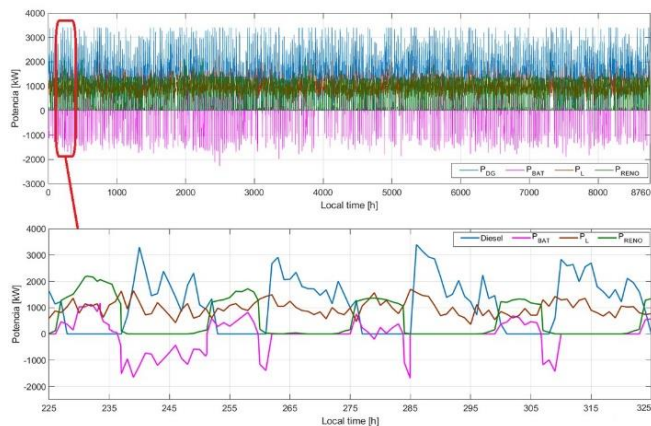
Este método implica ajustar diversos valores y parámetros utilizando diferentes métodos de optimización disponibles en la herramienta SDO, como AG, LH y NM. La Tabla 2a muestra los valores numéricos resultantes de los módulos del sistema híbrido (SH) durante los 365 días de un año calendario, teniendo en cuenta los métodos de optimización implementados. La figura 7 detalla el funcionamiento del grupo generador de combustión (DG) en el sistema.

El objetivo de esta investigación es encontrar la configuración óptima del sistema híbrido que permita satisfacer la demanda de energía de la ISC de manera eficiente y sostenible, teniendo en cuenta las limitaciones y los desafíos asociados con la ubicación geográfica de la isla.



**Fig. 7.** Funcionamiento del DG.

En la figura 8 se ilustran las curvas resultantes de la potencia del DG, la curva de las baterías del ESS, la curva de la energía consumida por la carga y las curvas de las energías renovables en las simulaciones del SH que incorporan la energía ST.



**Fig. 8.** Curvas resultantes de la potencia del DG, las baterías del ESS, la demanda de carga y las energías renovables en las simulaciones del SH.

El siguiente análisis se basa en el caso 2, donde se examina cómo el sistema de baterías ESS logra suministrar energía eléctrica a los usuarios durante las horas de la noche.

**Tabla 2. a)** Resultados de los casos del dimensionamiento optimizado aplicando la herramienta SDO en los subsistemas.

<b>Caso 1. Sistema de baterías del ESS con capacidad de almacenamiento de 660 kW.</b>			
Variable por optimizar	AG	LH	NM
$N_{DG}$	2.25	2.20	2
$N_{Bat}$	353.49	431.06	660
$N_{WT}$	2.97	2.99	2.5
$P_{PV}$ (kW)	362.86	199.09	952
<b>Caso 2. Sistema de baterías del ESS considerado para suplir de energía por la noche.</b>			
Variable por optimizar	AG	LH	NM
$N_{DG}$	6	3	2
$N_{Bat}$	4938	4691	6536
$N_{WT}$	1	1	1
$P_{PV}$ (kW)	274	556	440

**Tabla 2. b)** Resultados optimizados por año con la herramienta de SDO de cada subsistema.

<b>Caso 1. Sistema de baterías del ESS con capacidad de almacenamiento de 660 kW.</b>			
Variable por optimizar	AG	LH	NM
Energía WT (kWh/año)	4700000	4576000	3374000
DG (kWh/año)	15500000	15790000	15290000
Potencia PV (kWh/año)	4550000	2799000	5916000
DCS (kWh/año)	27020000	28240000	17840000
Capacidad Batería (kWh)	-903	-1102	-1633
Batería media SOC (%)	361	362.8	263.8
Mínimo de batería SOC (%)	19.78	19.25	19.36
<b>Caso 2. Sistema de baterías del ESS considerado para suplir de energía por la noche.</b>			
Variable por optimizar	AG	LH	NM
Energía WT (kWh/año)	550000	555800	545100000
DG (kWh/yr)	38080000	16600000	11690000
Potencia PV (kWh/año)	1013000	1802000	1491000
DCS (kWh/año)	6092000	5497000	5618000
Capacidad Batería (kWh)	-123900	-12420	-16530
Batería media SOC (%)	67.66	70.49	66.8
Mínimo de batería SOC (%)	30.48	30.72	33.72

En el caso 2, se analiza cómo el sistema de baterías ESS puede suministrar energía eléctrica a los usuarios durante las

horas de la noche. Utilizando el algoritmo NM, la energía suministrada es de 11,690,000 kWh/año, como se muestra en la Tabla 2b. Después de utilizar los tres algoritmos con el SDO, se observa que la batería alcanza un nivel de carga SOC del 30.48% con el AG, del 30.72% con el LH y del 33.72% con el NM. En conclusión, el algoritmo NM optimiza el sistema para reducir el uso del grupo de DG, pero requiere una mayor cantidad de baterías en comparación con los 2 algoritmos.

## V. CONCLUSIONES

La implementación de sistemas de energía autónomos en áreas protegidas o aisladas, como se demostró en este estudio, se ha vuelto económicamente más viable con el tiempo y contribuye a la reducción de la huella de carbono. Estos sistemas también son confiables y, con el avance de las nuevas tecnologías, pueden incluso inyectar energía durante la noche mediante el uso de sistemas solares térmicos con un buen almacenamiento y la incorporación de sistemas de baterías. Los algoritmos implementados han demostrado que el sistema es capaz de suministrar energía limpia y segura, reduciendo la dependencia de los generadores de combustión. Esto muestra que la propuesta es segura a pesar de la variabilidad de las condiciones meteorológicas. Además, se tuvo en cuenta la restricción de dimensionar las instalaciones de acuerdo con la protección de las áreas silvestres, minimizando el impacto en la Isla de Santa Cruz (ISC) al construir los sistemas de energía solar térmica (ST), energía fotovoltaica (FV) y el sistema de distribución de carga (DCS). La herramienta de optimización SDO utilizada en MATLAB mostró un aumento en el uso de las baterías para satisfacer la demanda de energía de los habitantes de la ISC. Además, el algoritmo NM ofreció una mejor utilización de los generadores de combustión en comparación con los otros dos algoritmos. Para concluir y finalizar la investigación propuesta, se deben realizar estudios adicionales sobre el sistema de gestión de energía (SGE) para lograr una correcta integración de las fuentes de energía renovables y no renovables en el sistema de energía autónomo.

## REFERENCIAS

- [1] FAO en Ecuador, “¿Qué es el Acuerdo de París y cuál es el vínculo que tiene con la Contribución Determinada a Nivel Nacional?,” Apr. 20, 2020.
- [2] Ministerio del Ambiente del Ecuador, “Primera Contribución Determinada a nivel nacional para el Acuerdo de París bajo la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático,” Quito, Ecuador, 2019.
- [3] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, “Las emisiones de CO2 rompen otro récord: un calentamiento global catastrófico amenaza el planeta,” 2020.
- [4] A. Tarasov, “A Methodological Approach to the Decarbonization of an Isolated Energy System,” Oct. 2020.
- [5] P. Nema, R. K. Nema, and S. Rangnekar, “A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 8, pp. 2096–2103, Oct. 2009.
- [6] Gobierno del Ecuador, “Programa Socio Bosque,” Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2022.
- [7] UNESCO, “Plan Nacional De Desarrollo "Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025",” *Fundamentos de Finanzas Públicas*, 2021.
- [8] Consejo Nacional de Planificación, “Plan de Creación de Oportunidades 2021 2025,” Quito, Ecuador, 2021.
- [9] Asamblea General, “Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015,” 2015.
- [10] P. Viebahn, Y. Lechon, and F. Trieb, “The potential role of concentrated solar power (CSP) in Africa and Europe—A dynamic assessment of technology development, cost development and life cycle inventories until 2050” *Energy Policy*, vol. 39, no. 8, pp. 4420–4430, 2011.
- [11] Y. Cui, H. Zhang, S. Huang, and B. Xu, “An Optimization Method Based on Time-Sharing Energy Complementation to Determine Transmission Capacity of Wind-CSP Plants Combined System” in 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), May 2019, pp. 1901–1906.
- [12] Y. Ma, Q. Zhou, D. Wang, Y. Chen, and S. Yang, “Optimal Configuration of Multienergy Capacity Based on Complementary Characteristics of Wind, Solar, Hydro, Thermal, and Battery Energy” in 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Oct. 2020, pp. 97–102.
- [13] L. Zhao, X. Wang, X. Cui, and P. Xu, “Research on Reliability Evaluation of Power Generation System with Solar Thermal Power” in 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Jun. 2020, pp. 356–360.
- [14] F. Dinter and L. Möller, “A review of Andasol 3 and perspective for parabolic trough CSP plants in South Africa” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1734, no. May 2016.
- [15] Asociación Española para la Promoción de la Industria Termosolar, “Mapa de proyectos en España – PROTERMOSOLAR” 2019.
- [16] A. Maccari et al., “Archimede Solar Energy molten salt parabolic trough demo plant: a step ahead towards the new frontiers of CSP” *Energy Procedia*, vol. 69, pp. 1643–1651, 2015.
- [17] A. Maccari, S. Donnola, F. Matino, and S. Tamano, “Archimede solar energy molten salt parabolic trough demo plant: Improvements and second year of operation” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1734, 2016.
- [18] F. Lucas, and M. Pons, “Solar thermal electricity at small and medium scale: an opportunity for the tropical island La Réunion Solar Thermal Electricity at Small and Medium Scale : an Opportunity for the Tropical Island La Réunion” no. September, 2012.
- [19] N. Frons Dahl and P. Singh, “Investigating increased renewable energy penetration on San Cristobal Island in the Galapagos archipelago” in 2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Jul. 2021, pp. 1–5.
- [20] O. R. Llerena-Pizarro, R. P. Micena, C. E. Tuna, and J. L. Silveira, “Electricity sector in the Galapagos Islands: Current status, renewable sources, and hybrid power generation system proposal” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 108. Elsevier Ltd, pp. 65–75, Jul. 01, 2019.
- [21] J. Lata-García, F. Jurado, and L. M. Fernández-Ramírez, “Optimal hydrokinetic turbine location and techno-economic analysis of a hybrid system based on photovoltaic”
- [22] A. K. Kaviani, G. H. Riahy, and S. H. M. Kouhsari, “Optimal design of a reliable hydrogen-based stand-alone wind / PV generating system, considering component outages” *Renew. Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 2380–2390, 2009.
- [23] M. J. Castañeda Balbuena, “Dimensionamiento, modelado y control de los componentes de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica basado en energías renovables e hidrógeno” p. 1, 2013.
- [24] V. H. Quej, J. Almorox, M. Ibrakhimov, and L. Saito, “Estimating daily global solar radiation by day of the year in six cities located in the Yucatán Peninsula, Mexico” *J. Clean. Prod.*, vol. 141, pp. 75–82, 2017.
- [25] S. Mohanty, P. K. Patra, and S. S. Sahoo, “Prediction and application of solar radiation with soft computing over traditional and conventional approach – A comprehensive review” *Renew. Sustan. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 778–796, 2016.
- [26] J. M. Enrique, E. Durán, M. Sidrach-De-Cardona, J. M. Andújar, M. A. Bohórquez, and J. Carretero, “A new approach to obtain I-V and P-V curves of photovoltaic modules by using DC-DC converters” *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, no. 1, pp. 1769–1772, 2005.

- [27] Yang H, Lu L, Zhou W. A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system. *Sol Energy* 2007;81(1):76–84.
- [28] El Azzaoui K, Mahmoudi M, Boudaraia H. Backstepping control of wind and photovoltaic hybrid renewable energy systems. *Int J Power Electron Drive Syst* 2016;7(3):677–86.
- [29] M. Mehrbankhomartash, M. Rayati, A. Sheikhi, and A. M. Ranjbar, “Practical battery size optimization of a PV system by considering individual customer damage function” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 36–50, 2017.
- [30] Markvart T, Fragaki A, Ross JN. PV system sizing using observed time series of solar radiation. *Sol Energy* 2006;80(1):46–50.
- [31] Dürr M, Cruden A, Gair S, McDonald JR. Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system. *J Power Sources* Oct. 2006;161(2):1400–11.
- [32] S. Roy, O. P. Malik, and G. S. Hope, “Adaptive control of speed and equivalence ratio dynamics of a diesel driven power-plant” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 8, no. 1, pp. 13–19, Mar. 1993.
- [33] J. D. Gil, G. Ampuño, M. Berenguel, L. Roca, and J. E. Normey-Rico, “Apparent delay analysis for a flat-plate solar field model designed for control purposes” *Sol. Energy*, vol. 177, no. November 2018, pp. 241–254, 2018.
- [34] G. Ampuño, J. Lata-Garcia, and F. Jurado, “Evaluation of energy efficiency and the reduction of atmospheric emissions by generating electricity from a solar thermal power generation plant” *Energies*, vol. 13, no. 3, 2020.
- [35] G. Ampuño, L. Roca, M. Berenguel, J. D. Gil, M. Pérez, and J. E. Normey-Rico, “Modeling and simulation of a solar field based on flat-plate collectors” *Sol. Energy*, vol. 170, 2018.
- [36] G. Ampuño, J. Lata-García, and F. Jurado, “Modeling of a solar thermal power generation plant for the coastal zones through the TRNSYS program” *Electr. Eng.*, 2020.
- [37] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, “Atlas del sector Eléctrico Ecuatoriano” Quito, Pichincha, Ecuador, pp. 1–168, 2017.
- [38] I. Nacional de Preinversión, “Proyecto: Plan de Mejoramiento y Actualización del Sistema de Generación Eléctrica en el Archipiélago de Galápagos – Fase I.” Quito, Pichincha, Ecuador, 2013.
- [39] Stantec, “Proyecto eólico San Cristóbal” 2019.
- [40] The wind power, “Parques eólicos - San Cristobal (Ecuador)” 2019.
- [41] The Wind Power, “Fabricantes y aerogeneradores Made AE-59” 2019.
- [42] E. Rosero and B. Chilinguina, “Observatorio de Energías Renovables en América Latina y el Caribe” 2011.
- [43] R. B. O. G. J. Heredia, “Optimal Operation of Isolated Power System San Cristobal” no. 14, pp. 110–121, 2018.
- [44] M. Santander, C. Gallardo, and P. Zambrano, “Diseño y construcción de un sistema de compensación reactiva para reducción del consumo de combustible diésel en la generación térmica de la isla San Cristóbal Galápagos” *Escuela Politécnica Nacional*, 2019.
- [45] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, “Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano” Quito, Pichincha, Ecuador, 2016.
- [46] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, “Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2017” Quito, Pichincha, Ecuador, pp. 1–200, 2017.
- [47] FCD, PNG, and Galápagos Consejo de Gobierno de, “Informe Galápagos 2009 - 2010” Puerto Ayora, Galápagos, Ecuador, 2010.
- [48] Empresa Eléctrica Provincial Galápagos S.A, “Rendición de cuentas ELECGALAPAGOS 2016” Puerto Ayora, Galápagos, Ecuador, 2016.
- [49] ELECGALAPAGOS, “Consumo de energía Eléctrica” Puerto Ayora, Galápagos, Ecuador, 2017.
- [50] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, “Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2017” Quito, Pichincha, Ecuador, 2017.
- [51] ELECGALAPAGOS, “Resumen Ejecutivo de Rendición de Cuentas 2017” Puerto Ayora, Galápagos, Ecuador, 2018.
- [52] D. Ochoa and S. Martinez, “Proposals for enhancing frequency control in weak and isolated power systems: Application to the wind-diesel power system of San Cristobal Island-Ecuador” *Energies*, vol. 11, no. 4, pp. 1–25, 2018.
- [53] K. Revelo, “Diseño de una Microrred en el parque nacional galápagos - San Cristóbal (Pto. Baquerizo Moreno)” *Universidad de Las Américas*, 2019.
- [54] E. P. Alto, “Abastecimiento De Energía a Una Desaladora En Las Islas Galápagos Modeling of Hybrid Systems To Supply Energy To a Desalination Plant in the Galapagos Islands” vol. 5, no. 2, pp. 89–95.
- [55] R. Rasiah, A. Q. Al-Amin, A. Ahmed, W. Leal, and E. Calvo, “Climate mitigation roadmap: assessing low carbon scenarios for Malaysia” *J. Clean. Prod.*, vol. 133, pp. 272–283, 2016.
- [56] J. C. M. Pires, “COP21: The algae opportunity?” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. February, pp. 867–877, 2017.
- [57] C. Mcinerney and L. Johannsdottir, “Lima Paris Action Agenda: Focus on Private Finance e note from” *J. Clean. Prod.*, vol. 126, pp. 707–710, 2016.
- [58] Ministerio de Energía y Minas de la República del Ecuador, “Balance Energético Nacional 2021”.
- [59] G. Rajgor, “Greater acceleration of renewables required to meet COP21 goal” *Reinf. Plast.*, vol. 17, no. 5, pp. 175–177, 2016.
- [60] RHC European Technology Platform, “Common Implementation Roadmap for Renewable Heating and Cooling Technologies” 2014.
- [61] R. J. Fuller, “Solar industrial process heating in Australia e Past and current status” vol. 36, pp. 216–221, 2011.
- [62] J. Michael, G. Wolfgang, F. Mollenbruck, and M. Monnigmann, “Plant-wide control of a parabolic trough power plant with thermal energy storage” in *The International Federation of Automatic Control*, 2014, pp. 419–425.
- [63] V. Drosou, L. Valenzuela, and A. Dimoudi, “A new TRNSYS component for parabolic trough collector simulation simulation” *Int. J. Sustain. Energy*, pp. 1–21, 2016.
- [64] Y. Tian and C. Y. Zhao, “A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications” *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 538–553, 2013.
- [65] A. Alsharkawi and J. A. Rossiter, “Distributed Collector System: Modelling, Control and Optimal Performance Key words” no. 13, pp. 1–6, 2015.
- [66] J. P. Torreglosa, P. García-Triviño, L. M. Fernández-Ramírez, and F. Jurado, “Control based on techno-economic optimization of renewable hybrid energy system for stand-alone applications” *Expert Syst. Appl.*, vol. 51, pp. 59–75, 2016.
- [67] P. Gopi and P. Linga, “A Robust Decentralized Controller Design for Interconnected Power System with Random Load Perturbations using SDO Software” *Procedia Technol.*, vol. 21, pp. 406–414, 2015.
- [68] J. Lata-García, C. Reyes-Lopez, F. Jurado, L. M. Fernández-Ramírez, and H. Sanchez, “Sizing optimization of a small hydro/photovoltaic hybrid system for electricity generation in Santay Island, Ecuador by two methods” 2017 *Chil. Conf. Electr. Electron. Eng. Inf. Commun. Technol. CHILECON 2017 - Proc.*, vol. 2017-January, pp. 1–6, 2017.
- [69] A. Nunez, “Hybrid systems in electrical distribution design with genetic algorithm” *Minerva*, vol. 1, no. 1, pp. 32–42, 2020.
- [70] M. Abyani and M. R. Bahaari, A comparative reliability study of corroded pipelines based on Monte Carlo Simulation and Latin Hypercube Sampling methods, *Int. J. Pressure Vessels Piping*, 2020.
- [71] A. Navid, S. Khalilarya and M. Abbasi, Diesel engine optimization with multiobjective performance characteristics by non-evolutionary Nelder–Mead algorithm: Sobol sequence and Latin hypercube sampling methods comparison in DoE process, *Fuel*, 2018.