



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA
Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**DESPACHO ECONÓMICO AMBIENTAL MEDIANTE EL
ALGORITMO DE POLINIZACIÓN DE FLORES APLICADO A
LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

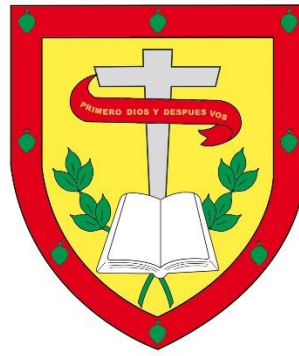
AUTOR: JOSÉ ENRIQUE AGUILAR BARROS.

DIRECTOR: ING. DANIEL ICAZA ÁLVAREZ MSc.

CUENCA - ECUADOR

2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO.



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad al servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE ELECTRICIDAD.

**DESPACHO ECONÓMICO AMBIENTAL MEDIANTE EL
ALGORITMO DE POLINIZACIÓN DE FLORES APLICADO A
LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR: JOSÉ ENRIQUE AGUILAR BARROS.

DIRECTOR: ING. DANIEL ORLANDO ICAZA ÁLVAREZ MSc.

CUENCA- ECUADOR

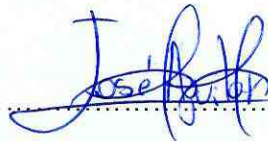
2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

José Enrique Aguilar Barros portador de la cédula de ciudadanía N° 0705648657. Declaro ser el autor de la obra: "Despacho económico ambiental mediante el algoritmo de polinización de flores aplicado a los sistemas eléctricos de potencia", sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 16 de enero de 2023



José Enrique Aguilar Barros.

0705648657

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por José Enrique Aguilar Barros, bajo mi supervisión.



Ing. Daniel Icaza Álvarez MSc.

DIRECTOR

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi familia especialmente a mis padres Orlando Aguilar y Piedad Barros, ya que han sido el pilar fundamental para cumplir este sueño, quienes con su apoyo incondicional hoy estoy logrando mis metas, gracias a sus consejos y su paciencia han hecho de mí una mejor persona.

A mis compañeros y profesores quienes hicieron este trayecto mucho más ameno.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por culminar esta etapa de mi vida, de igual manera hago partícipe de este agradecimiento a la Universidad Católica de Cuenca y a todos los docentes que me brindaron sus conocimientos durante mi formación académica, especialmente al Ing. Daniel Icaza Álvarez MSc. quien me instruyó y estuvo a mi lado guiando este proyecto final.

Agradezco a mi familia y a todas las personas que fueron parte de este sueño, por el apoyo brindado durante mis años universitarios, por estar presentes en esta etapa de mi vida y en todo momento buscando lo mejor para mi persona.

RESUMEN

El despacho económico ambiental es un tema de suma importancia para el trabajo del sistema eléctrico de potencia. Debido a que contiene varias restricciones y es de tipo multiobjetivo no lineal es necesario emplear técnicas metaheurísticas para solventar este problema. En este sentido el presente documento emplea el algoritmo de polinización de flores para solucionar esta problemática. Para validar el algoritmo, el presente documento evalúa el algoritmo en un sistema de verificación de 10 generadores. Se realiza tres casos de estudio, el primer caso corresponde al sistema en condiciones iniciales que otorga electricidad mediante 10 unidades de generación de combustibles fósiles, el segundo caso es la implementación de 2 fuentes de generación renovable, para el tercer caso se evalúa el algoritmo en el sistema de subtransmisión eléctrica de la “Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.” (CENTROSUR), ubicada en Cuenca, Ecuador. Se realizan análisis con la inserción de energía renovable parcial y completa a una subestación del sistema, para cada caso de estudio se obtiene los resultados de los parámetros eléctricos del sistema al simularlo, la gráfica de convergencia de la función objetivo, las potencias de cada generador y los valores de costos de combustible y emisiones.

Palabras clave: Despacho económico ambiental, despacho económico, polinización de flores, metaheurísticas, energías renovables.

ABSTRACT

The environmental economic dispatch is a significant issue for electric power system operation. Since it involves several non-linear multi-objective restrictions, it is necessary to use metaheuristic techniques to solve this issue. This paper hereby uses the flower pollination algorithm to overcome this issue. To validate the algorithm, it evaluates the algorithm in a 10-generator verification system. Three study cases are carried out, the first corresponding to the initial conditions of the system that provides electricity through 10 fossil fuel generation units, the second case is the implementation of 2 renewable generation sources, and for the third case, the algorithm is tested in the electrical sub-transmission system of the "Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A." (CENTROSUR), located in Cuenca, Ecuador. Analyses are carried out with the insertion of partial and completely renewable energy to a system substation. For each case study, the results of the electrical parameters of the system —when simulated—, the convergence graph of the objective function, the power of each generator, the values of fuel costs and emissions are obtained.

Keywords: environmental economic dispatch, economic dispatch, flower pollination, metaheuristics, renewable energies.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD	I
CERTIFICACIÓN	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT.....	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABLAS.....	IX
LISTA DE ANEXOS.....	X
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
1. OBJETIVOS	3
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2 ALCANCE	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
CAPÍTULO 2	4
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 DESPACHO ECONÓMICO	4
2.2 DESPACHO ECONÓMICO AMBIENTAL	8
2.3 ENERGÍA SOLAR	9
2.4 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	9
2.5 ENERGÍA EÓLICA	11
2.6 TURBINAS EÓLICAS.....	11
CAPÍTULO 3	13
3. METODOLOGÍA.....	13
CAPÍTULO 4	18
4. EXPOSICIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	18
4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	19
4.2 CASO DE ESTUDIO 1	20
4.3 CASO DE ESTUDIO 2	22
4.4 CASO DE ESTUDIO 3	28
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXOS	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Efecto del punto de válvula	8
Figura 2. Banda de valencia, banda prohibida y banda de conducción: aislante, conductor	10
Figura 3. Celda fotovoltaica	10
Figura 4. Polinización de flores en la naturaleza.	14
Figura 5. Estructura de optimización.	15
Figura 6. Diagrama de flujo del FPA.....	17
Figura 7. Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador.	19
Figura 8. Convergencia de la función objetivo del sistema en condiciones iniciales.....	21
Figura 9. Potencias de los generadores en condiciones iniciales.....	21
Figura 10. Convergencia de la función objetivo del sistema con energía renovable.....	23
Figura 11. Potencias de los generadores con energía renovable.....	24
Figura 12. Convergencia del sistema en condiciones iniciales y con energía renovable	26
Figura 13. Potencias del sistema en condiciones iniciales y con energía renovable	26
Figura 14. Costos de combustible de los casos de estudio	27
Figura 15. Cantidad de emisiones de los casos de estudio	27
Figura 16. Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador.	34
Figura 17. Red de subtransmisión simulada de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador.....	34
Figura 18. Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador con inserción de energía renovable parcial.	37
Figura 19. Red de subtransmisión simulada de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador con inserción de energía renovable parcial.	38
Figura 20. Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador con inserción de energía renovable completa.	41
Figura 21. Red de subtransmisión simulada de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador con inserción de energía renovable completa.	42
Figura 22. Convergencia de la función objetivo del sistema de subtransmisión sin energía renovable	46
Figura 23. Potencias de los generadores del sistema de subtransmisión sin energía renovable	47
Figura 24. Convergencia de la función objetivo del sistema de subtransmisión con energía renovable	49
Figura 25. Potencias de los generadores del sistema de subtransmisión con energía renovable	50
Figura 26. Convergencia de la función objetivo del sistema de subtransmisión con energía renovable en todo el sistema.....	52

Figura 27. Potencias de los generadores del sistema de subtransmisión con energía renovable en todo el sistema	53
Figura 28. Convergencia de los estudios en el sistema de subtransmisión	56
Figura 29. Potencias de los estudios en el sistema de subtransmisión	56
Figura 30. Costos de combustible del sistema de subtransmisión.....	58
Figura 31. Cantidad de emisiones del sistema de subtransmisión	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Algoritmo de polinización de flores	17
Tabla 2. Valor de potencias de los generadores en condiciones iniciales	22
Tabla 3. Combustible y emisiones en condiciones iniciales.....	22
Tabla 4. Valor de potencias de los generadores con energía renovable	24
Tabla 5. Combustible y emisiones con energía renovable.....	25
Tabla 6. Plantas de generación distribuida en el sistema de subtransmisión	28
Tabla 7. Plantas de generación distribuida en el sistema de subtransmisión con la inserción de energía renovable.....	29
Tabla 8. Plantas de generación distribuida en el sistema de subtransmisión con la inserción de energía renovable para todo el sistema.....	29
Tabla 9. Líneas de subtransmisión del sistema	30
Tabla 10. Resultados de la simulación del del sistema de subtransmisión en condiciones iniciales	34
Tabla 11. Resultados de la simulación del del sistema de subtransmisión en con energía renovable parcial	38
Tabla 12. Resultados de la simulación del del sistema de subtransmisión en con energía renovable completa	42
Tabla 13. Valor de potencias de los generadores del sistema de subtransmisión sin energía renovable	47
Tabla 14. Combustible y emisiones del sistema de subtransmisión sin energía renovable ..	48
Tabla 15. Valor de potencias de los generadores del sistema de subtransmisión con dos fuentes de energía renovable	50
Tabla 16. Combustible y emisiones del sistema de subtransmisión sin energía renovable ..	51
Tabla 17. Valor de potencias de los generadores del sistema de subtransmisión con cuatro fuentes de energía renovable	53
Tabla 18. Combustible y emisiones del sistema de subtransmisión sin energía renovable ..	54
Tabla 19. Tabla comparativa de las potencias de los generadores del sistema de subtransmisión	57
Tabla 20. Tabla comparativa de costos de emisiones y combustible de los generadores del sistema de subtransmisión	59

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Características del sistema de 10 generadores.	64
ANEXO B. Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador.	65
ANEXO C. Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado	65
ANEXO D. Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado con resultados	65
ANEXO E. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador.....	65
ANEXO F. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado.....	65
ANEXO G. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado con resultados.....	65
ANEXO H. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable completa de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador.	65
ANEXO I. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable completa de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado	65
ANEXO J. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable completa de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado con resultados.....	65

INTRODUCCIÓN

El despacho económico (DE) se ha convertido en un trabajo importante en la operación y planificación del sistema eléctrico de potencia (SEP). Es difícil de resolver debido a una función objetivo no lineal y una gran cantidad de restricciones [1]. El DE en el SEP se ocupa de la determinación de un programa de generación óptimo de generadores disponibles para que el costo total de generación se minimice mientras se satisfacen todas las restricciones del sistema. Sin embargo, debido a las preocupaciones medioambientales que se derivan de las emisiones producidas por las plantas de energía de combustibles fósiles, el DE que minimiza solo el costo total de combustibles ya no puede considerarse el más eficaz [2]. Así surge la problemática de despacho económico ambiental (DEA) que implica la asignación de la generación entre las unidades generadoras comprometidas a fin de optimizar simultáneamente tanto el costo del combustible como del nivel de emisión, al tiempo que se satisfacen las diversas limitaciones operativas [3].

Las técnicas matemáticas convencionales se vuelven muy complicadas cuando se trata de problemas de despacho cada vez más complejos, y están además limitadas por su falta de solidez y eficiencia en número de aplicaciones prácticas. Por lo tanto, debido a sus particularidades, es necesario una técnica eficiente que otorgue buenas soluciones a los problemas de optimización del DEA. En este contexto, cada vez con mayor frecuencia, las metaheurísticas se emplean para encontrar soluciones a problemas complejos de optimización de DEA [1].

Las metaheurísticas son algoritmos aproximados, heurísticos o de propósito general para resolver problemas de optimización complejos, con variables continuas y/o discretas. La utilización de algoritmos de búsqueda metaheurística ha sido relevante en las últimas décadas debido principalmente al fracaso de los métodos convencionales para resolver problemas combinatorios complejos de optimización continua. En general, las metaheurísticas son idóneas para solucionar casos complejos y/o grandes de un problema de optimización para el que no existe un algoritmo exacto eficiente disponible. En [1] se menciona que los algoritmos metaheurísticos se han validado en la práctica y así se corrobora la eficiencia de estos para solventar problemas no lineales. El número de metaheurísticas propuestas para solucionar el problema de DEA es grande, el presente documento plantea utilizar el algoritmo de polinización de flores (APF) [4], si bien este ya ha sido empleado con anterioridad, el presente documento ha realizado ciertas modificaciones al algoritmo que ayuda que su convergencia sea más rápida, esta modificación radica utilizar un enfoque de factor de penalización de precio modificado, este enfoque permite que el problema de naturaleza multiobjetivo pueda convertirse en una función de objetivo única, así, la resolución de problemas multiobjetivo se

solventarán más rápido otorgando resultados fiables, además de esta modificación se plantea aplicar el APF en sistemas que integren fuentes de energía renovable.

En [5], se menciona que debido al incremento considerable de la demanda en los últimos años existe una probabilidad cada vez más considerable de escasez de los combustibles, ha llevado a los investigadores a emplear con más frecuencia fuentes de energía renovable. En este contexto, para validar el APF, el presente documento evalúa el algoritmo en un sistema de validación de diez generadores. Se realiza tres casos de estudio, el primer caso corresponde al sistema en condiciones iniciales que otorga electricidad mediante 10 unidades de generación de combustibles fósiles, el segundo caso es la implementación de 2 fuentes de generación renovable, la primera será a través de paneles fotovoltaicos y la segundo mediante aerogeneradores, de esta manera, el nuevo sistema a evaluar sería un sistema que posee 8 generadores convencionales y 2 de generación renovable. Para cada caso de estudio se grafica la convergencia de la función objetivo, las potencias de cada generador y además se extrae los valores de costos de combustible y emisiones. También se realiza un tercer caso de estudio donde se evalúa el algoritmo en el sistema de subtransmisión eléctrica de la “Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.” (CENTROSUR), ubicada en Cuenca, Ecuador. Se realizan los mismos análisis con la inserción de energía renovable (fotovoltaica y eólica) en los generadores 13 y 14 correspondientes a la subestación “Descanso” y también con la inserción de energía renovable en toda la subestación “Descanso”, es decir, se agregar 2 fuentes fotovoltaicas y 2 eólicas, así, el generador 12 y 13 aportaran energía mediante fuentes de fotovoltaicas y los generadores 14 y 15 mediante fuentes eólicas.

Este documento está constituido de la siguiente manera: la presente sección es un preámbulo de lo que abordará el documento, además aborda una subsección denominada estado del arte, donde se realiza una revisión literaria de temas que están relacionado con presente proyecto, el capítulo 2 denota la metodología de APF, en el capítulo 3 se realiza el análisis de los resultados de los dos casos de estudio antes mencionados, en el capítulo 4 se indica las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado y por último se tiene la bibliografía utilizada en el presente documento.

CAPÍTULO 1

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Determinar los valores de generación que permiten obtener los costos más bajos de operación con los menores impactos ambientales mediante el algoritmo de polinización de flores

Objetivos específicos

- Establecer las ecuaciones del modelo matemático que relacionan los costos de generación y las emisiones de gases producidos por las centrales de generación.
- Aplicar la metodología a dos casos de estudio para evidenciar el efecto de despacho económico ambiental en cada uno y comparar resultados.

1.2 Alcance

El alcance del documento presente es evaluar el algoritmo de polinización de flores (FPA) en diferentes sistemas de validación. Se realiza tres casos de estudio, el primer caso corresponde al sistema en condiciones iniciales que otorga electricidad mediante 10 unidades de generación de combustibles fósiles, el segundo caso es la implementación de 2 fuentes de generación renovable, la primera será a través de paneles fotovoltaicos y la segunda mediante aerogeneradores, de esta manera, el nuevo sistema a evaluar sería un sistema que posee 8 generadores convencionales y 2 de generación renovable. Para cada caso de estudio se grafica la convergencia de la función objetivo, las potencias de cada generador y además se extrae los valores de costos de combustible y emisiones. También se realiza un tercer caso de estudio donde se evalúa el algoritmo en el sistema de subtransmisión eléctrica de la “Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.” (CENTROSUR), ubicada en Cuenca, Ecuador. Se realizan los mismos análisis con la inserción de energía renovable (fotovoltaica y eólica) en los generadores 13 y 14 correspondientes a la subestación “Descanso” y también con la inserción de energía renovable en toda la subestación “Descanso”, es decir, se agregan 2 fuentes fotovoltaicas y 2 eólicas, así, el generador 12 y 13 aportarán energía mediante fuentes de fotovoltaicas y los generadores 14 y 15 mediante fuentes eólicas.

1.3 Justificación

El incremento de la contaminación ambiental ha despertado el interés de los investigadores de reducirla, dentro del campo de la ingeniería eléctrica este resulta un tema de suma relevancia, ya que, tradicionalmente las centrales operadas de manera convencional afectan sobremanera al medio ambiente con la emisión de gases de efecto invernadero, por ello, es necesario investigaciones que ayuden a reducir estas emisiones sin afectar demasiado la producción de electricidad. En la literatura existen varias maneras de contrarrestar el impacto ambiental en el campo de la ingeniería eléctrica. Así, en el presente trabajo se espera obtener la mejor relación costo-beneficio de los aspectos técnico-económicos y ambientales en la generación de electricidad mediante centrales térmicas, utilizando el algoritmo de polinización de flores

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Despacho económico

En [6] que el despacho económico (DE) es un problema de tipo no lineal que busca satisfacer la demanda con costos de producción reducidos de sus fuentes generadoras en durante un período determinado. Las restricciones para cumplirse de este problema están descritas mediante igualdades y desigualdades que deben solventarse, de esta manera, el despacho económico puede solventarse tomando en consideración ciertos aspectos que serán detallados a continuación:

En [7] se indica función objetivo del DE sin tomar en consideración los efectos de carga de punto de válvula (CPV). En (1) se aprecia la función objetivo del DE sin considerar el efecto CPV

$$\min F_T = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) \quad (1)$$

Donde F_T y $F_i(P_i)$ representan el costo de combustible total y el costo de la i -ésima fuente generadora en $\$/h$ respectivamente. P_i indica la i -ésima potencia saliente en MW, n denota el número de fuentes generadoras; a_i, b_i y c_i denotan los coeficientes de costo de la i -ésima fuente generadora.

El (1) no se toma en consideración efecto CPV, no obstante, en despachos de unidades generadoras de tamaño considerable no se puede despreciar este efecto, ya que, por la

apertura constante de algunas válvulas puede afectar las características de entrada y salida de despacho.

Para incluir el efecto CPV es necesario incluir la no linealidad de orden superior en la ecuación de costos convencional (1). De esta manera, las ecuaciones de DE se tornarían como se indica en (2).

$$\min F_T = \sum_{i=1}^n F_i(P_i), \quad \text{Si } P_i, \min \leq P_i \leq P_i, \max \quad (2)$$

$$\min F_T = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |e_i * \text{sen}(f_i * (p_{i,\min} - p_i))|)$$

Donde e_i y f_i muestran los costos de la i -ésima fuente generadora que denota el efecto CPV. Mientras se minimiza F_T , se debe tomar en consideración las diferentes restricciones del problema de DE, estas restricciones se mencionan a continuación:

2.1.1 Balance de potencia activa

Esta restricción es primordial para el DE. La potencia total generada de todos los generadores debe ser la sumatoria de la demanda y de las pérdidas de la transmisión eléctrica. Esta restricción se muestra en (3).

$$\sum_{i=1}^n (P_i) - (P_{Load} + P_{Loss}) \quad (3)$$

Donde P_{Load} y P_{Loss} denotan la demanda y pérdidas del sistema, respectivamente. Para trabajar con estas pérdidas, generalmente se emplea la matriz B , que utiliza la fórmula de Kron [7] que se aprecia en (4).

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^n B_{i0} P_i + B_{00} \quad (4)$$

Donde B_{ij} , B_{i0} y B_{00} significan el i_j -ésimo elemento del coeficiente de pérdida, el i -ésimo elemento de la pérdida vector de coeficiente, y la constante de pérdida, respectivamente.

2.1.2 Límites de capacidad del generador

Mientras se satisface a la demanda cada generador debe respetar sus límites de operación máximos y mínimos. La ecuación que satisface este requerimiento se aprecia en (5).

$$P_{i, \min} \leq P_i \leq P_{i, \max} \quad (5)$$

Donde $P_{i, \min}$ y $P_{i, \max}$ indican la potencia mínima y potencia máxima de salida de la i -ésima fuente generadora, respectivamente.

2.1.3 Límites de velocidad de rampa del generador

Los generadores en operación deben estabilizarse a los nuevos perfiles de generación cuando existe un cambio repentino en la demanda, esta acción en generadores de tamaño considerable representa un trabajo desafiante, de esta manera, surgen las desigualdades que se aprecian en (6)

$$\begin{aligned} P_i - P_i^0 &\leq UR_i, \text{ cuando la generación aumenta} \\ P_i^0 - P_i &\leq DR_i, \text{ cuando la generación decrementa} \end{aligned} \quad (6)$$

Donde UR_i y DR_i denota el límite de rampa ascendente y descendente de la i -ésima fuente generadora (MW/h) y P_i^0 indica la potencia de salida anterior de la i -ésima fuente generadora. Con la combinación de (5) y (6) se puede determinar el límite de potencia refinada para el i -ésimo generador que se aprecia en (7).

$$\max(P_{i, \min}, P_i^0 - DR_i) \leq P_i \leq \min(P_{i, \max}, P_i^0 + UR_i) \quad (7)$$

2.1.4 Zonas de operación prohibida

En [8], se menciona que para mejorar el DE de un sistema es recomendable no operar en zonas de prohibidas, ya que, puede afectar a diferentes elementos de la máquina. Esta restricción se aprecia en (8).

$$P_i \in \begin{cases} P_i^{\min} \leq P_i \leq P_{i,1}^L \\ P_{i,k-1}^U \leq P_i \leq P_{i,k}^L \quad (k = 2,3, \dots, Nzi) \\ P_{i,Nzi}^U \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (k = Nzi) \end{cases} \quad (8)$$

Donde Nzi es el número de zona de operación prohibida en la curva de costo de la i -ésima fuente generadora, k denota el índice de zona de operación prohibida, $P_{i,k}^L$ y $P_{i,k}^U$ representan el límite inferior y superior de la k -ésima zona prohibida del i -ésimo generador.

2.1.5 Restricción del flujo de potencia

Para evitar sobrecargas en las líneas de transmisión cuando se corre el flujo de potencia, se incluye esta restricción que se aprecia en (9). La sobrecarga de las líneas puede solventarse mediante una correcta compensación reactiva [9], [10].

$$|P_{Lf,k}| \leq P_{Lf,k}^{max} \quad k = 1, \dots, L \quad (9)$$

Donde $P_{Lf,k}$ y $P_{Lf,k}^{max}$ denotan el flujo de potencia activa y el límite superior del flujo de potencia de la línea k respectivamente, y L indica el número de líneas de transmisión.

2.1.6 Limitaciones a la reserva de giro del sistema

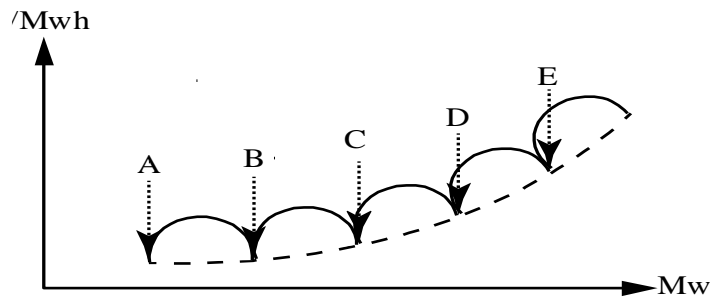
Mediante reservas de giro de los generadores se incrementa la confiabilidad del SEP, en este sentido, la restricción que toma en consideración este punto se indica en (10)

$$\sum_{i=1}^n P_{i,max} \geq P_{Load} + P_{Loss} + R \quad (10)$$

2.1.7 Efecto del punto de válvula en el objetivo de costo de combustible

Con la finalidad de que el costo de combustible de los generadores sea más apegado a la realidad se tiene en consideración el efecto de punto de válvula. El fuerte aumento en las pérdidas debido a los efectos del trefilado que ocurren cuando cada válvula de admisión de vapor comienza a abrirse conduce a la curva de entrada y salida ondulada no lineal [11] como se muestra en la Figura 1. La función de costo obtenida basada en la curva ondulada es más modelado preciso. Por lo tanto, el costo del combustible cada generador se da como la suma de una función cuadrática y una sinusoidal como se aprecia, a continuación.

$$F_t = \sum_{i=1}^D \gamma_i P_i^2 + \beta_i P_i + \alpha_i + e_i * \text{seno}(f_i * (P_i^{min} - P_i)) \quad (11)$$



- | | |
|--------------------|-------------------|
| A: Primera válvula | D: Cuarta válvula |
| B: Segunda válvula | E: Quinta válvula |
| C: Tercera válvula | |

Figura 1. Efecto del punto de válvula

Fuente: Autor

2.2 Despacho económico ambiental

En [12] se expone que las fuentes generadoras convencionales otorgan electricidad mediante la quema de combustibles renovables o no renovables. Cuando el generador comienza a trabajar se emiten impurezas propias del combustible, material particulado, dióxido de azufre (SO_2), óxido de nitrógeno (NO_x) y dióxido de carbono (CO_2), que afectan sobremanera toda forma de vida en el planeta. Por esta razón, es realmente necesario que se controle estas emisiones que afectan la salud de los seres vivos. Para minimizar estos márgenes de contaminación del medio ambiente provocado por las unidades de generación convencionales, se plantea emplear una estrategia de despacho económico que toma en consideración las variables de emisiones, además, de respetar las restricciones propias del despacho convencional. Esta estrategia es conocida como despacho económico ambiental (DEA).

En [11] se indica que los contaminantes causados por las fuentes generadoras convencionales pueden modelarse por separado. Sin embargo, existe una ecuación general que toma en consideración la emisión total de todos estos contaminantes, esta ecuación se aprecia en (12).

$$E(P_G) = \sum_{i=1}^N 10^{-2} (\alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2) + \zeta_i \exp(\lambda_i P_{Gi}) \quad (12)$$

Donde α_i , β_i , γ_i , ζ_i y λ_i son coeficientes de las características de emisión del i -ésimo generador.

La optimización del costo de generación ha sido formulada en base a DEA clásico con restricciones de emisión y flujo de línea. El problema detallado se da de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } F = \sum_{i=1}^N (F_i(P_i), E_i(P_i)) \quad (13)$$

El valor mínimo de la función objetivo anterior debe encontrarse sujeto a las restricciones de igualdad y desigualdad dadas por las ecuaciones (3) y (5). El problema DEA de doble objetivo se convierte en un problema de optimización simple introduciendo un factor de penalización de precio h como sigue [6].

$$\text{Minimizar } F = F_t + h + E_t \quad (14)$$

Sujeto a las restricciones dadas por las ecuaciones (3) y (5). El factor de penalización de precio h , que es la relación entre el costo máximo de combustible y la emisión máxima del generador correspondiente en $\$/\text{kg}$ [1], combina la emisión con el costo de combustible, luego F es el costo operativo total en $\$$.

$$h_i = \frac{F_t(P_i^{max})}{E_t(P_i^{max})}, i = 1, 2, 3, \dots, d \quad (15)$$

2.3 Energía solar

El sol es una fuente importante de energía gratuita e inagotable para el ser humano. Actualmente, se están empleando nuevas tecnologías para generar electricidad a partir de la energía solar recolectada. Estas tecnologías ya han sido validadas como una opción viable para sustituir a las fuentes de energías convencionales. Teóricamente, la energía solar tiene el potencial para cubrir la demanda eléctrica del mundo [13]. Casi cuatro millones de exajulios ($1 \text{ EJ} = 10^{18} \text{ J}$) de energía solar llegan a la tierra anualmente, 10^4 EJ de los cuales se afirma que son fácilmente cosechables. A pesar de este enorme potencial y del aumento de la concienciación, la contribución de la energía solar al suministro energético mundial sigue siendo insignificante [14]. Por ello, se estima que la adopción de tecnologías solares reducirá los problemas asociados con la seguridad energética, el cambio climático, el desempleo, etc. También se anticipa que su uso jugará un papel importante dentro del sector del transporte en el futuro, ya que no requiere ningún transporte de combustible [15].

2.4 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica (PV) representa una de las tecnologías renovables más empleadas, para mantener ese ritmo, se han producido nuevos desarrollos en lo que respecta a la utilización de materiales, diseño y mejoras de dispositivos, con el objetivo de optimizar esta tecnología [16].

Esta energía puede ser definida como el proceso de conversión de energía solar a electricidad [17]. Para lograr esta conversión es necesario la utilización de materiales semiconductores que contienen bandas energéticas (valencia y conducción), ver la Figura 2.

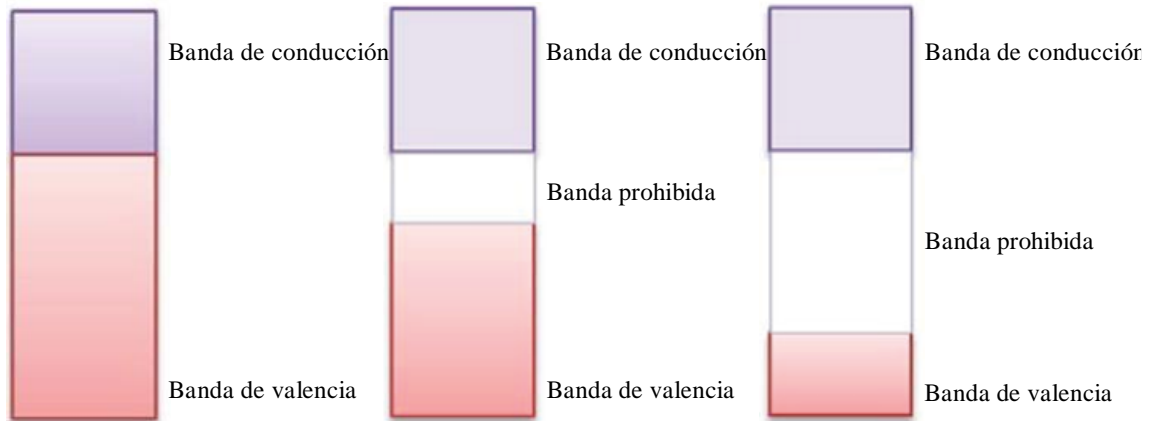


Figura 2. Banda de valencia, banda prohibida y banda de conducción: aislante, conductor

Fuente: Autor

La función de la luz solar en el efecto fotovoltaico es otorgar energía a un electrón para realizar el traspaso de la banda de valencia a la de conducción, así se genera electricidad. En [18], se menciona que se requiere 1.12 eV para realizar este traspaso, este es el proceso de operación de todas las células solares. En la Figura 3, se muestra una celda solar típica

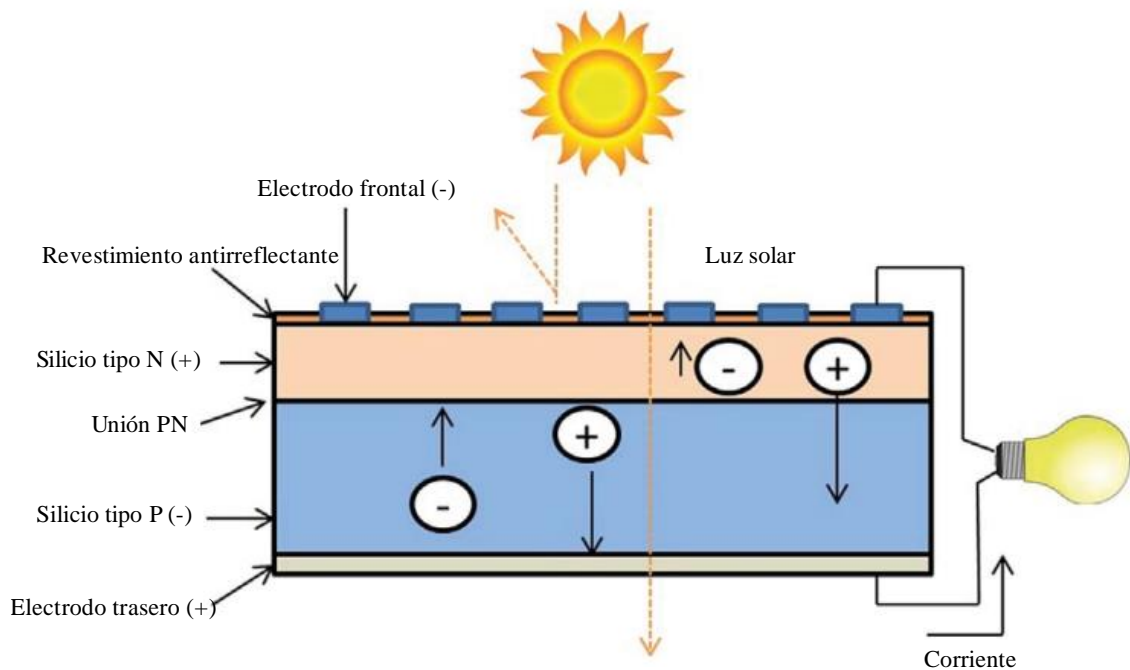


Figura 3. Celda fotovoltaica

Fuente: Autor

En comparación con las fuentes de generación de energía convencionales, como las que utilizan combustibles fósiles, la tecnología fotovoltaica no trae consigo los graves problemas

ambientales. Sin embargo, durante su ciclo de vida se estima un uso de energía considerable que pueden emitir gases de efecto invernadero en el proceso de construcción del panel [19].

2.5 Energía eólica

La energía eólica está ganando cada vez más importancia en todo el mundo. Este rápido desarrollo de la tecnología de la energía eólica y del mercado tiene grandes implicaciones para varias personas e instituciones: por ejemplo, para los científicos que investigan y enseñan la energía eólica del futuro y los ingenieros eléctricos en las universidades; para los profesionales de las empresas eléctricas que realmente necesitan comprender la complejidad de los efectos positivos y negativos que la energía eólica puede tener en el sistema eléctrico; para fabricantes de aerogeneradores; y para los desarrolladores de proyectos de energía eólica, que también necesitan esa comprensión para poder desarrollar proyectos de energía eólica factibles, modernos y rentables [20].

Actualmente, cinco países -Alemania, EE. UU., Dinamarca, India y España- concentran más del 83% de la capacidad mundial de energía eólica en sus países. Aquí también encontramos la mayor parte de la experiencia relacionada con la generación de energía eólica y su integración en el sistema eléctrico de esos países. Sin embargo, la utilización de esta fuente de energía renovable se está extendiendo rápidamente a otras áreas del mundo. Esto requiere que los conocimientos teóricos y la experiencia práctica acumulada en los actuales mercados centrales de la energía eólica se transfieran a los actores de los nuevos mercados [21].

La utilización de la energía eólica tiene una tradición de unos 3000 años y la tecnología se ha vuelto muy compleja. Se trata de disciplinas técnicas como la aerodinámica, la dinámica estructural y la ingeniería mecánica y eléctrica.

2.6 Turbinas eólicas

Los sistemas de conversión de energía eólica se pueden dividir en aquellos que dependen de la resistencia aerodinámica y aquellos que dependen de la sustentación aerodinámica. Las primeras ruedas de viento de eje vertical persas (o chinas) utilizaban el principio de arrastre. Los dispositivos de arrastre, sin embargo, tienen un coeficiente de potencia muy bajo, con un máximo de alrededor de 0,16 [22]. Las turbinas eólicas modernas se basan predominantemente en la sustentación aerodinámica. Los dispositivos de elevación utilizan superficies aerodinámicas (palas) que interactúan con el viento entrante. La fuerza resultante del cuerpo aerodinámico que intercepta el flujo de aire consiste no solo en un componente de fuerza de arrastre en la dirección del flujo, sino también en un componente de fuerza que es perpendicular al arrastre: las fuerzas de sustentación.

La fuerza de sustentación es un múltiplo de la fuerza de arrastre y, por lo tanto, la potencia motriz relevante del rotor. Por definición, es perpendicular a la dirección del flujo de aire que es interceptado por la pala del rotor y, mediante el efecto palanca del rotor, provoca el par motor necesario [23]. Las turbinas eólicas que utilizan sustentación aerodinámica se pueden dividir según la orientación del eje de giro en turbinas de eje horizontal y de eje vertical.

Las turbinas de eje vertical utilizan superficies aerodinámicas simétricas, a menudo ligeramente curvadas y verticales. Estas tienen la ventaja de que funcionan independientemente de la dirección del viento y que la caja de cambios y la maquinaria generadora se pueden colocar a nivel del suelo. Las grandes fluctuaciones de par con cada revolución, la falta de capacidad de arranque automático y las opciones limitadas para la regulación de la velocidad con vientos fuertes son, sin embargo, las principales desventajas. Las turbinas de eje vertical se desarrollaron y produjeron comercialmente en la década de 1970 hasta finales de la década de 1980.

El enfoque de eje horizontal, o tipo hélice, domina actualmente las aplicaciones de turbinas eólicas. Un aerogenerador de eje horizontal consta de una torre y una góndola que se monta en la parte superior de la torre. En las turbinas pequeñas, el rotor y la góndola están orientados hacia el viento con una paleta de cola. En las turbinas grandes, la góndola con el rotor gira eléctricamente hacia dentro o fuera del viento, en respuesta a una señal de una veleta. Las turbinas eólicas de eje horizontal suelen utilizar un número diferente de palas, según el propósito de la turbina eólica. Las turbinas de dos o tres palas se utilizan generalmente para la generación de energía eléctrica. Las turbinas con 20 o más palas se utilizan para el bombeo mecánico de agua. El número de palas del rotor está indirectamente relacionado con la relación de velocidad de la punta, que es la relación entre la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento, apreciar (16).

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (16)$$

Donde ω es la frecuencia de rotación, R es el radio del rotor aerodinámico y V es la velocidad del viento.

Los aerogeneradores con un gran número de palas tienen una relación de velocidad de punta baja pero un par de arranque alto. Las turbinas eólicas con solo dos o tres palas tienen una relación de velocidad de punta alta pero solo un par de arranque bajo. Es posible que sea necesario poner en marcha estas turbinas si la velocidad del viento alcanza el rango de funcionamiento. Sin embargo, una relación de velocidad de punta alta permite el uso de una

caja de engranajes más pequeña y, por lo tanto, más liviana para lograr la alta velocidad requerida en el eje impulsor del generador de energía.

Actualmente, las turbinas eólicas de tres palas dominan el mercado de las turbinas eólicas de eje horizontal conectadas a la red. Las turbinas eólicas de tres palas tienen la ventaja de que el momento de inercia del rotor es más fácil de entender y, por lo tanto, a menudo mejor de manejar que el momento de inercia del rotor de una turbina de dos palas [24]. Además, a los aerogeneradores de tres palas se les suele atribuir una estética visual "mejor" y un nivel de ruido más bajo que los aerogeneradores de dos palas. Ambos aspectos son consideraciones importantes para las aplicaciones de turbinas eólicas en áreas altamente pobladas.

Los aerogeneradores de dos palas tienen la ventaja de que el peso superior de la torre es más ligero y, por lo tanto, toda la estructura de soporte se puede construir más ligera, y es muy probable que los costos relacionados sean más bajos [25]. Dado que la estética visual y los niveles de ruido son menos importantes en alta mar, los costos más bajos pueden ser atractivos y conducir al desarrollo de turbinas de dos palas para el mercado en alta mar.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

La planta con flores ha estado evolucionando durante al menos más de 125 millones de años. Se estima que hay más de un cuarto de millón de tipos de plantas con flores. Todavía sigue siendo un misterio cómo las plantas con flores llegaron a dominar el paisaje desde el período Cretácico [26]. El propósito primordial de una flor es, en última instancia, la reproducción a través de la polinización. La polinización de las flores se asocia típicamente con la transferencia de polen, y esta puede ser mediante animales polinizadores.

La polinización abiótica y biótica son dos formas principales en el proceso de polinización. Alrededor del 90% de las plantas con flores pertenecen a la polinización biótica. Es decir, el polen es transferido por un polinizador como insectos y animales [27]. Los polinizadores, o a veces llamados vectores de polen, pueden ser muy diversos. Se estima que existen al menos unas 200.000 variedades de polinizadores como insectos, murciélagos y pájaros. Las abejas son un buen ejemplo de polinizador. Estos polinizadores tienden a visitar exclusivamente ciertas especies de flores mientras pasan por alto otras especies de flores. Tal constancia de flores puede tener ventajas evolutivas porque esto maximizará la transferencia de polen de flores a las mismas plantas o plantas específicas y, por lo tanto, maximizará la reproducción de las mismas especies de flores. Tal constancia de flores también puede ser ventajosa para

los polinizadores, porque pueden estar seguros de que el suministro de néctar está disponible con su memoria limitada y el costo mínimo de aprendizaje, cambio o exploración. En lugar de centrarse en algunas nuevas especies de flores impredecibles pero potencialmente más gratificantes, la constancia de las flores puede requerir un costo de inversión mínimo y, más probablemente, una ingesta garantizada de néctar [26].

Al observar de cerca el mundo de las plantas con flores, la polinización se puede lograr mediante la autopolinización o la polinización cruzada. La polinización cruzada, o alogamia, significa que la polinización puede ocurrir a partir del polen de una flor de una planta diferente, mientras que la autopolinización es la fertilización de una flor, como las flores de durazno, a partir del polen de la misma flor o de diferentes flores de la misma planta, que a menudo ocurre cuando no hay un polinizador confiable disponible. Biótico, la polinización cruzada puede ocurrir a larga distancia, y los polinizadores como abejas, murciélagos, pájaros y moscas pueden volar a larga distancia, por lo que pueden considerarse como la polinización global. Además, las abejas y las aves pueden comportarse como un comportamiento de vuelo Levy [1], con pasos de distancia de salto o vuelo que obedecen a una distribución Levy. Además, la constancia de la flor se puede considerar como un paso de incremento utilizando la similitud o diferencia de dos flores. Desde el punto de vista de la evolución biológica, el objetivo de la polinización de las flores es la supervivencia de los más aptos y la reproducción óptima de las plantas tanto en términos de número como de los más aptos. La Figura 4 nos ilustra de mejor manera el fenómeno en el que consiste la polinización de flores, en este caso nuestra abeja no va a tener el mismo recorrido, siempre este va a tomar caminos diferentes.

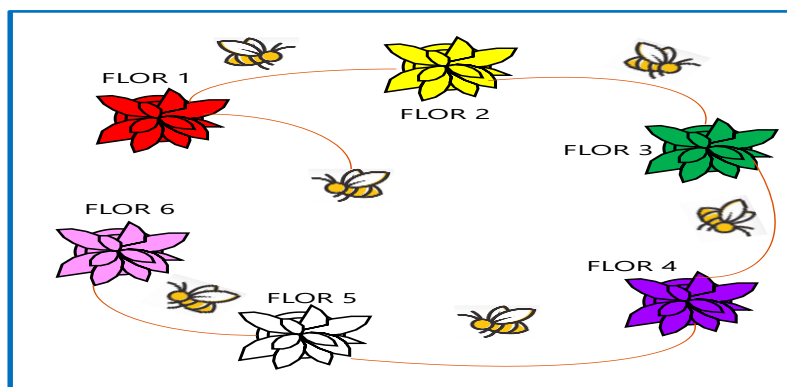


Figura 4. Polinización de flores en la naturaleza.

Fuente: Autor

En la Figura 5 nos muestra la estructura de la optimización que vamos a implementar para poder establecer soluciones que nos permitan reducir costos para el sistema y emisiones para el medio ambiente.

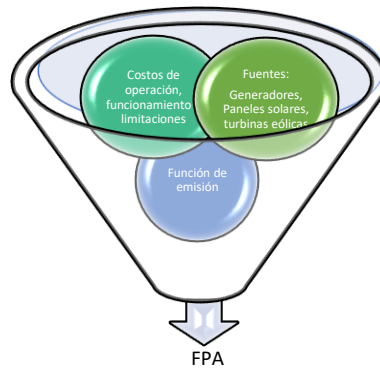


Figura 5. Estructura de optimización.

Fuente: Autor

En [28], se menciona que la metodología de polinización de flores toma en consideración cuatro reglas:

1. La polinización biótica y cruzada se puede considerar como un proceso de polinización global, y los polinizadores portadores de polen se mueven de una manera que obedece a los vuelos de Levy.
2. Para la polinización local, se utilizan la abiótica y la autopolinización.
3. Los polinizadores como los insectos pueden desarrollar constancia floral, lo que equivale a una probabilidad de reproducción proporcional a la similitud de las dos flores involucradas.
4. La interacción o cambio de polinización local y polinización global puede controlarse mediante una probabilidad de cambio $p \in [0, 1]$, con un ligero sesgo hacia la polinización local.

Desde el punto de vista de la implementación, se necesita un conjunto de fórmulas de actualización. De esta manera, es necesario convertir las reglas anteriores en ecuaciones de actualización. En primer lugar, en el paso de polinización global, los gametos de polen de las flores son transportados por polinizadores como los insectos, y el polen puede viajar largas distancias porque los insectos a menudo pueden volar y moverse en un rango mucho más largo. Por lo tanto, la Regla 1 y la constancia de la flor se pueden representar matemáticamente como indica (13)

$$X^{t+1}_i = X^t_i + \gamma L(\lambda)(X^t_i - g_*) \quad (17)$$

donde X_i^t es el polen i o el vector de solución X_i en la iteración t , y g_* es la mejor solución actual encontrada entre todas las soluciones en la generación/iteración actual. Aquí γ es un factor de escala para controlar el tamaño del paso. Por otro lado, $L(\lambda)$ es el parámetro que corresponde a la fuerza de la polinización, que esencialmente también es el tamaño del paso. Dado que los insectos pueden moverse largas distancias con varios pasos de distancia, podemos usar un vuelo Levy para imitar esta característica de manera eficiente. Es decir, sacamos $L > 0$ de una distribución de Levy

$$L \sim \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \text{sen}(\pi\lambda/2)}{\pi} \frac{1}{s^{1+\lambda}} \quad (s \gg s_0 > 0) \quad (18)$$

Aquí, $\Gamma(\lambda)$ es la función gamma estándar, y esta distribución es válida para pasos grandes $s > 0$. Entonces, para modelar la polinización local, tanto la Regla 2 como la Regla 3 se pueden representar como:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \epsilon (X_j^t - X_k^t) \quad (19)$$

donde X_j^t y X_k^t son polen de diferentes flores de la misma especie vegetal. Esto esencialmente imita la constancia de la flor en un vecindario limitado. Matemáticamente, si X_j^t y X_k^t provienen de la misma especie o se seleccionan de la misma población, esto se convierte de manera equivalente en un paseo aleatorio local si extraemos de una distribución uniforme en $[0,1]$.

Aunque las actividades de polinización de flores pueden ocurrir en todas las escalas, tanto locales como globales, es más probable que los parches de flores adyacentes o las flores en el vecindario no tan lejano sean polinizados por el polen de las flores locales que los que están lejos. Para imitar esto, podemos usar efectivamente una probabilidad de cambio (Regla 4) o probabilidad de proximidad p para cambiar entre polinización global común a polinización local intensiva. Para empezar, podemos usar un valor ingenuo de $p = 0.5$ como valor inicial. Un paramétrico preliminar mostró que $p = 0.8$ podría funcionar mejor para la mayoría de las aplicaciones.

En la Figura 6, se presenta el diagrama de flujo implementado para el algoritmo de polinización de flores.

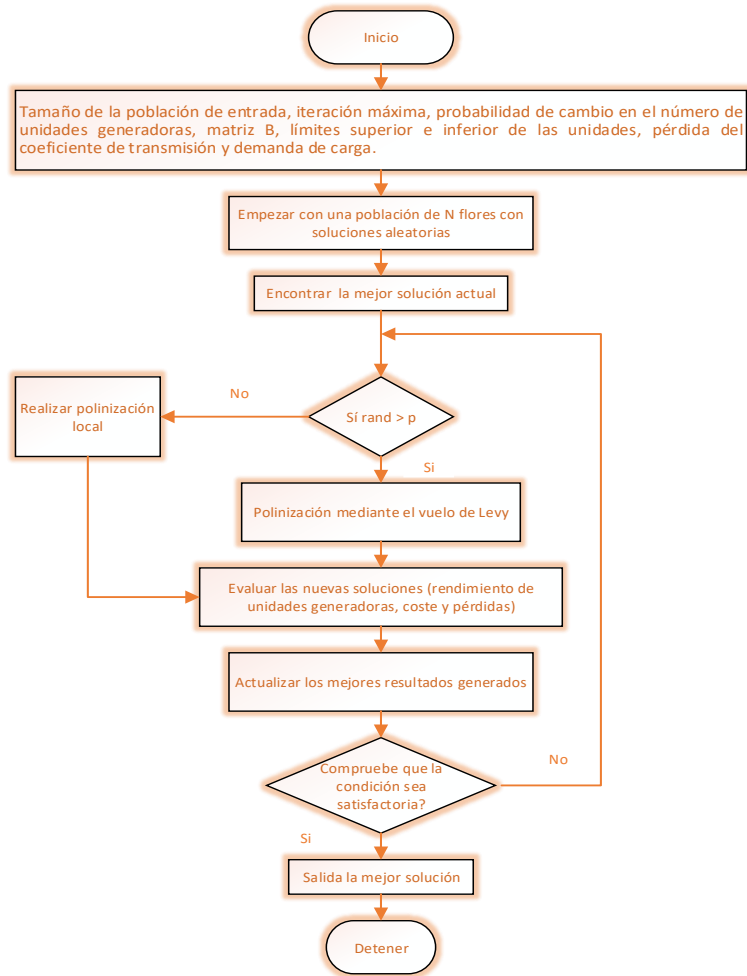


Figura 6. Diagrama de flujo del FPA.

Fuente: Autor

Tabla 1. Algoritmo de polinización de flores

Algoritmo
Objetivo min o max $f(x), x = (x_1, x_2, \dots, x_d)$
Inicializar una población de n flores/gametos de polen con soluciones aleatorias
Encontrar la mejor solución g_* en la población inicial
Definir una probabilidad de cambio $p \in [0, 1]$
Defina un criterio de parada (ya sea un número fijo de generaciones/iteraciones o precisión) while ($t < MaxGeneration$)
for $i = 1:n$ (todas las n flores en la población)

```

if  $rand < p$ ,
    Dibuje un (d -dimensional) vector escalonado L que obedece a una distribución
    Levy
    Polinización global a través de  $X^{t+1}_i = X^t_i + L(g_* - X^t_i)$ 
else
    Extraer de una distribución uniforme en [0,1]
    Hacer polinización local a través de  $X^{t+1}_i = X^t_i + \epsilon (X^t_j - X^t_k)$ 
end if
    Evalúa nuevas soluciones
if las nuevas soluciones son mejores, actualízalas en la población
end for
    Encuentra la mejor solución actual  $g_*$ 
end while
    Muestra la mejor solución encontrada

```

Fuente: Autor

CAPÍTULO 4

4. EXPOSICIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

El método se ha evaluado al sistema de subtransmisión eléctrica de la “Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.” (CENTROSUR), ubicada en Cuenca, Ecuador. El área de servicio de CENTROSUR es de 30.234 km² (11,8% del territorio ecuatoriano) y el consumo anual de energía de sus 419.420 clientes en 2021 (88% residencial, 11% comercial y 1% industrial) fue de 1.179,94 GWh. La red de subtransmisión tiene dos puntos de alimentación desde el sistema de transmisión tanto en 138 kV como en 230 kV. La red mallada se encuentra principalmente en el nivel de 69 kV, cuyas líneas se consideran en el problema de optimización de conmutación. El sistema de subtransmisión está fuertemente influenciado por el sistema de potencia a granel, provocando un gradiente de voltaje angular entre ambos puntos de alimentación.

El sistema de subtransmisión eléctrica bajo estudio consta de 20 unidades generadoras, 65 barras y 39 líneas de transmisión (apreciar Figura 7), 16 unidades funcionan mediante

energía renovable, específicamente hidroeléctrica y cuatro funcionan con combustibles fósiles, estas últimas corresponden a la subestación “Descanso” que tiene una potencia de 63.68 MW y serán fuente de análisis para evaluar el sistema con la inserción de energía renovable, específicamente una fuente renovable eólica y solar que sustituirá a dos de las 4 fuentes convencionales, además, se analizará el sistema con todas las fuentes con energía renovable. En este sistema se implementará el algoritmo de polinización de flores para evaluar el despacho económico ambiental del sistema.

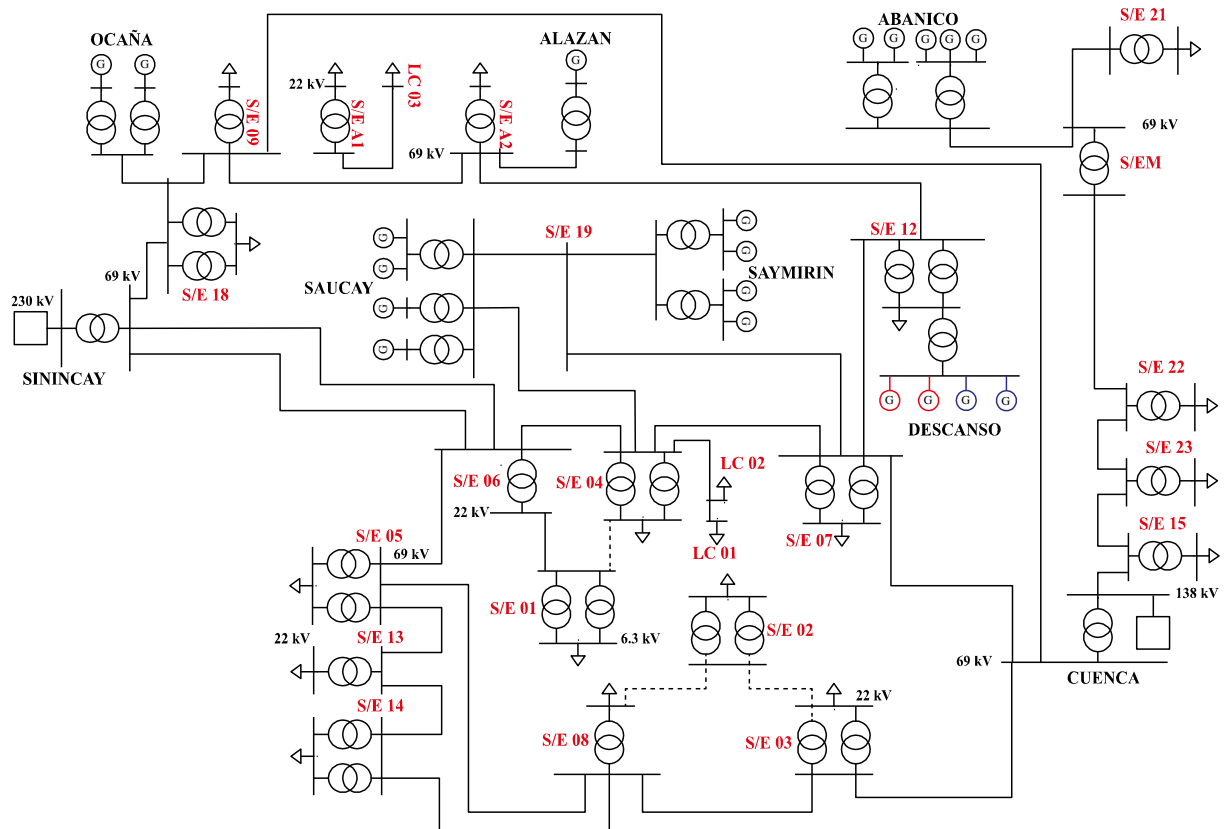


Figura 7. Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador.

Fuente: Autor

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El método propuesto, se ha evaluado en un sistema de diez generadores y en un sistema de subtransmisión eléctrica de la “Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.” (CENTROSUR), ubicada en Cuenca, Ecuador. Se ha realizado tres casos de estudio, el caso de estudio 1 denota el sistema de 10 generadores en condiciones iniciales y el caso de estudio 2 el sistema de 10 generadores con la integración de energía renovable, en particular, un sistema fotovoltaico y un sistema eólico, mientras que, en el caso de estudio 3 se tiene el sistema de subtransmisión en condiciones iniciales y con la inserción de energía renovable parcial y completa. Para cada caso de estudio se ha realizado se ha determinado la

convergencia de la función objetivo, las potencias de despacho de cada generador, el costo de combustible total y la cantidad de emisiones del sistema.

Este algoritmo ha sido simulado en Matlab R2021b® en un computador con las siguientes características: Intel (R) Core (TM) i7-7500U, 16 GB, 2.90 GHz.

Al simular el sistema se ha evaluado 30 iteraciones, 40 agentes de búsqueda y un factor de escala de 0.8, así, se optimiza el proceso de búsqueda.

4.2 Caso de estudio 1

En el caso de estudio 1, se evaluará el sistema de 10 generadores en condiciones iniciales sin inserción de energía renovable (fotovoltaica y eólica), este sistema tiene una demanda de 2000 MW, en el apartado de anexos se aprecia las características del sistema.

En la Figura 8, se aprecia la tasa de convergencia de la función objetivo del sistema de 10 generadores en condiciones iniciales, el sistema converge en la iteración 22 con un tiempo de 1.002 [s], el valor de la función objetivo al estabilizarse es de \$370090.

En la Figura 9, se evidencia la gráfica de potencias de cada unidad generadora, mientras que en la Tabla 2, se aprecia los valores de cada generador, el generador 10 es aquel que aportará más potencia al sistema con un valor de 471.589 MW, mientras que el generador de menos aportación es el generador 1, con 55 MW.

En la Tabla 3, se aprecia los costos de combustible y cantidad de emisiones del sistema se obtiene un costo de combustible de \$176676.642 y una cantidad de emisiones de 9946.600 [lb].

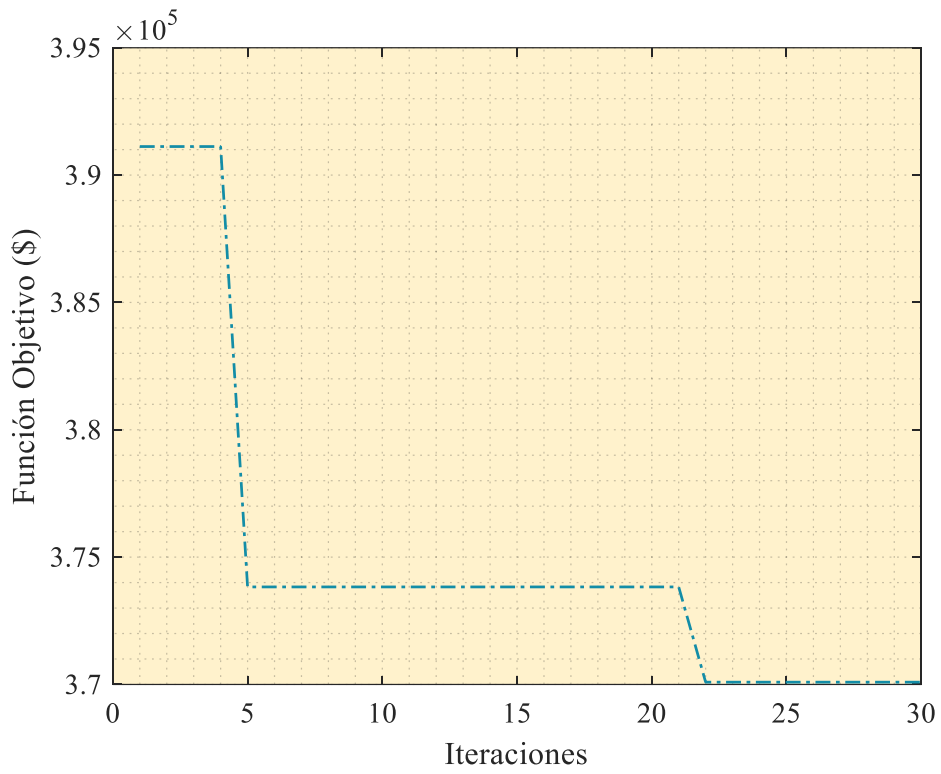


Figura 8. Convergencia de la función objetivo del sistema en condiciones iniciales

Fuente: Autor

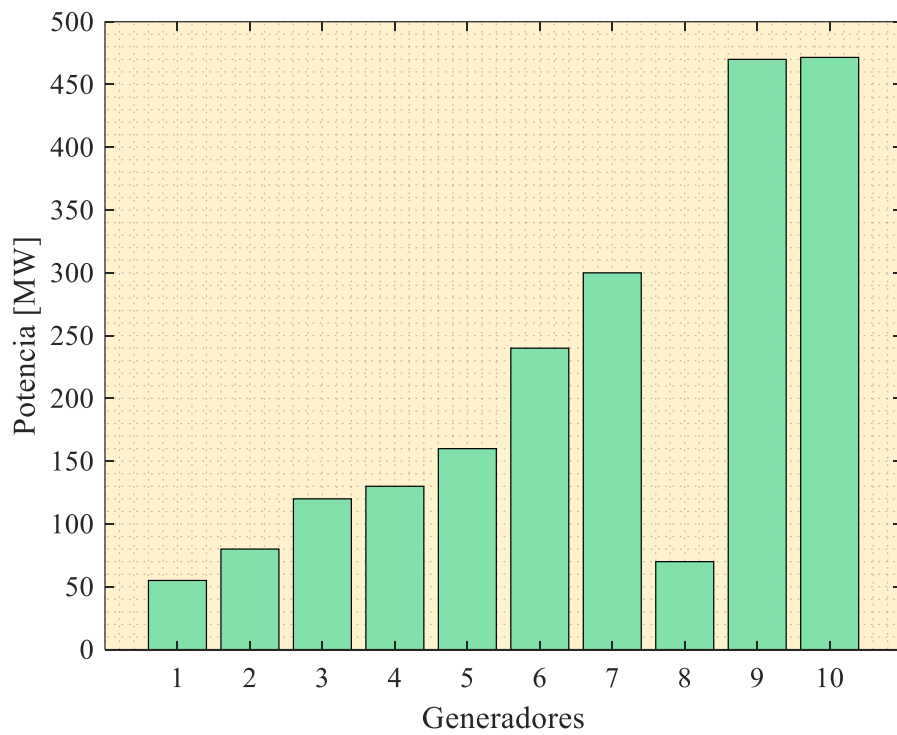


Figura 9. Potencias de los generadores en condiciones iniciales

Fuente: Autor

Tabla 2. Valor de potencias de los generadores en condiciones iniciales

Unidad	Potencia (MW)
Generador 1	55
Generador 2	80
Generador 3	120
Generador 4	130
Generador 5	160
Generador 6	240
Generador 7	300
Generador 8	70
Generador 9	470
Generador 10	471.589

Fuente: Autor

Tabla 3. Combustible y emisiones en condiciones iniciales

Costo de combustible (\$)	Cantidad de emisiones (lb)
176676.642	9946.600

Fuente: Autor

4.3 Caso de estudio 2

En el caso de estudio 2, se evaluará el sistema de 10 generadores con inserción de energía renovable, se sacará de operación a 2 generadores convencionales y se sustituirá por uno fotovoltaico y otro eólico, este sistema tiene una demanda de 2000 MW.

En la Figura 10, se aprecia la tasa de convergencia de la función objetivo del sistema de 10 generadores con inserción de energía renovable, el sistema converge en la iteración 15 con un tiempo de 0.969 [s], el valor de la función objetivo al estabilizarse es de \$357539.

En la Figura 11, se evidencia la gráfica de potencias de cada unidad generadora, mientras que en la Tabla 4, se aprecia los valores de cada generador, el generador 9 es aquel que aportará más potencia al sistema con un valor de 470 MW, mientras que el generador de menos aportación es el generador 1, con 55 MW.

En la Tabla 5, se aprecia los costos de combustible y cantidad de emisiones del sistema se obtiene un costo de combustible de \$160312.575 y una cantidad de emisiones de 7155.863 [lb].

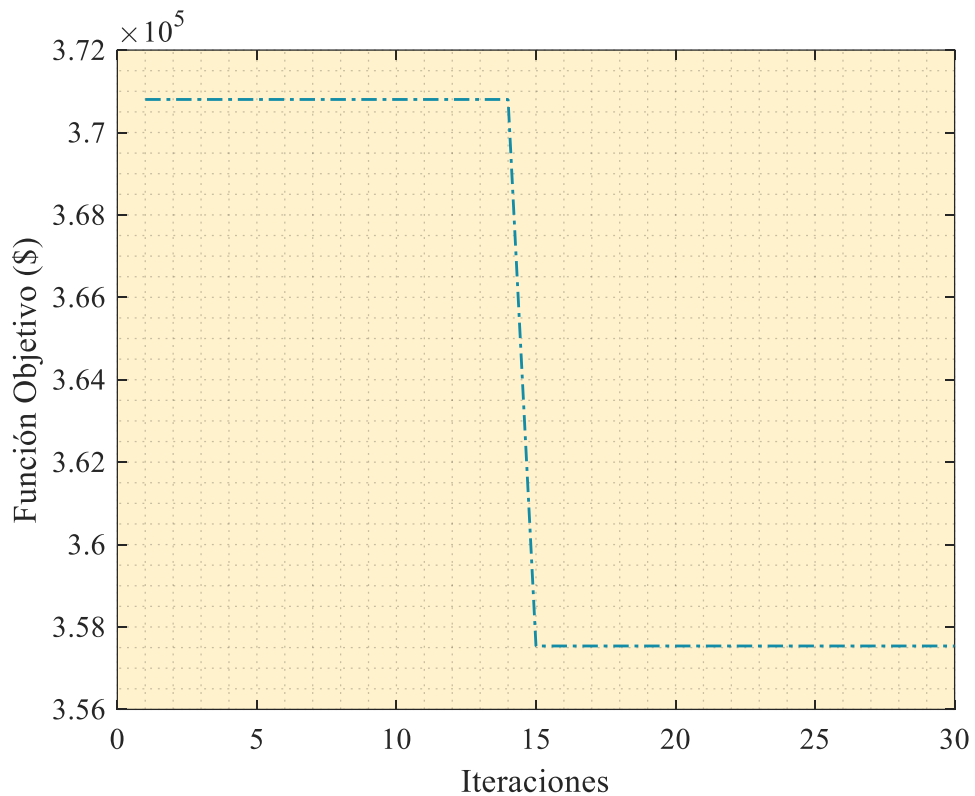


Figura 10. Convergencia de la función objetivo del sistema con energía renovable

Fuente: Autor

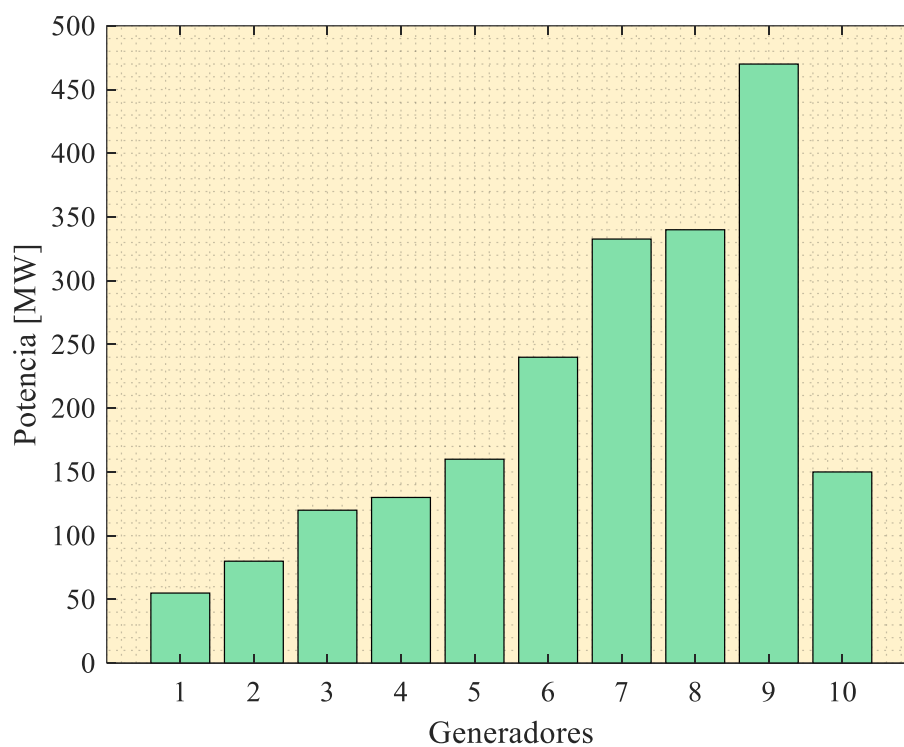


Figura 11. Potencias de los generadores con energía renovable

Fuente: Autor

Tabla 4. Valor de potencias de los generadores con energía renovable

Unidad	Potencia (MW)
Generador 1	55
Generador 2	80
Generador 3	120
Generador 4	130
Generador 5	160
Generador 6	240
Generador 7	332.714
Generador 8	340
Generador 9	470

Generador 10	150
--------------	-----

Fuente: Autor

Tabla 5. Combustible y emisiones con energía renovable

Costo de combustible (\$)	Cantidad de emisiones (lb)
160312.575	7155.863

Fuente: Autor

En la Figura 12, se aprecia la comparación de los diagramas de convergencia del sistema en condiciones iniciales y con la inserción de energía renovable. Se evidencia que con la inserción de energía renovable el algoritmo converge más rápido en la iteración 15, mientras que en condiciones iniciales el sistema llega a converger en la iteración 22.

En la Figura 13, se aprecia la comparación de los diagramas de potencias del sistema en condiciones iniciales y con la inserción de energía renovable. Se evidencia que el mayor despacho de generación corresponde al generador 10 en condiciones iniciales con 471.589 MW, mientras que el menor despacho corresponde al generador 1 con 55 MW en condiciones iniciales y con la inserción de energía renovable.

En la Figura 14, se aprecia los costos de combustibles de los dos casos de estudio. En condiciones iniciales el sistema presenta mayores costos de generación para suplir la demanda, mientras que, con la inserción de generación renovable los costos se reducen en un 9.26%, esto indica que es posible mejorar los costos de generación implementando generación renovable al sistema.

En la Figura 15, se evidencia la cantidad de emisiones de los dos casos de estudio. En condiciones iniciales se presenta mayor cantidad de emisiones, ya que, todo el sistema está operando con generadores convencionales, no obstante, al sacar de operación dos generadores convencionales e integrar dos de generación renovable (fotovoltaico y eólico) se mejora notablemente el sistema, ya que, se ha logrado una reducción de emisiones de un 28.05%.

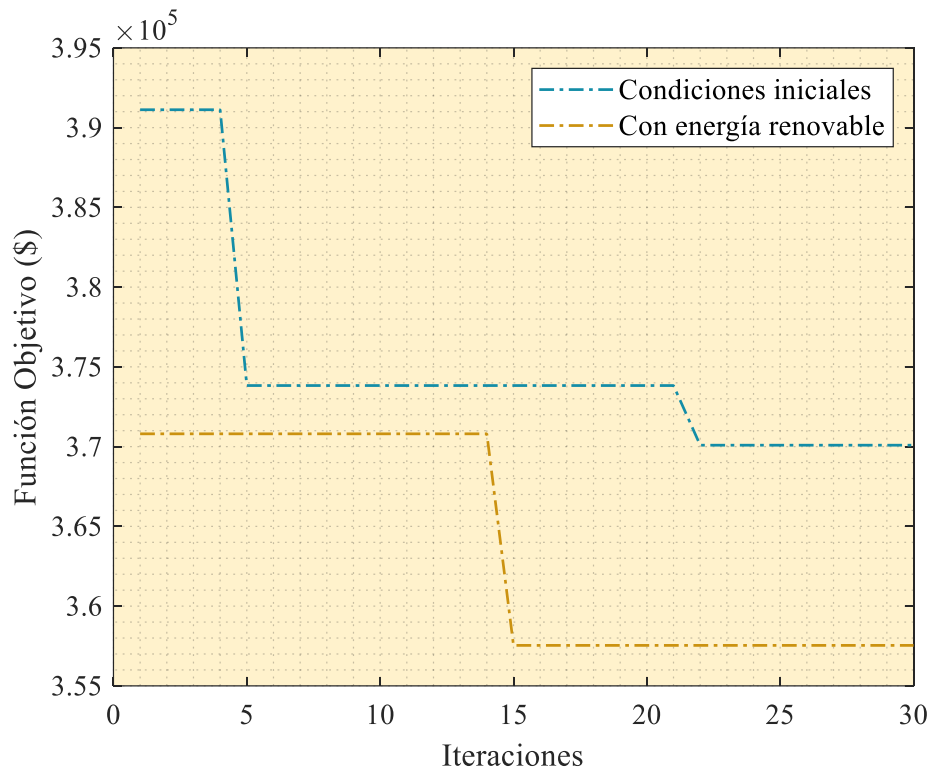


Figura 12. Convergencia del sistema en condiciones iniciales y con energía renovable

Fuente: Autor

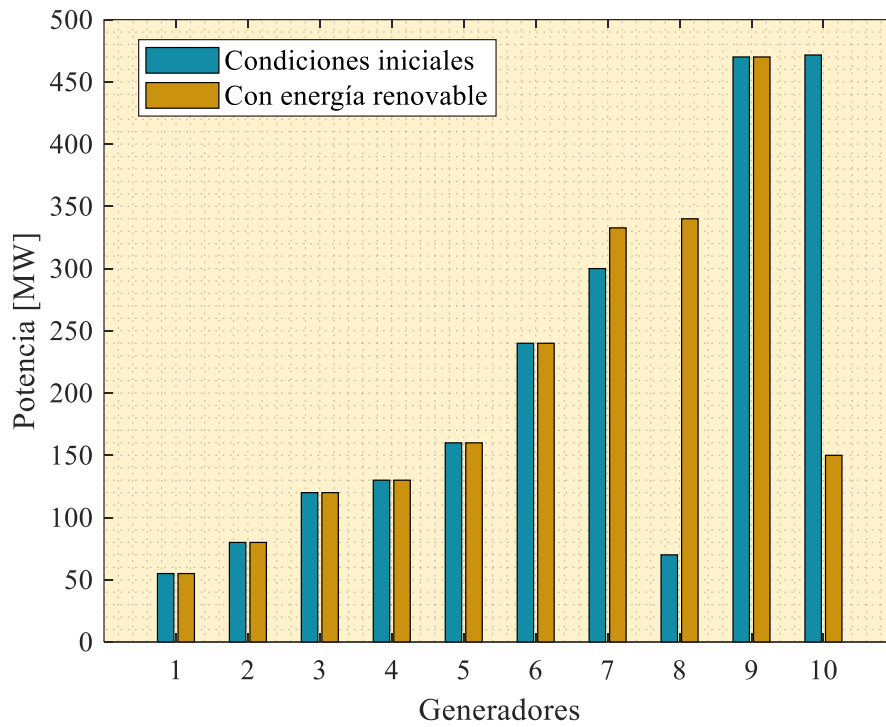


Figura 13. Potencias del sistema en condiciones iniciales y con energía renovable

Fuente: Autor

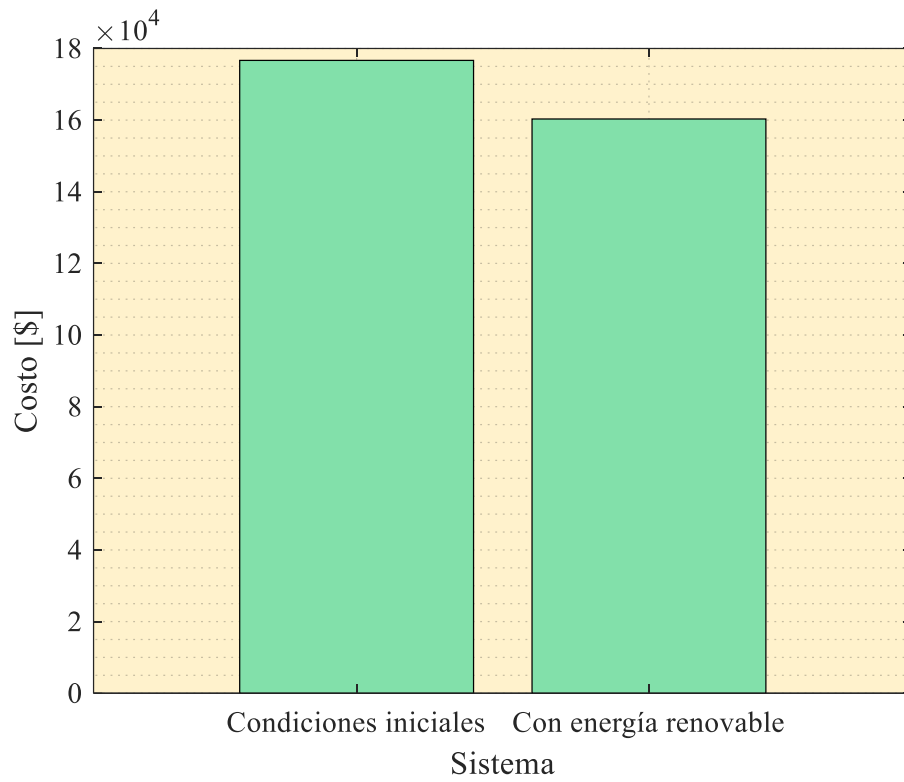


Figura 14. Costos de combustible de los casos de estudio

Fuente: Autor

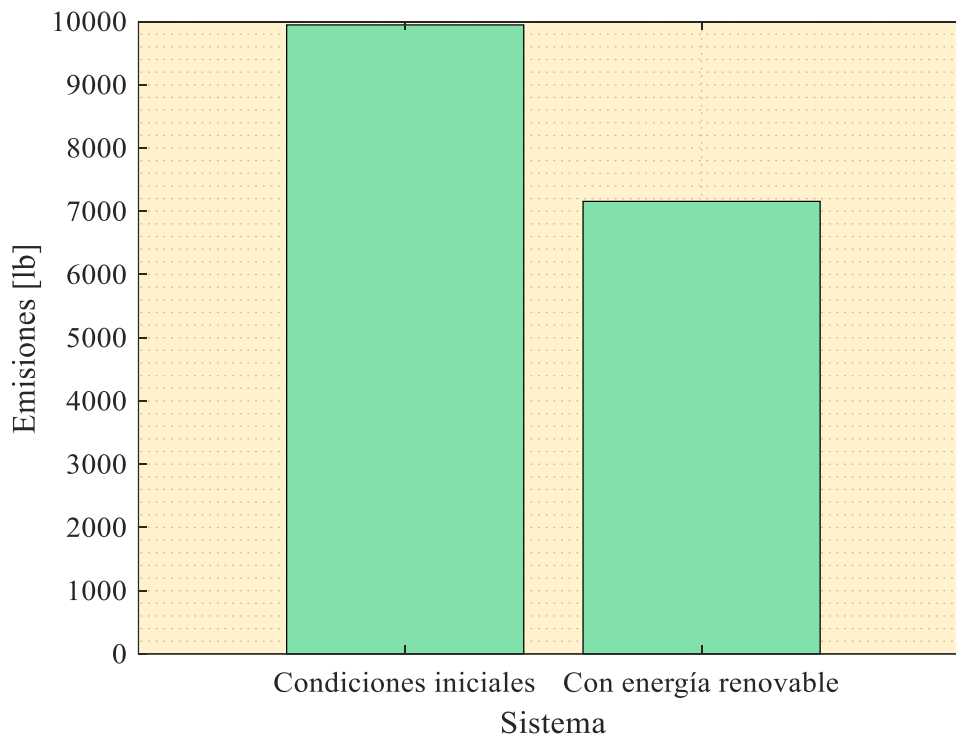


Figura 15. Cantidad de emisiones de los casos de estudio

Fuente: Autor

4.4 Caso de estudio 3

Para el tercer caso de estudio se aplica el algoritmo al sistema de subtransmisión eléctrica de la “Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.” (CENTROSUR), ubicada en Cuenca, Ecuador. El área de servicio de CENTROSUR es de 30.234 km² (11,8% del territorio ecuatoriano) y el consumo anual de energía de sus 419.420 clientes en 2021 (88% residencial, 11% comercial y 1% industrial) fue de 1.179,94 GWh. La red de subtransmisión, ilustrada en la Figura 12, tiene dos puntos de alimentación desde el sistema de transmisión tanto en 138 kV como en 230 kV. La red mallada se encuentra principalmente en el nivel de 69 kV, cuyas líneas se consideran en el problema de optimización de conmutación. El sistema de subtransmisión está fuertemente influenciado por el sistema de potencia a granel, provocando un gradiente de voltaje angular entre ambos puntos de alimentación. La carga se distribuye en 18 subestaciones (S/E) y 3 grandes consumidores industriales de energía (LC). Dos de las subestaciones (S/ E A1 y S/E A2) y un gran consumidor (LC 03) forman parte de una empresa de distribución cercana integrada en el sistema de subtransmisión. Las cargas en cada subestación corresponden a los alimentadores de media tensión, simplificados como una sola carga. Adicionalmente, existen 6 plantas de generación eléctrica distribuidas en la red de subtransmisión, principalmente hidroeléctrica, descrita en la Tabla 6. Según la Tabla 6, el sistema de subtransmisión eléctrica bajo estudio consta de 20 unidades generadoras, 16 unidades funcionan mediante energía renovable, específicamente hidroeléctrica y cuatro funcionan con combustibles fósiles, estas últimas corresponden a la subestación “Descanso” y serán fuente de análisis para evaluar el sistema con la inserción de energía renovable, específicamente una fuente renovable eólica y solar que sustituirá a dos de las 4 fuentes convencionales, observar la Tabla 7, además, se analizará el sistema con todas las fuentes con energía renovable, apreciar la Tabla 8.

Tabla 6. Plantas de generación distribuida en el sistema de subtransmisión

Planta de generación	Tipo	Unidades	Potencia [MW]	Energía Anual [GWh]
Abanico	Hidroeléctrica	5	37.65	266.40
Ocaña	Hidroeléctrica	2	26.56	204.13
Saucay	Hidroeléctrica	4	23.60	109.11

Descanso	Combustible fósil	4	15.92	3.41
Saymirin	Hidroeléctrica	4	15.76	93.64
Alazan	Hidroeléctrica	1	4.52	26.99
Total		20	124.01	703.69

Fuente: Autor

Tabla 7. Plantas de generación distribuida en el sistema de subtransmisión con la inserción de energía renovable

Planta de generación	Tipo	Unidades	Potencia [MW]	Energía Anual [GWh]
Abanico	Hidroeléctrica	5	37.65	266.40
Ocaña	Hidroeléctrica	2	26.56	204.13
Saucay	Hidroeléctrica	4	23.60	109.11
Descanso	Combustible fósil	2	15.92	3.41
Descanso	Fotovoltaica	1	15.92	3.41
Descanso	Eólica	1	15.92	3.41
Saymirin	Hidroeléctrica	4	15.76	93.64
Alazan	Hidroeléctrica	1	4.52	26.99
Total		20	124.01	703.69

Fuente: Autor

Tabla 8. Plantas de generación distribuida en el sistema de subtransmisión con la inserción de energía renovable para todo el sistema

Planta de generación	Tipo	Unidades	Potencia [MW]	Energía Anual [GWh]
Abanico	Hidroeléctrica	5	37.65	266.40
Ocaña	Hidroeléctrica	2	26.56	204.13
Saucay	Hidroeléctrica	4	23.60	109.11
Descanso	Fotovoltaica	2	15.92	3.41
Descanso	Eólica	2	15.92	3.41
Saymirin	Hidroeléctrica	4	15.76	93.64
Alazan	Hidroeléctrica	1	4.52	26.99
Total		20	124.01	703.69

Fuente: Autor

Tabla 9. Líneas de subtransmisión del sistema

Línea	De	A	Longitud [km]	Voltaje [kV]	Resistencia [Ω]	$X[\Omega]$
1	Sinincay	S/E 6	8	69	0.9	3.25
2	Sinincay	S/E 6	8.2	69	0.92	3.31
3	Sinincay	S/E 18	31.7	69	3.56	12.85
4	Cuenca	S/E 3	3.4	69	0.43	1.42
5	Cuenca	S/E 3	3	69	0.42	1.38
6	Cuenca	S/E 7	5.3	69	0.75	2.22
7	Cuenca	S/E 9	23.8	69	3.34	10.49
8	S/E 5	S/E 13	11.1	69	2.76	5.25

9	S/E 5	S/E 8	5.1	69	0.72	2.28
10	S/E 3	S/E 2	1.5	22	0.16	0.17
11	S/E 3	S/E 8	4.5	69	0.63	2.01
12	S/E 18	Ocaña	42	69	5.19	19.47
13	S/E 4	LC 2	1.9	69	0.47	0.81
14	LC 2	LC 1	0.2	69	0.05	0.09
15	S/E 4	S/E 7	3.8	69	0.43	1.55
16	S/E 4	Saucay	14.1	69	1.98	6.27
17	S/E 4	S/E 1	2.7	22	0.62	1.17
18	S/E 7	S/E 12	10.2	69	2.55	4.71
19	S/E 13	S/E 14	36.5	69	9.1	17.33
20	S/E 9	S/E 18	24.1	69	6.03	11.56
21	S/E 9	S/E A1	0.9	69	0.12	0.38
22	S/E A1	LC 3	2.5	69	0.35	1.13
23	S/E 9	S/E A2	1.7	69	0.24	0.76
24	S/E A2	Alazan	34.7	69	4.16	12.4
25	S/E 12	S/E A2	10.3	69	1.44	4.52
26	S/E 7	S/E 19	9.9	69	1.38	4.41
27	S/E 19	Saymirin	1.3	69	0.19	0.61
28	S/E 19	Saucay	4.9	69	0.69	2.17
29	S/E 8	S/E 14	45.6	69	5.14	18.52

30	S/E 8	S/E 2	4	22	0.4	0.45
31	S/E 6	S/E 5	7.2	69	0.81	2.92
32	S/E 6	S/E 4	3.2	69	0.36	1.31
33	S/E 6	S/E 1	1.4	22	0.32	0.6
34	Cuenca	S/E 15	21	138	5.28	10.8
35	S/E 15	S/E 23	45.5	138	11.96	24.4
36	S/E 23	S/E 22	33	138	8.2	16.13
37	S/E 22	S/E M	51.7	138	12.75	24.56
38	S/E M	S/E 21	0.1	69	0.03	0.05
39	S/E M	Abanico	11.5	69	1.6	4.44

Fuente: Autor

El sistema de subtransmisión es conformado por 39 líneas cuyas características se detallan en la Tabla 9. Existen 4 líneas en el nivel de 22 kV que alimentan las subestaciones S/E 01 y S/E 02, las cuales dan servicio al centro histórico de la ciudad, apreciar la Figura 7 que representa todo el sistema de subtransmisión eléctrica de la “Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.” (CENTROSUR), ubicada en Cuenca, Ecuador. Al simular este sistema de subtransmisión en condiciones iniciales se evidencia que existen barras que poseen altos perfiles de voltaje y otras con perfiles muy bajos, la barra 48 es donde se conectan los cuatro generadores convencionales que serán cambiados por generación renovable, en condiciones iniciales, esta barra presenta un perfil de voltaje estable con un valor de 1 [p.u.], no obstante, los generadores que alimentan dicha barra están sumamente sobrecargados, en la Figura 17, se aprecia el sistema simulado en condiciones iniciales y en el ANEXO D los resultados de esta simulación, mientras que en la Tabla 10, se evidencia los resultados de la simulación del sistema en condiciones iniciales en el software DigSilent Power Factory.

Al integrar dos fuentes de energía renovable a la barra 48 del sistema, apreciar la Figura 18, se evidencia que este tiene un comportamiento similar al de condiciones iniciales, donde existen barras con perfiles de voltaje muy elevados y bajos, apreciar la Figura 19, en el

ANEXO G se visualiza los resultados de la simulación. En la barra donde se integró las dos nuevas fuentes de energía renovable (barra 48) se aprecia que se mantienen un perfil de voltaje óptimo con 1 [p.u.] y, además, los generadores de fuente de energía renovable no se encuentran sobrecargados, esto debido a que los generadores convencionales restantes asumen cierta sobrecarga para poder robustecer el sistema y que se mantenga la estabilidad de este. En la Tabla 11, se aprecia los resultados de los parámetros eléctricos evaluados en el sistema simulado.

Al integrar cuatro fuentes de energía renovable a la barra 48 del sistema, se convierte toda la subestación “Descanso” en fuente de energía renovable pura, apreciar la Figura 20, en el ANEXO J se visualiza los resultados de la simulación. Al simular este sistema se aprecia un comportamiento similar del sistema que, en los casos anteriores, donde existen perfiles de voltaje muy elevados y bajos, apreciar la Figura 21. En la barra 48, se mantiene un perfil de voltaje eficiente con 1 [p.u.] y dado que en esta barra ya no existe fuentes de generación convencional, ningún generador otorga robustez al mismo, por ello, los generadores de fuente de energía renovable conectados a la subestación “Descanso” no están sobrecargados, no obstante, se evidencia ciertos cambios en los parámetros eléctricos de las barras contiguas, apreciar la Tabla 12.

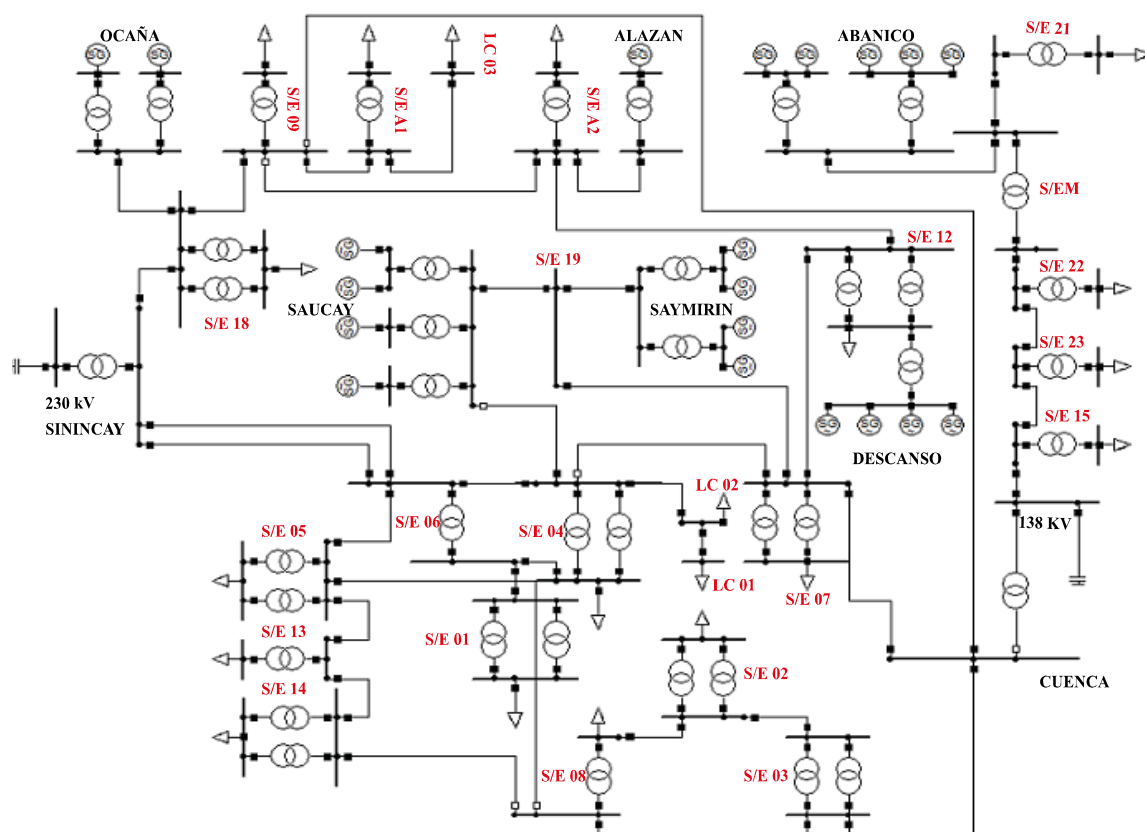


Figura 16. Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador.

Fuente: Autor

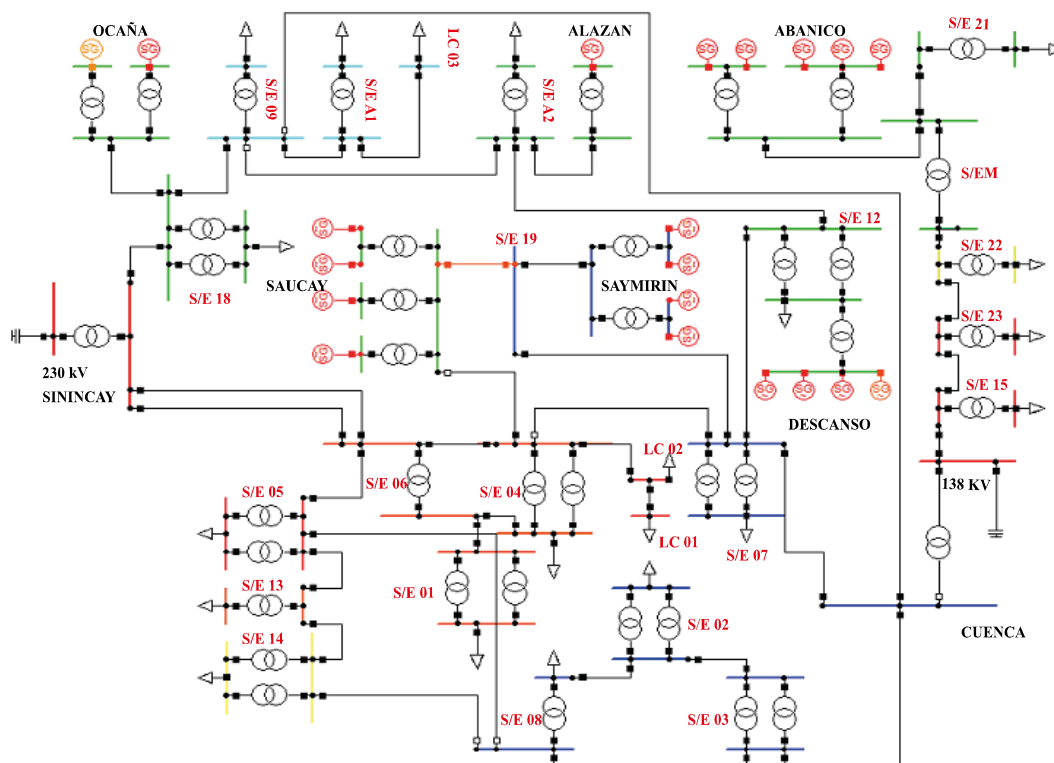


Figura 17. Red de subtransmisión simulada de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador.

Fuente: Autor

Tabla 10. Resultados de la simulación del sistema de subtransmisión en condiciones iniciales

Barra	V (kV)	V (p.u.)	Ángulo V (grados)	Generador (MW)	Generador (Mvar)	Carga (MW)	Carga (Mvar)
1	22.000	1.000	0	-22.309	-0.354	0	0
10	69.452	1.007	-0.538	0	0	0	0
11	138.935	1.007	-0.55	0	0	0	0
12	162.546	1.178	-12.903	0	0	0	0
13	69.003	1.000	0.128	0	0	0	0
14	166.069	1.203	-13.512	0	0	0	0
15	14.598	1.058	-7.259	0	0	0.309	0.115

16	145.986	1.058	-7.256	0	0	0	0
17	25.913	1.178	-12.905	0	0	0.326	0.151
18	15.049	1.090	-9.480	0	0	0.313	0.124
19	150.488	1.090	-9.478	0	0	0	0
2	22.001	1.000	0.28	26.560	0	0	0
20	34.982	0.507	60.814	0	0	0	0
21	252.386	1.097	-13.349	0	0	0	0
22	75.681	1.097	-13.349	0	0	0	0
23	68.940	0.999	0.013	0	0	0	0
24	21.048	0.957	-2.222	0	0	0.195	0.089
25	21.980	0.999	0.011	0	0	0.899	0.699
26	22.000	1.000	0	-119.264	87.516	0	0
27	60.953	0.883	16.174	0	0	0	0
28	21.809	0.991	0.827	23.600	0	0	0
29	21.809	0.991	0.827	23.600	0	0	0
3	22.000	1.000	141.767	4.520	-0.29	0	0
30	19.434	0.883	16.405	31.520	0	0	0
31	68.401	0.991	0.689	0	0	0	0
32	19.434	0.883	16.405	31.520	0	0	0
33	68.602	0.994	114.125	0	0	0	0
34	21.915	0.996	114.287	0	0	2.992	0.996
35	66.014	0.957	-2.220	0	0	0	0
36	60.706	0.88	15.399	0	0	0	0
37	35.645	0.517	61.564	0	0	0	0
38	11.365	0.517	61.562	0	0	0.205	0.112

39	75.354	1.092	-13.658	0	0	0	0
4	69.002	1.000	141.742	0	0	0	0
40	24.026	1.092	-13.659	0	0	0.547	0.227
41	24.030	1.092	-13.638	0	0	0	0
42	6.881	1.092	-13.639	0	0	0.21	0.102
43	75.343	1.092	-13.665	0	0	0.313	0.125
44	75.343	1.092	-13.665	0	0	0.21	0.102
45	75.392	1.093	-13.623	0	0	0	0
46	21.047	0.957	-2.225	0	0	0.291	0.095
47	24.038	1.093	-13.625	0	0	0	0
48	13.800	1.000	114.625	58.760	39.054	0	0
49	11.129	0.506	60.709	0	0	0	0
5	22.000	1.000	0	-111.435	1.374	0	0
50	75.191	1.090	-13.822	0	0	0	0
51	72.266	1.047	-15.934	0	0	0	0
52	23.041	1.047	-15.935	0	0	0.308	0.101
53	23.974	1.090	-13.822	0	0	0.21	0.102
55	34.842	0.505	60.679	0	0	0	0
56	74.597	1.081	-14.220	0	0	0	0
57	66.012	0.957	-2.223	0	0	0	0
58	23.784	1.081	-14.223	0	0	0.522	0.203
59	11.105	0.505	60.663	0	0	0.728	0.901
6	21.997	1.000	1.286	112.950	0	0	0
60	3.180	0.505	60.633	0	0	1.108	0.429
61	11.106	0.505	60.655	0	0	0	0

62	66.004	0.957	-2.233	0	0	0.293	0.089
63	21.613	0.982	116.601	0	0	0.295	0.098
64	67.786	0.982	116.603	0	0	0	0
65	34.907	0.506	60.722	0	0	0	0
7	68.995	1.000	0.639	0	0	0	0
8	69.452	1.007	-0.538	0	0	0	0
9	22.144	1.007	-0.54	0	0	0.302	0.101

Fuente: Autor

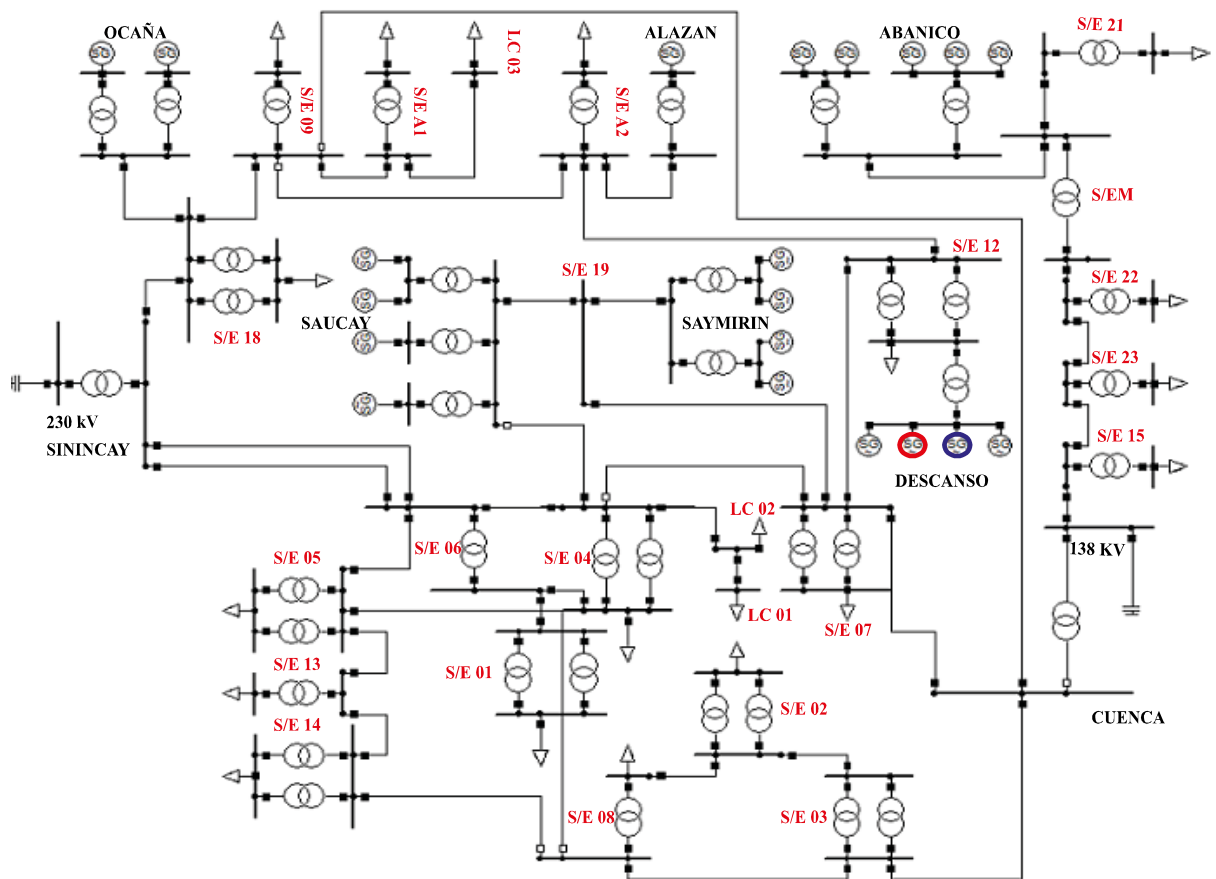


Figura 18. Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador con inserción de energía renovable parcial.

Fuente: Autor

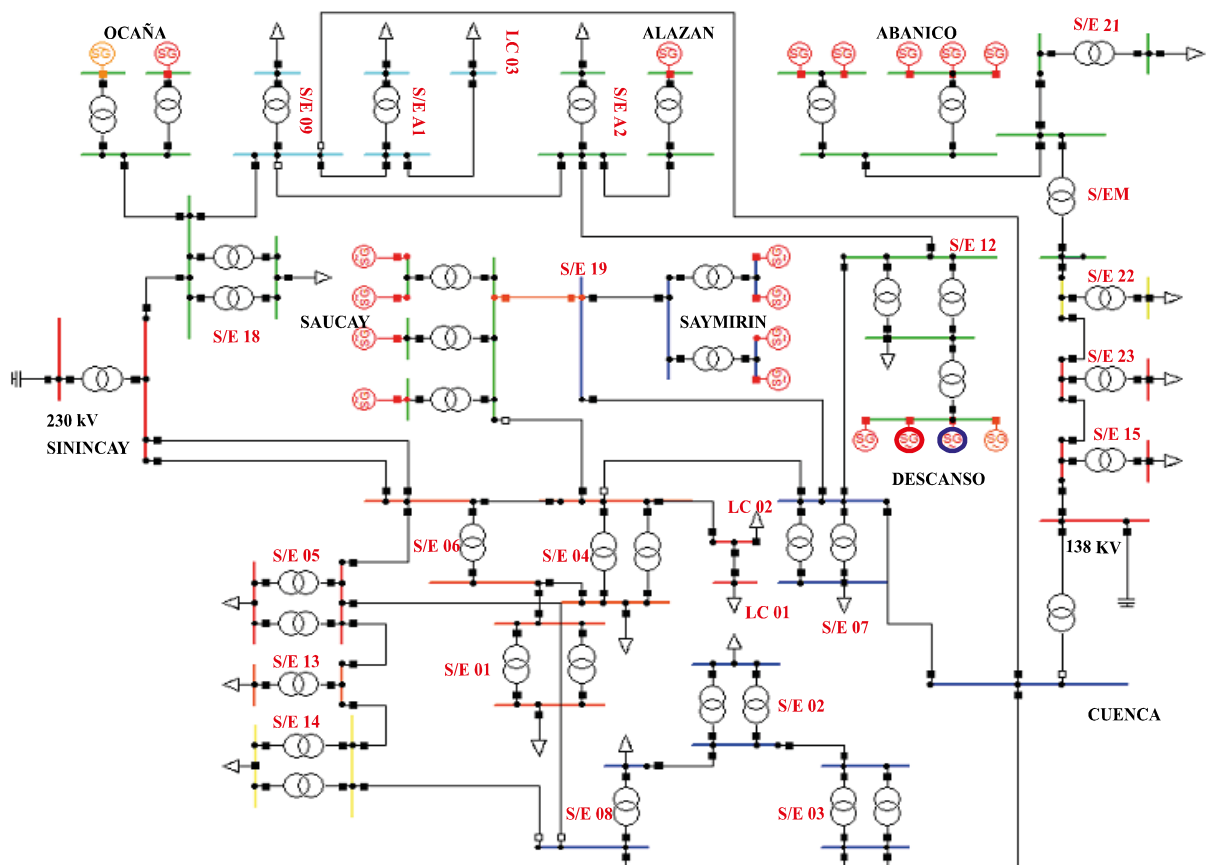


Figura 19. Red de subtransmisión simulada de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador con inserción de energía renovable parcial.

Fuente: Autor

Tabla 11. Resultados de la simulación del sistema de subtransmisión con energía renovable parcial

Barra	V (kV)	V (p.u.)	Ángulo V (grados)	Generador (MW)	Generador (Mvar)	Carga (MW)	Carga (Mvar)
1	22.000	1.000	0	-22.309	-0.354	0	0
10	69.452	1.007	-0.538	0	0	0	0
11	138.935	1.007	-0.55	0	0	0	0
12	162.546	1.178	-12.903	0	0	0	0
13	69.003	1.000	0.128	0	0	0	0
14	166.069	1.203	-13.512	0	0	0	0
15	14.598	1.058	-7.259	0	0	0.309	0.115

16	145.986	1.058	-7.256	0	0	0	0
17	25.913	1.178	-12.905	0	0	0.326	0.151
18	15.049	1.090	-9.480	0	0	0.313	0.124
19	150.488	1.090	-9.478	0	0	0	0
2	22.001	1.000	0.28	26.560	0	0	0
20	55.687	0.807	37.247	0	0	0	0
21	252.386	1.097	-13.349	0	0	0	0
22	75.681	1.097	-13.349	0	0	0	0
23	68.940	0.999	0.013	0	0	0	0
24	21.048	0.957	-2.222	0	0	0.195	0.089
25	21.980	0.999	0.011	0	0	0.899	0.699
26	22.000	1.000	0	-128.240	54.231	0	0
27	66.516	0.964	14.579	0	0	0	0
28	21.882	0.995	0.875	23.600	0	0	0
29	21.882	0.995	0.875	23.600	0	0	0
3	22.000	1.000	94.637	4.520	-0.332	0	0
30	21.208	0.964	14.774	31.520	0	0	0
31	68.632	0.995	0.739	0	0	0	0
32	21.208	0.964	14.774	31.520	0	0	0
33	68.909	0.999	67.036	0	0	0	0
34	21.980	0.999	67.148	0	0	2.998	0.999
35	66.014	0.957	-2.220	0	0	0	0
36	66.288	0.961	13.929	0	0	0	0
37	56.231	0.815	37.665	0	0	0	0
38	17.928	0.815	37.664	0	0	0.262	0.162

39	75.354	1.092	-13.658	0	0	0	0
4	69.002	1.000	94.611	0	0	0	0
40	24.026	1.092	-13.659	0	0	0.547	0.227
41	24.030	1.092	-13.638	0	0	0	0
42	6.881	1.092	-13.639	0	0	0.21	0.102
43	75.343	1.092	-13.665	0	0	0.313	0.125
44	75.343	1.092	-13.665	0	0	0.21	0.102
45	75.392	1.093	-13.623	0	0	0	0
46	21.047	0.957	-2.225	0	0	0.291	0.095
47	24.038	1.093	-13.625	0	0	0	0
48	13.800	1.000	67.389	42.000	9.253	0	0
49	17.735	0.806	37.189	0	0	0	0
5	22.000	1.000	0	-111.435	1.374	0	0
50	75.191	1.090	-13.822	0	0	0	0
51	72.266	1.047	-15.934	0	0	0	0
52	23.041	1.047	-15.935	0	0	0.308	0.101
53	23.974	1.090	-13.822	0	0	0.21	0.102
55	55.579	0.805	37.174	0	0	0	0
56	74.597	1.081	-14.220	0	0	0	0
57	66.012	0.957	-2.223	0	0	0	0
58	23.784	1.081	-14.223	0	0	0.522	0.203
59	17.718	0.805	37.165	0	0	0.893	0.961
6	21.997	1.000	1.286	112.950	0	0	0
60	5.072	0.805	37.148	0	0	1.625	0.746
61	17.713	0.805	37.161	0	0	0	0

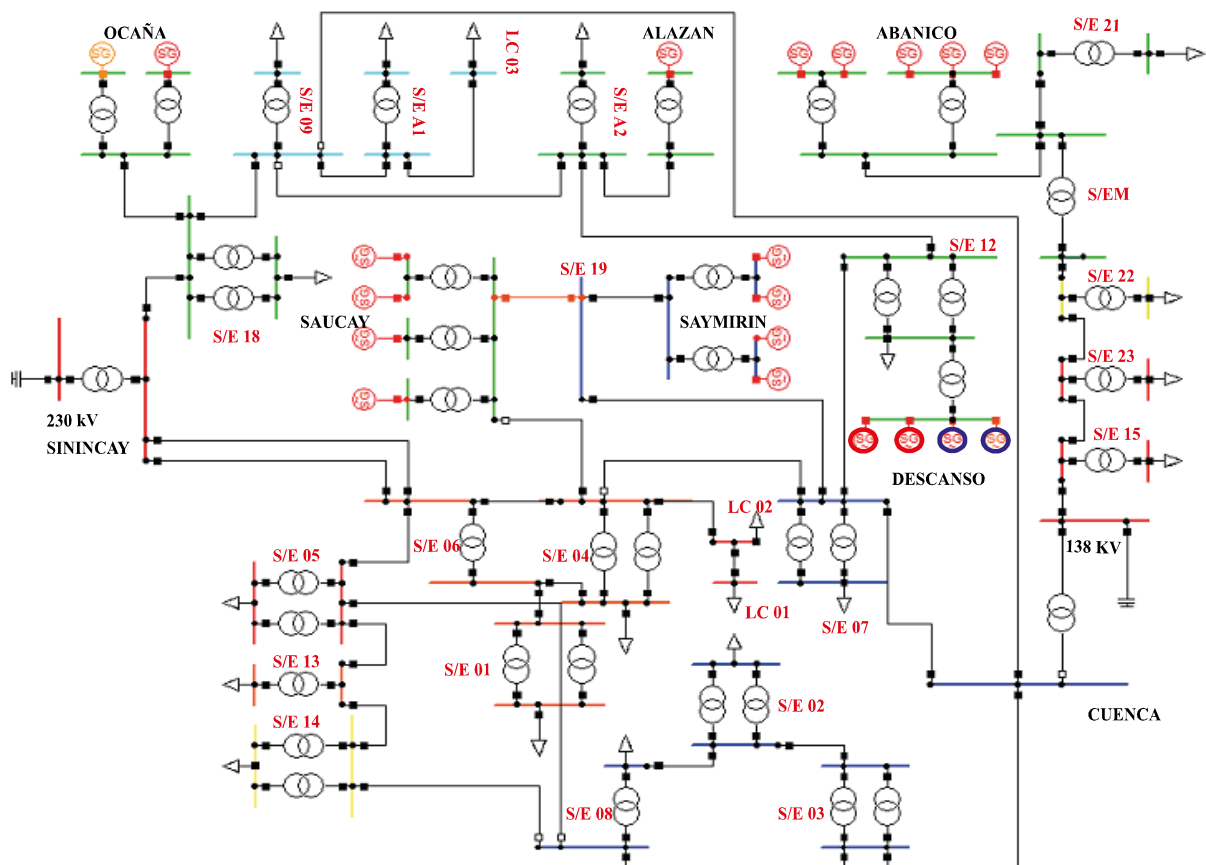


Figura 21. Red de subtransmisión simulada de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador con inserción de energía renovable completa.

Fuente: Autor

Tabla 12. Resultados de la simulación del sistema de subtransmisión con energía renovable completa

Barra	V (kV)	V (p.u.)	Ángulo V (grados)	Generador (MW)	Generador (Mvar)	Carga (MW)	Carga (Mvar)
1	22.000	1.000	0	-22.309	-0.354	0	0
10	69.452	1.007	-0.538	0	0	0	0
11	138.935	1.007	-0.55	0	0	0	0
12	162.546	1.178	-12.903	0	0	0	0
13	69.003	1.000	0.128	0	0	0	0
14	166.069	1.203	-13.512	0	0	0	0
15	14.598	1.058	-7.259	0	0	0.309	0.115
16	145.986	1.058	-7.256	0	0	0	0

17	25.913	1.178	-12.905	0	0	0.326	0.151
18	15.049	1.090	-9.480	0	0	0.313	0.124
19	150.488	1.090	-9.478	0	0	0	0
2	22.001	1.000	0.28	26.560	0	0	0
20	60.597	0.878	29.290	0	0	0	0
21	252.386	1.097	-13.349	0	0	0	0
22	75.681	1.097	-13.349	0	0	0	0
23	68.940	0.999	0.013	0	0	0	0
24	21.048	0.957	-2.222	0	0	0.195	0.089
25	21.980	0.999	0.011	0	0	0.899	0.699
26	22.000	1.000	0	-125.609	41.447	0	0
27	68.150	0.988	13.305	0	0	0	0
28	21.910	0.996	0.859	23.600	0	0	0
29	21.910	0.996	0.859	23.600	0	0	0
3	22.000	1.000	79.063	4.520	-0.34	0	0
30	21.729	0.988	13.490	31.520	0	0	0
31	68.719	0.996	0.723	0	0	0	0
32	21.729	0.988	13.490	31.520	0	0	0
33	68.968	1.000	51.470	0	0	0	0
34	21.992	1.000	51.553	0	0	2.999	1.000
35	66.014	0.957	-2.220	0	0	0	0
36	67.927	0.984	12.686	0	0	0	0
37	61.128	0.886	29.669	0	0	0	0
38	19.490	0.886	29.668	0	0	0.276	0.176
39	75.354	1.092	-13.658	0	0	0	0

4	69.002	1.000	79.037	0	0	0	0
40	24.026	1.092	-13.659	0	0	0.547	0.227
41	24.030	1.092	-13.638	0	0	0	0
42	6.881	1.092	-13.639	0	0	0.21	0.102
43	75.343	1.092	-13.665	0	0	0.313	0.125
44	75.343	1.092	-13.665	0	0	0.21	0.102
45	75.392	1.093	-13.623	0	0	0	0
46	21.047	0.957	-2.225	0	0	0.291	0.095
47	24.038	1.093	-13.625	0	0	0	0
48	13.800	1.000	51.737	32.000	3.539	0	0
49	19.301	0.877	29.237	0	0	0	0
5	22.000	1.000	0	-111.435	1.374	0	0
50	75.191	1.090	-13.822	0	0	0	0
51	72.266	1.047	-15.934	0	0	0	0
52	23.041	1.047	-15.935	0	0	0.308	0.101
53	23.974	1.090	-13.822	0	0	0.21	0.102
55	60.493	0.877	29.224	0	0	0	0
56	74.597	1.081	-14.220	0	0	0	0
57	66.012	0.957	-2.223	0	0	0	0
58	23.784	1.081	-14.223	0	0	0.522	0.203
59	19.285	0.877	29.216	0	0	0.932	0.975
6	21.997	1.000	1.286	112.950	0	0	0
60	5.520	0.876	29.201	0	0	1.759	0.834
61	19.279	0.876	29.212	0	0	0	0
62	66.004	0.957	-2.233	0	0	0.293	0.089

63	21.718	0.987	53.929	0	0	0.296	0.098
64	68.118	0.987	53.931	0	0	0	0
65	60.537	0.877	29.244	0	0	0	0
7	68.995	1.000	0.639	0	0	0	0
8	69.452	1.007	-0.538	0	0	0	0
9	22.144	1.007	-0.54	0	0	0.302	0.101

Fuente: Autor

En este contexto, en la Figura 22, se aprecia la tasa de convergencia de la función objetivo del sistema de 20 generadores sin inserción de energía renovable, el sistema converge en la iteración 30 con un tiempo de 2.013[s], el valor de la función objetivo al estabilizarse es de \$254808.

En la Figura 23, se evidencia la gráfica de potencias de cada unidad generadora, mientras que en la Tabla 13 se aprecia los valores de cada generador, los cinco primeros generadores correspondientes a la subestación "Abanico" son aquellos que más aportan al sistema con 45.18 MW, mientras que el generador de menos aportación es el generador 20 correspondiente a la subestación "Alazán" con 5.424 MW.

En la Tabla 14, se aprecia los costos de combustible y cantidad de emisiones del sistema se obtiene un costo de combustible de \$44197.471 y una cantidad de emisiones de 627.532 [lb].

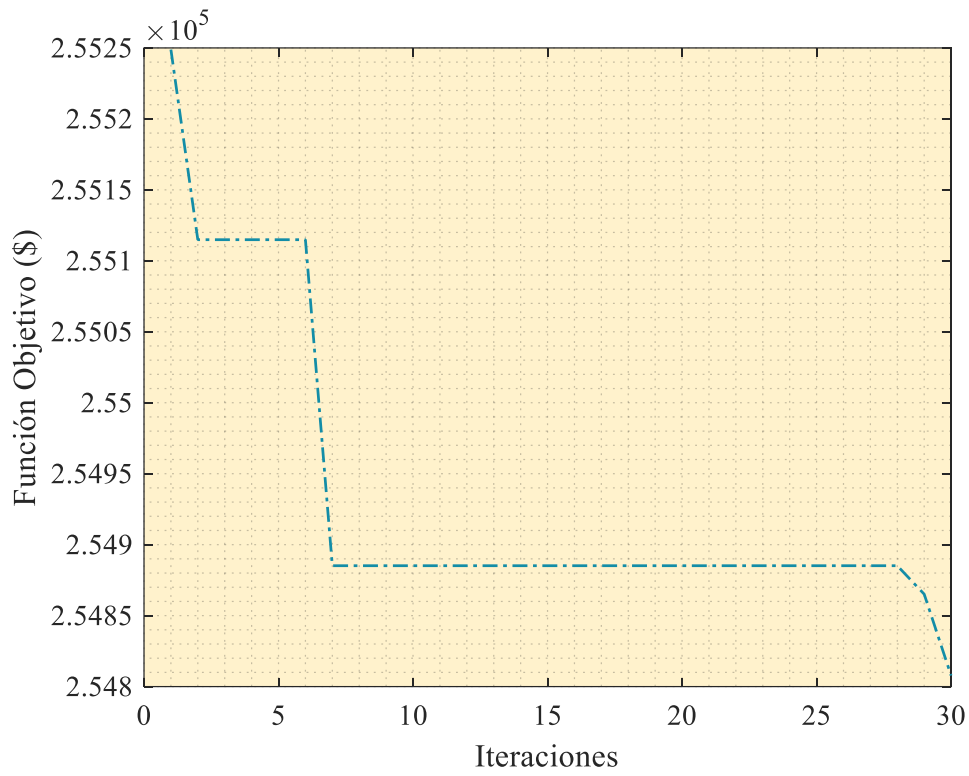


Figura 22. Convergencia de la función objetivo del sistema de subtransmisión sin energía renovable

Fuente: Autor

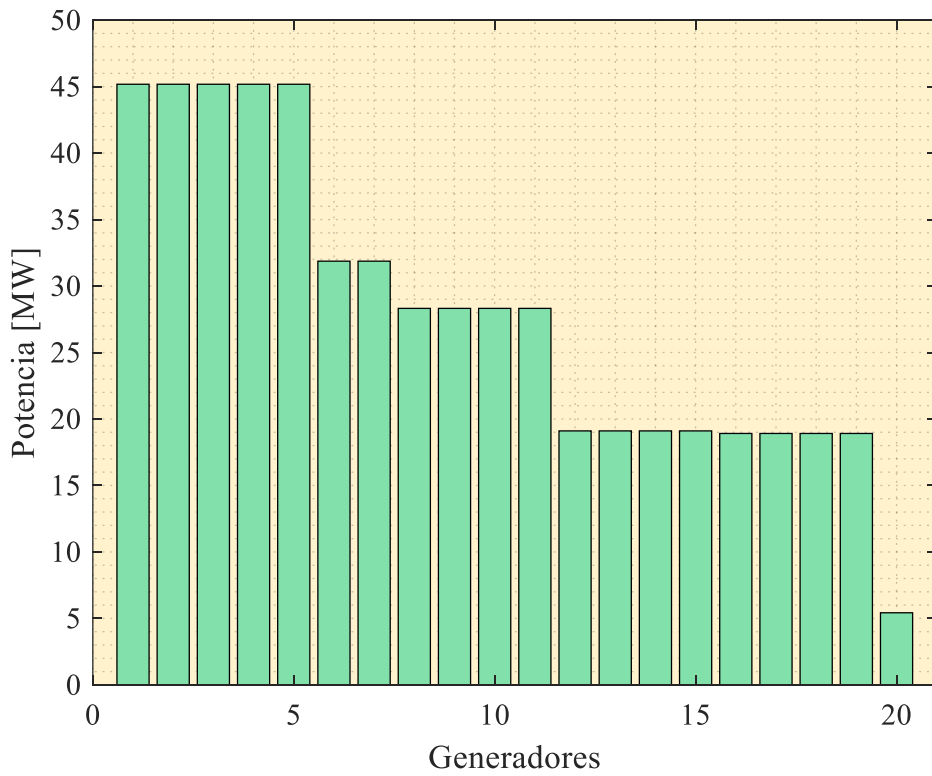


Figura 23. Potencias de los generadores del sistema de subtransmisión sin energía renovable

Fuente: Autor

Tabla 13. Valor de potencias de los generadores del sistema de subtransmisión sin energía renovable

Unidad	Potencia (MW)
Generador 1	45.18
Generador 2	45.18
Generador 3	45.18
Generador 4	45.18
Generador 5	45.18
Generador 6	31.872
Generador 7	31.872
Generador 8	28.32
Generador 9	28.32
Generador 10	28.32
Generador 11	28.32
Generador 12	19.104
Generador 13	19.104
Generador 14	19.104
Generador 15	19.104
Generador 16	18.912
Generador 17	18.912

Generador 18	18.912
Generador 19	18.912
Generador 20	5.424

Fuente: Autor

Tabla 14. Combustible y emisiones del sistema de subtransmisión sin energía renovable

Costo de combustible (\$)	Cantidad de emisiones (lb)
44197.471	627.532

Fuente: Autor

Al insertar dos fuentes energía renovable en el sistema de subtransmisión eléctrica se aprecia los siguientes resultados. La Figura 24 denota la tasa de convergencia de la función objetivo del sistema de 20 generadores con inserción de energía renovable, el sistema converge en la iteración 3 con un tiempo de 1.785 [s], el valor de la función objetivo al estabilizarse es de \$253709.

En la Figura 25, se evidencia la gráfica de potencias de cada unidad generadora, mientras que en la Tabla 15 se aprecia los valores de cada generador, el generador 3 correspondiente a la subestación “Abanico” es aquel que aportará más potencia al sistema con un valor de 45.8 MW, mientras que el generador de menos aportación es el generador 20 correspondiente a la subestación “Alazán” con 5.424 MW. Al integrar energía renovable al sistema en la subestación “descanso”, generador 13 (fotovoltaica) y generador 14 (eólica), se evidencia que existe una pequeña reducción de aporte al sistema de estos generadores, no obstante, los generadores 12 y 15 que también forman parte de esta subestación incrementan su aporte de potencia activa al sistema, esto se debe a que fuentes de generación convencionales otorgan robustez al sistema, por ende, mejora la estabilidad de este.

En la Tabla 16, se aprecia los costos de combustible y cantidad de emisiones del sistema se obtiene un costo de combustible de \$3560 y una cantidad de emisiones de 313.766 [lb].

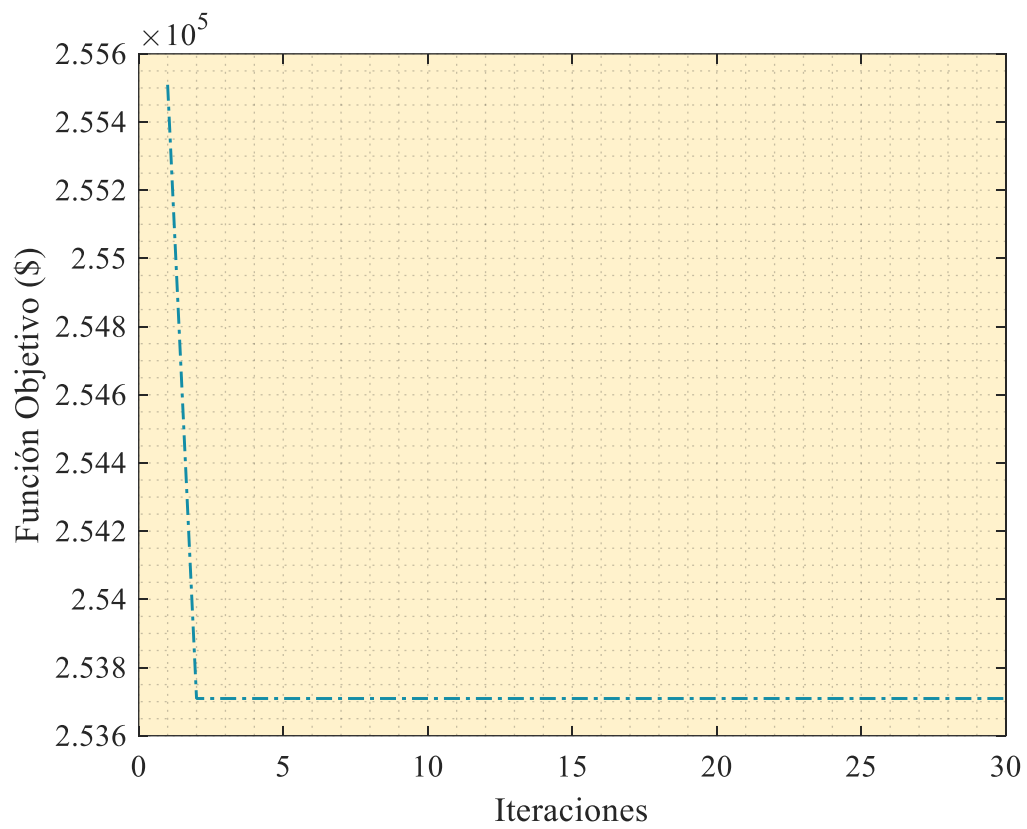


Figura 24. Convergencia de la función objetivo del sistema de subtransmisión con energía renovable

Fuente: Autor

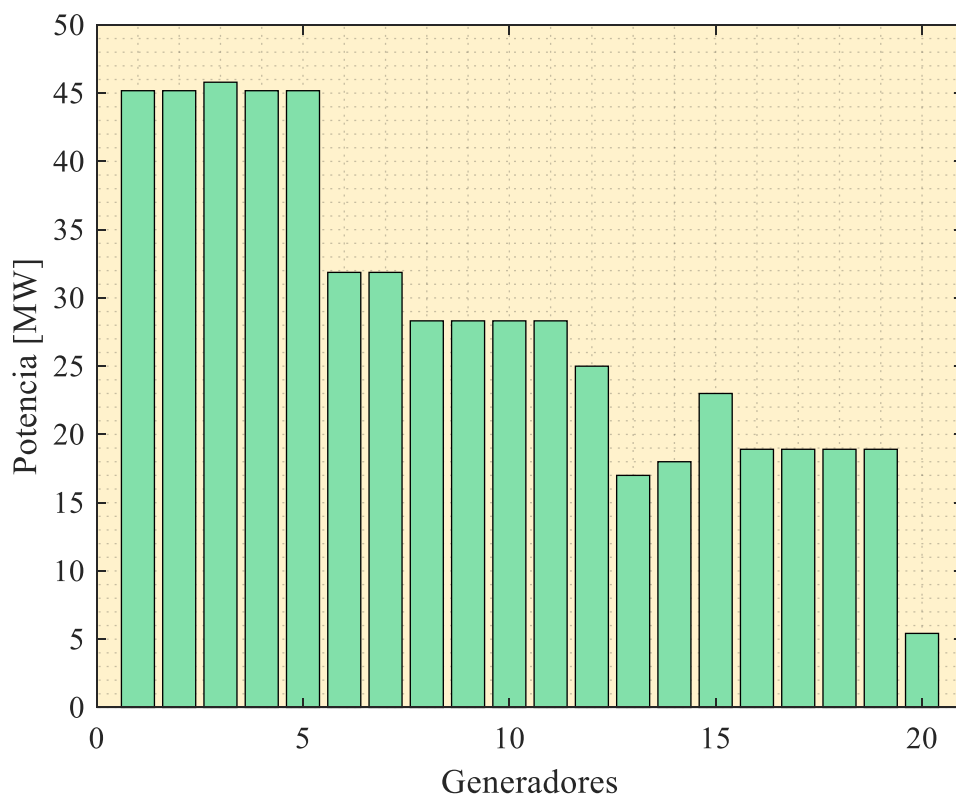


Figura 25. Potencias de los generadores del sistema de subtransmisión con energía renovable

Fuente: Autor

Tabla 15. Valor de potencias de los generadores del sistema de subtransmisión con dos fuentes de energía renovable

Unidad	Potencia (MW)
Generador 1	45.18
Generador 2	45.18
Generador 3	45.80
Generador 4	45.18
Generador 5	45.18
Generador 6	31.872
Generador 7	31.872
Generador 8	28.32

Generador 9	28.32
Generador 10	28.32
Generador 11	28.32
Generador 12	25
Generador 13	17
Generador 14	18
Generador 15	23
Generador 16	18.912
Generador 17	18.912
Generador 18	18.912
Generador 19	18.912
Generador 20	5.424

Fuente: Autor

Tabla 16. Combustible y emisiones del sistema de subtransmisión sin energía renovable

Costo de combustible (\$)	Cantidad de emisiones (lb)
3560	313.766

Fuente: Autor

Al insertar cuatro fuentes energía renovable en el sistema de subtransmisión eléctrica, es decir, hacer que todo el sistema aporte potencia mediante fuentes de energía renovable, se aprecia los siguientes resultados. La Figura 26 denota la tasa de convergencia de la función objetivo del sistema de 20 generadores con inserción de energía renovable, el sistema converge en la iteración 3 con un tiempo de 1.6 [s], el valor de la función objetivo al estabilizarse es de \$224709.

En la Figura 27, se evidencia la gráfica de potencias de cada unidad generadora, mientras que en la Tabla 17, se aprecia los valores de cada generador, el generador 2 correspondiente

a la subestación “Abanico” es aquel que aportará más potencia al sistema con un valor de 45.90 MW, mientras que el generador de menos aportación es el generador 20 correspondiente a la subestación “Alazán” con 5.424 MW. Al integrar energía renovable al sistema en la subestación “descanso”, generador 12 y generador 13 (fotovoltaica) y generador 14 y generador 15 (eólica), se evidencia que existe una variación de generación de energía en estos puntos, no obstante, los generadores 15 es aquel que más aporta de la subestación “Descanso”, dado que no existe fuentes de generación convencionales los generadores de la subestación “Abanico” que son los de mayor potencia han incrementado su aporte al sistema para tratar de dar robustez al mismo.

En la Tabla 18, se aprecia los costos de combustible y cantidad de emisiones del sistema, dado que se ha eliminado por completo las fuentes de energía convencionales las emisiones y costos de combustible tiene un valor de cero.

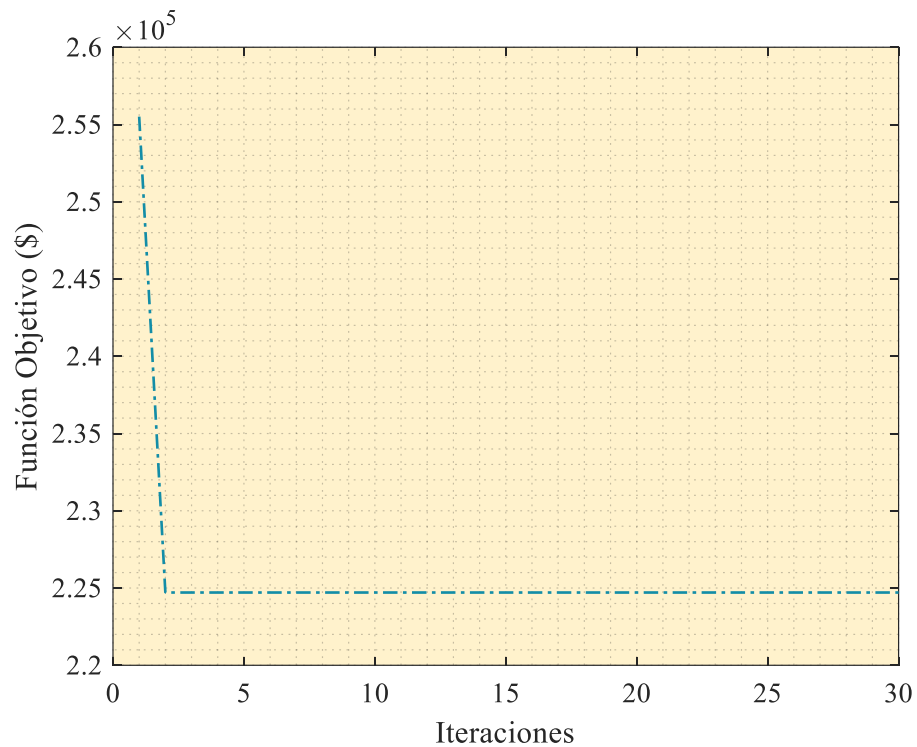


Figura 26. Convergencia de la función objetivo del sistema de subtransmisión con energía renovable en todo el sistema

Fuente: Autor

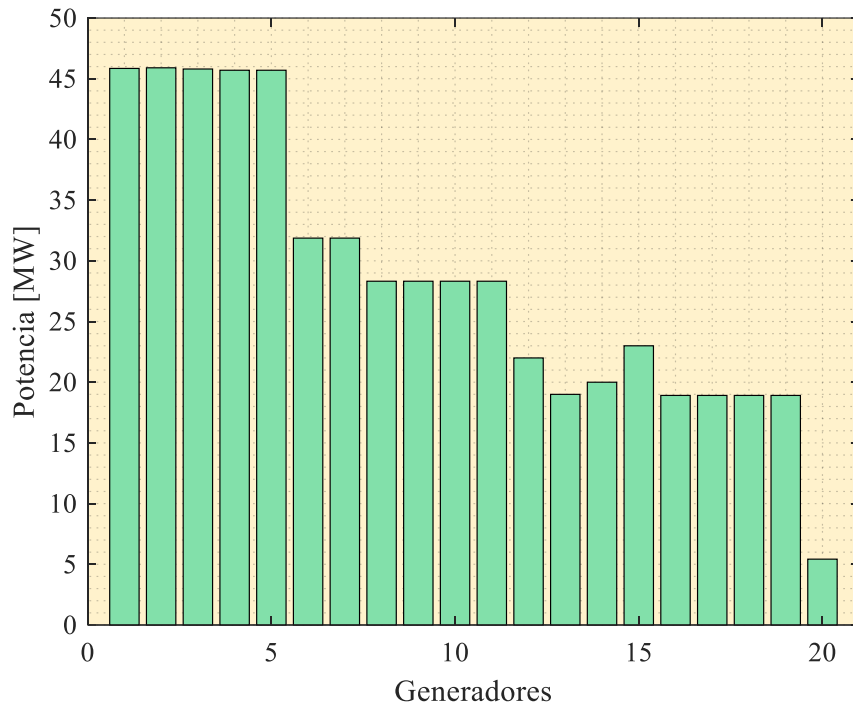


Figura 27. Potencias de los generadores del sistema de subtransmisión con energía renovable en todo el sistema

Fuente: Autor

Tabla 17. Valor de potencias de los generadores del sistema de subtransmisión con cuatro fuentes de energía renovable

Unidad	Potencia (MW)
Generador 1	45.85
Generador 2	45.90
Generador 3	45.80
Generador 4	45.70
Generador 5	45.70
Generador 6	31.872
Generador 7	31.872
Generador 8	28.32

Generador 9	28.32
Generador 10	28.32
Generador 11	28.32
Generador 12	22
Generador 13	19
Generador 14	20
Generador 15	23
Generador 16	18.912
Generador 17	18.912
Generador 18	18.912
Generador 19	18.912
Generador 20	5.424

Fuente: Autor

Tabla 18. Combustible y emisiones del sistema de subtransmisión sin energía renovable

Costo de combustible (\$)	Cantidad de emisiones (lb)
0	0

Fuente: Autor

En la Figura 28, se aprecia la comparación de los diagramas de convergencia de los casos de estudio del sistema de subtransmisión. Se evidencia que mientras más energía renovable exista en el sistema más rápida será la convergencia de esta, y además se reduce la función objetivo.

En la Figura 29, se aprecia la comparación de los diagramas de potencias de los casos de estudio del sistema de subtransmisión y en la Tabla 19 sus valores respectivos. Se evidencia que existe variación en dos subestaciones principalmente, en la subestación "Descanso" (de generador 12 a generador 15) que es donde se está integrando las fuentes de energía

renovable y en la subestación “Abanico” (de generador 1 a generador 5) que es la que posee generadores de mayor capacidad. El mayor despacho de generación corresponde al generador 2 con 45.90 MW cuando se está operando todo el sistema con energía renovable, mientras que el menor despacho corresponde al generador 20 con 5.424 MW en todos los casos de estudio.

En la Figura 30, se aprecia los costos de combustibles de los tres casos de estudio. Sin la inserción de energía renovable el sistema presenta mayores costos de generación para suplir la demanda, mientras que, con la inserción de generación renovable los costos se reducen en un 91.94% cuando se agrega dos fuentes de energía renovable (1 fotovoltaica y 1 eólica) y con la inserción de cuatro fuentes renovables (2 fotovoltaicas y 2 eólicas) los costos de combustible se reducen en un 100%, esto se debe a que al sustituir los generadores convencionales por fuentes de energía renovable se evita la compra de combustible, el porcentaje de reducción es significativo. El sistema al tener mayor cantidad de energía renovable tiende a ser más inestable y para contrarrestar esta inestabilidad las fuentes convencionales deben producir más energía, así, el sistema se vuelve más robusto y mejora la estabilidad del sistema. Y cuando no existe fuentes convencionales en el sistema, la generación de los generadores de más capacidad aumenta para así crear robustez en el sistema y mantener la estabilidad de este.

En la Figura 31, se evidencia la cantidad de emisiones de los dos casos de estudio. Sin la inserción de energía renovable el sistema presenta mayor cantidad de emisiones, ya que, el sistema consta con las cuatro unidades operando con generadores convencionales, no obstante, al sacar de operación dos generadores convencionales e integrar dos de generación renovable (fotovoltaico y eólico) se mejora notablemente el sistema en cuanto a emisiones, ya que, se ha logrado una reducción de emisiones de un 50%, al tener todo el sistema operando con energía renovable las emisiones emitidas al generar energía son nulas. En la Tabla 20, se aprecia la comparativa de lo expuesto anteriormente.

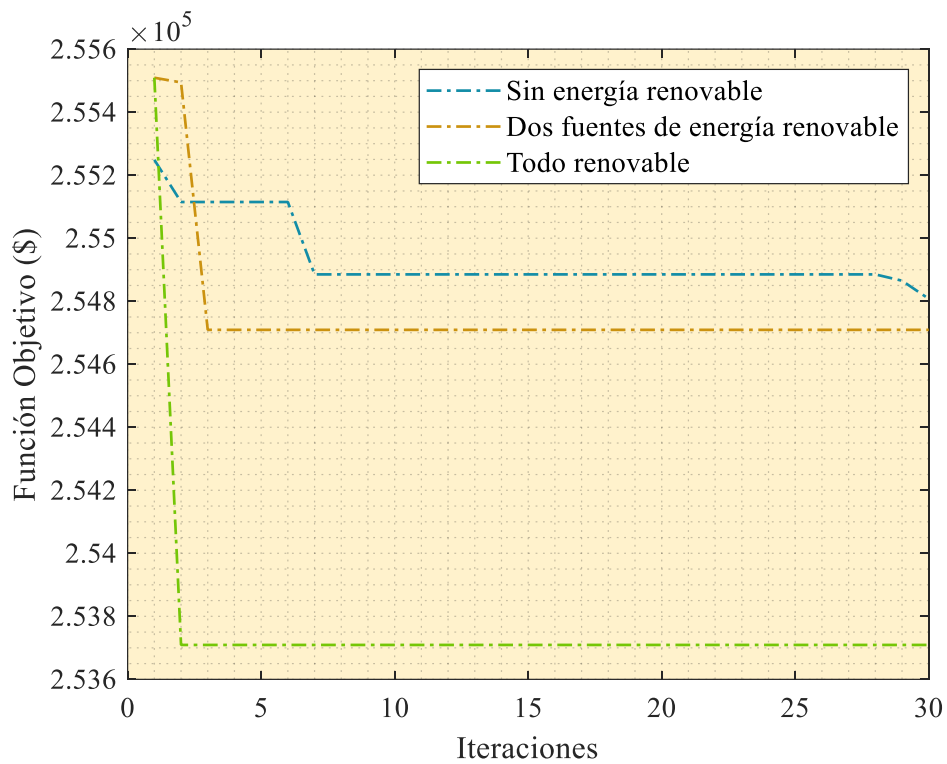


Figura 28. Convergencia de los estudios en el sistema de subtransmisión

Fuente: Autor

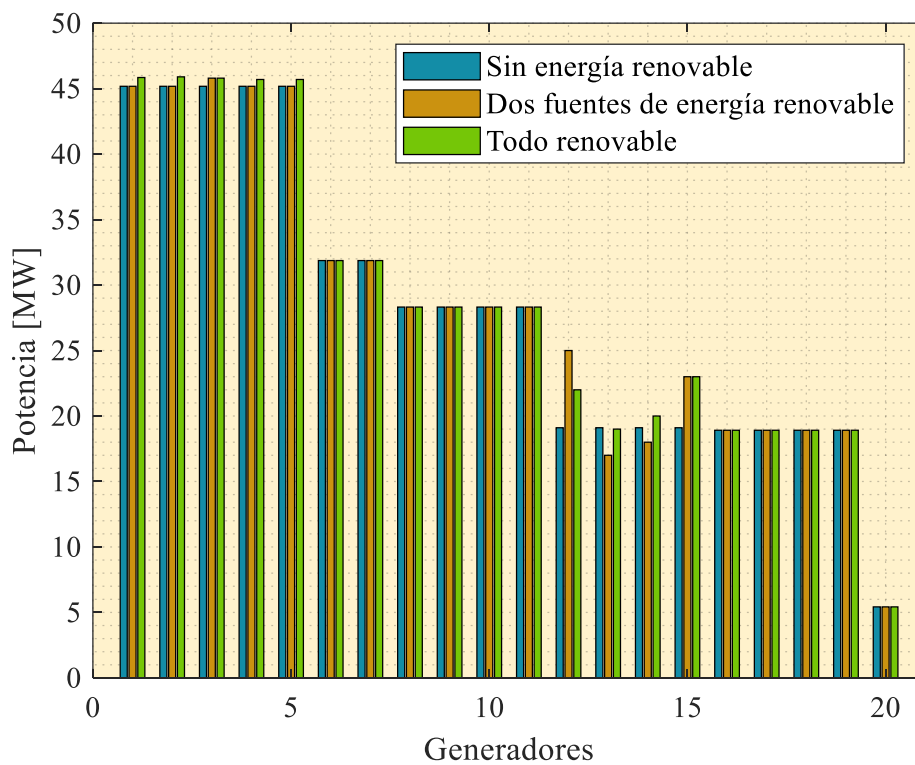


Figura 29. Potencias de los estudios en el sistema de subtransmisión

Fuente: Autor

Tabla 19. Tabla comparativa de las potencias de los generadores del sistema de subtransmisión

Unidad	Potencia (MW)		
	Condiciones iniciales	Parcialmente renovable	Totalmente renovable
Generador 1	45.18	45.18	45.85
Generador 2	45.18	45.18	45.90
Generador 3	45.18	45.80	45.80
Generador 4	45.18	45.18	45.70
Generador 5	45.18	45.18	45.70
Generador 6	31.872	31.872	31.872
Generador 7	31.872	31.872	31.872
Generador 8	28.32	28.32	28.32
Generador 9	28.32	28.32	28.32
Generador 10	28.32	28.32	28.32
Generador 11	28.32	28.32	28.32
Generador 12	19.104	25	22
Generador 13	19.104	17	19
Generador 14	19.104	18	20
Generador 15	19.104	23	23
Generador 16	18.912	18.912	18.912
Generador 17	18.912	18.912	18.912
Generador 18	18.912	18.912	18.912

Generador 19	18.912	18.912	18.912
Generador 20	5.424	5.424	5.424

Fuente: Autor

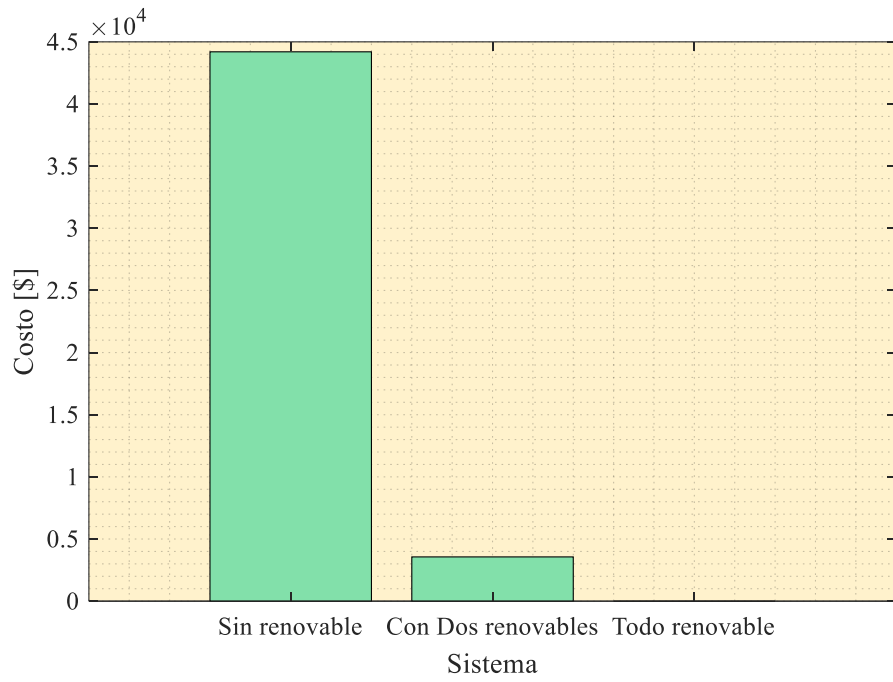


Figura 30. Costos de combustible del sistema de subtransmisión

Fuente: Autor

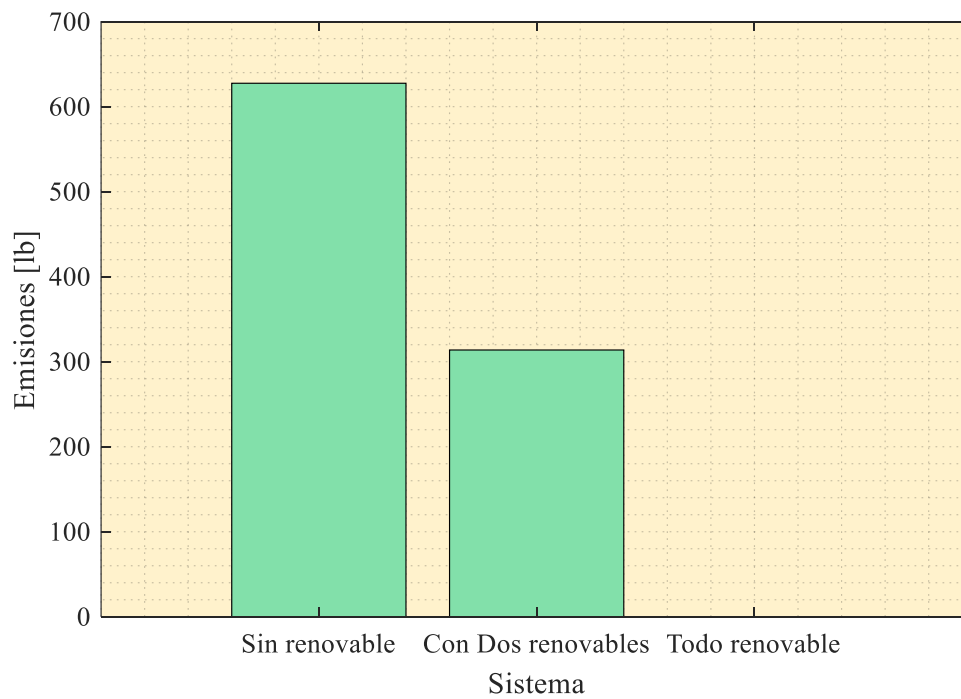


Figura 31. Cantidad de emisiones del sistema de subtransmisión

Fuente: Autor

Tabla 20. Tabla comparativa de costos de emisiones y combustible de los generadores del sistema de subtransmisión

Costos	Potencia (MW)		
	Condiciones iniciales	Parcialmente renovable	Totalmente renovable
Costo de combustible	44197.471	3560	0
Costo de emisiones	627.532	313.766	0

Fuente: Autor

CONCLUSIONES

El algoritmo de polinización de flores es flexible y simple, ya que, tiene solo un parámetro clave p junto con un factor de escala γ , lo que hace que el algoritmo sea más fácil de implementar. Además, la linealidad en las principales fórmulas de actualización permite realizar algunos análisis teóricos en términos de sistemas dinámicos o teorías de cadenas de Markov. Esto podría constituir un tema útil para futuras investigaciones.

El algoritmo se ha evaluado en un sistema de 10 generadores y se ha realizado dos casos de estudio, el caso de estudio 1 corresponde al sistema en condiciones iniciales y el caso de estudio 2 con la inserción de un generador fotovoltaico y eólico. Para cada caso de estudio se ha denotado los resultados de convergencia de la función objetivo, potencia entregada por cada unidad generadora, costos de combustible y cantidad de emisiones.

Al comparar los resultados del sistema con y sin generación renovable se aprecia que, con la inserción de un generador fotovoltaico y un eólico la convergencia de la función objetivo es más rápida, además, el despacho de las unidades generadoras se reparte mejor, así, no se tendrán generadores sobrecargados para suplir la demanda. Por otro lado, los costos de combustible y la cantidad de emisiones se reducen en un 9.26% y 28.05%, respectivamente, esto indica que sí es posible mejorar el despacho económico ambiental del sistema de prueba con la inserción de energía renovable.

El algoritmo también se ha evaluado en un sistema de subtransmisión eléctrica de la “Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.” (CENTROSUR), ubicada en Cuenca, Ecuador, en condiciones iniciales y con la inserción de fuentes de energía renovable (1 fotovoltaica y 1 eólica) en los generadores 13 y 14, correspondientes a la subestación “Descanso”, con la inserción de un generador fotovoltaico y un eólico la convergencia de la función objetivo es más rápida. Dado que este sistema de subtransmisión en condiciones iniciales contiene 16 unidades de generación renovable (Hidroeléctrica) al aumentar dos más tiende a perder estabilidad el sistema, por ello, los generadores 12 y 15 que funcionan con fuentes de energía convencional y también forman parte de la subestación “Descanso”, incrementan su aporte al sistema para otorgar robustez al mismo y mantener la estabilidad. Por otro lado, los costos de combustible y la cantidad de emisiones se reducen en un 91.94% y 50%, respectivamente, esto indica que sí es posible mejorar el despacho económico ambiental del sistema de subtransmisión con la inserción de energía renovable. También se ha evaluado este sistema con la inserción de 4 fuentes de energía renovable en la subestación “Descanso”, es decir, el sistema completo genera electricidad solo con energía renovable, los resultados obtenidos en

esta simulación indican que mientras mayor sea la integración de energía renovable en el sistema la convergencia de este será más rápida, además, los costos de combustible y emisiones emitidas al medio ambiente son nulas. Dado que no existe fuentes de energía convencional que puedan dar robustez al sistema, los generadores de mayor capacidad tienen a generar más para suplir esta robustez y mantener la estabilidad del sistema, los generadores de mayor capacidad corresponden a la subestación “Abanico” (de generador 1 a generador 5).

RECOMENDACIONES

Se recomienda aplicar el presente algoritmo a sistemas de prueba más grandes para poder evaluar su eficiencia.

Es recomendable analizar bien el sistema que se pondrá a prueba mediante el algoritmo FPA para determinar correctamente la cantidad de iteraciones necesarias para que el sistema alcance el óptimo global.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Ruiz-Tipán and A. Valenzuela, “Despacho económico en centrales de generación térmicas considerando restricciones económicas y ambientales para la operación en isla de una red eléctrica industrial,” *Brazilian Appl. Sci. Rev.*, pp. 851–871, 2022, doi: 10.34115/basrv6n3-002.
- [2] L. Sepúlveda, “Despacho económico ambiental en sistemas eléctricos,” *Acad. Manag. Rev.*, 2020.
- [3] E. Muela, “Despacho económico ambiental con variables difusas y posibilísticas,” no. September, p. 2015, 2020.
- [4] X. Yang, *Studies in Computational Intelligence 744 Nature-Inspired Algorithms and Applied Optimization*. 2018.
- [5] E. Carranza, “Autoabastecimiento de energía mediante cogeneración por el incremento de la demanda eléctrica y térmica- Empresa OLPESA,” pp. 5–6, 2018.
- [6] F. Ruiz-Tipán and A. Valenzuela, “Literary review of economic environmental dispatch

- considering bibliometric analysis,” *Iteckne*, 2021, doi: <https://doi.org/10.15332/iteckne.v19i1.2631>.
- [7] IEEE committee report, “Present practices in the economic operation of power systems,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-90, no. 4, pp. 1768–1775, 1971, doi: 10.1109/TPAS.1971.293169.
- [8] F. N. Lee and A. M. Breipohl, “Reserve constrained economic dispatch with prohibited operating zones,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 1, pp. 246–254, 1993, doi: 10.1109/59.221233.
- [9] F. Ruiz-Tipan and C. Barrera, “Determinación de la compensación reactiva en paralelo en sistemas de transmisión usando resultados de sensibilidad y curvas QV,” 2020.
- [10] F. Ruiz-Tipan, C. Barrera-Singana, and A. Valenzuela, “Reactive power compensation using power flow sensitivity analysis and QV curves,” *2020 Ieee Andescon, Andescon 2020*, 2020, doi: 10.1109/ANDESCON50619.2020.9272113.
- [11] M. A. Abido, “Multiobjective particle swarm optimization for environmental/economic dispatch problem,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 7, pp. 1105–1113, 2009, doi: 10.1016/j.epsr.2009.02.005.
- [12] M. R. B. D. Santos *et al.*, “A proposed methodology involving progressive bounded constraints and interior - exterior methods in smoothed economic/environmental dispatch problems,” vol. 15, no. 8, pp. 1422–1431, 2017.
- [13] T. Blaschke, M. Biberacher, S. Gadocha, and I. Schardinger, “‘Energy landscapes’: Meeting energy demands and human aspirations,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 55, pp. 3–16, 2013, doi: 10.1016/j.biombioe.2012.11.022.
- [14] M. Child, O. Koskinen, L. Linnanen, and C. Breyer, “Sustainability guardrails for energy scenarios of the global energy transition,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, no. April 2017, pp. 321–334, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.079.
- [15] M. S. Arif, “Residential solar panels and their impact on the reduction of carbon emissions,” *Spring*, pp. 1–18, 2013, [Online]. Available: https://nature.berkeley.edu/classes/es196/projects/2013final/ArifM_2013.pdf.
- [16] A. Jäger-Waldau, “European Photovoltaics in world wide comparison,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 352, no. 9-20 SPEC. ISS., pp. 1922–1927, 2006, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2005.10.074.
- [17] B. Parida, S. Iniyar, and R. Goic, “A review of solar photovoltaic technologies,” *Renew.*

- Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1625–1636, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.032.
- [18] K. Q. Peng and S. T. Lee, “Silicon nanowires for photovoltaic solar energy conversion,” *Adv. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 198–215, 2011, doi: 10.1002/adma.201002410.
- [19] A. Nishimura *et al.*, “Life cycle assessment and evaluation of energy payback time on high-concentration photovoltaic power generation system,” *Appl. Energy*, vol. 87, no. 9, pp. 2797–2807, 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.08.011.
- [20] N. Hatziaargyriou and A. Zervos, “Wind Power Development in Europe,” *Proc. IEEE*, vol. 89, no. 12, pp. 1765–1782, 2001, doi: 10.1109/5.975906.
- [21] E. Kabalci, “Design and analysis of a hybrid renewable energy plant with solar and wind power,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 72, pp. 51–59, 2013, doi: 10.1016/j.enconman.2012.08.027.
- [22] G. Abad and M. Penalba, “Molinos de viento patentados por Jerónimo de Ayanz y Beaumont en el año 1606 ; un análisis conceptual desde una perspectiva ingenieril del año 2021,” pp. 1–26, 2021.
- [23] J. Moragues and A. Rapallini, “Energía eólica,” *Energía Eólica*, p. 22, 2003, [Online]. Available: http://www.iae.org.ar/renovables/ren_eolica.pdf.
- [24] J. Feliz, H. Rodríguez, D. Rosario, D. Hernández, and A. Fernández, “Mechanical design of blades for a wind turbines of 250w power,” vol. 4, no. 1, pp. 25–55, 2021.
- [25] R. Medina, “Cálculo y diseño de la pala (Ehecamani) de un aerogenerador,” p. 97, 2011.
- [26] N. Waser, “Flower constancy: definition, cause and measurement,” *Am. Nat.*, vol. 127, no. 5, pp. 593–603, 1986.
- [27] S. S. Renner and H. Schaefer, “The evolution and loss of oil-offering flowers: New insights from dated phylogenies for angiosperms and bees,” *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 365, no. 1539, pp. 423–435, 2010, doi: 10.1098/rstb.2009.0229.
- [28] X. S. Yang, M. Karamanoglu, and X. He, “Flower pollination algorithm: A novel approach for multiobjective optimization,” *Eng. Optim.*, vol. 46, no. 9, pp. 1222–1237, 2014, doi: 10.1080/0305215X.2013.832237.

ANEXOS

ANEXO A. Características del sistema de 10 generadores.

Unidad	γ (\$ /MWh)	β (\$ /MWh)	α (\$/h)	e (\$ /h)	f (rad /MW)	p^{min} (MW)	p^{max} (MW)	a (lb /MW ² h)	b (lb /MWh)	c (lb/h)	n (lb /h)	δ (1 /MW)
P1	0.12951	40.5407	1,000,403	33	0.0174	10	55	0.04702	-3.9864	360.0012	0.25475	0.01234
P2	0.10908	39.5804	950,606	25	0.0178	20	80	0.04652	-3.9524	350.0056	0.25475	0.01234
P3	0.12511	36.5104	900,705	32	0.0162	47	120	0.04652	-3.9023	330.0056	0.25163	0.01215
P4	0.12111	39.5104	800,705	30	0.0168	20	130	0.04652	-3.9023	330.0056	0.25163	0.01215
P5	0.15247	38,539	756,799	30	0.0148	50	160	0.0042	0.3277	13.8593	0.2497	0.012
P6	0.10587	46.1592	451,325	20	0.0163	70	240	0.0042	0.3277	13.8593	0.2497	0.012
P7	0.03546	38.3055	1,243,531	20	0.0152	60	300	0.0068	-0.5455	40.2669	0.248	0.0129
P8	0.02803	40.3965	1,049,998	30	0.0128	70	340	0.0068	-0.5455	40.2669	0.2499	0.01203
P9	0.02111	36.3278	1,658,569	60	0.0136	135	470	0.0046	-0.5112	42.8955	0.2547	0.01234
P10	0.01799	38.2704	1,356,659	40	0.0141	150	470	0.0046	-0.5112	42.8955	0.2547	0.01234

Fuente: Autor

Nota: Los siguientes anexos de la Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica CENTRO SUR, se encuentran en otro documento adjuntado ya que estos diagramas se encuentran en formato A3 para poder visualizar de mejor manera las diferentes figuras que corresponden a los distintos casos de estudio expuestos anteriormente.

En los anexos se aprecia los diagramas del sistema en condiciones iniciales, renovable parcial y totalmente renovable, simulados y con su respectiva caja de resultados, esto presentan un margen de estabilidad idóneo al integrar energías renovables en el sistema.

ANEXO B. Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador.

ANEXO C. Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado

ANEXO D. Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado con resultados

ANEXO E. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador.

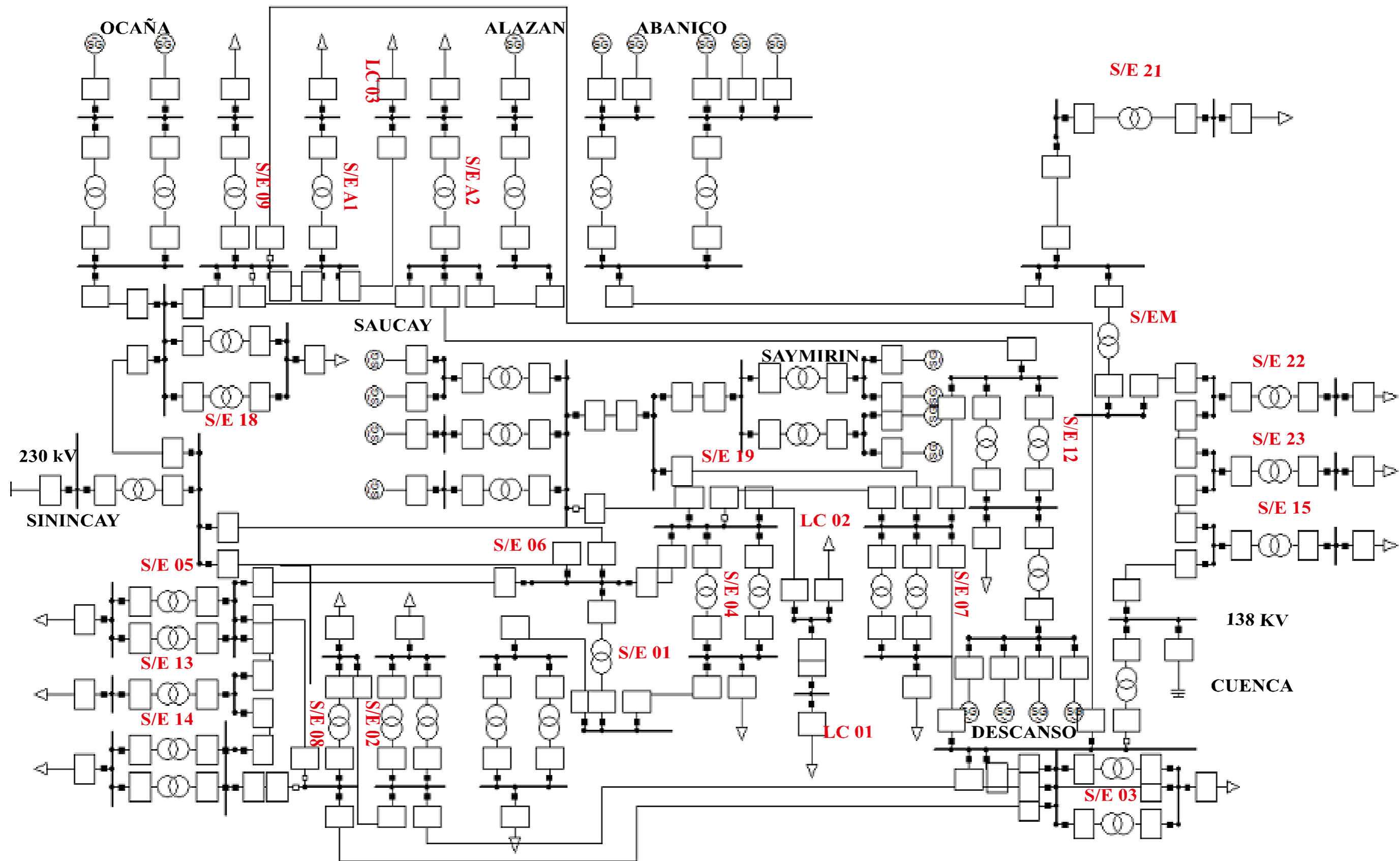
ANEXO F. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado

ANEXO G. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado con resultados

ANEXO H. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable completa de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador.

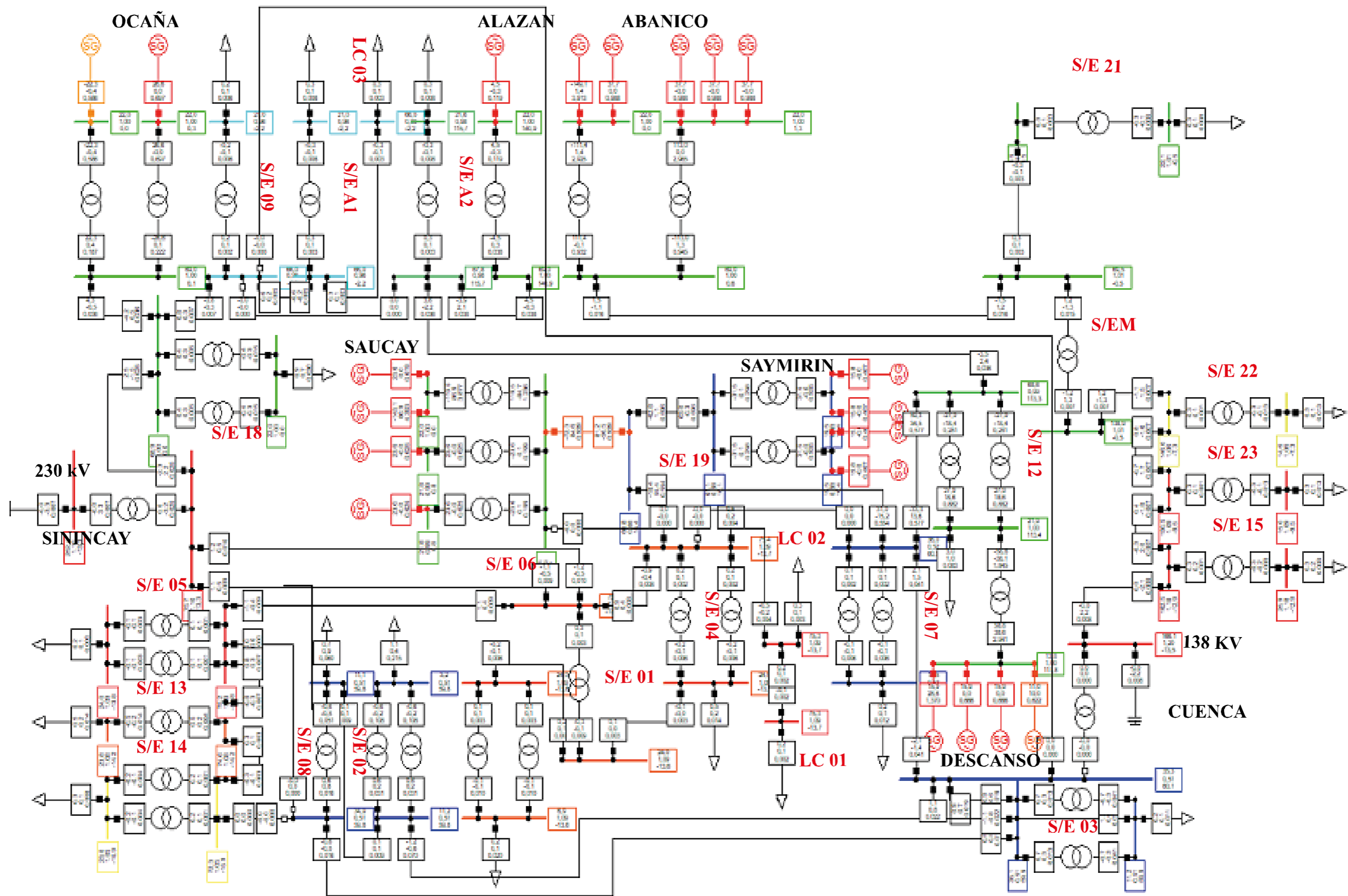
ANEXO I. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable completa de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado

ANEXO J. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable completa de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado con resultados



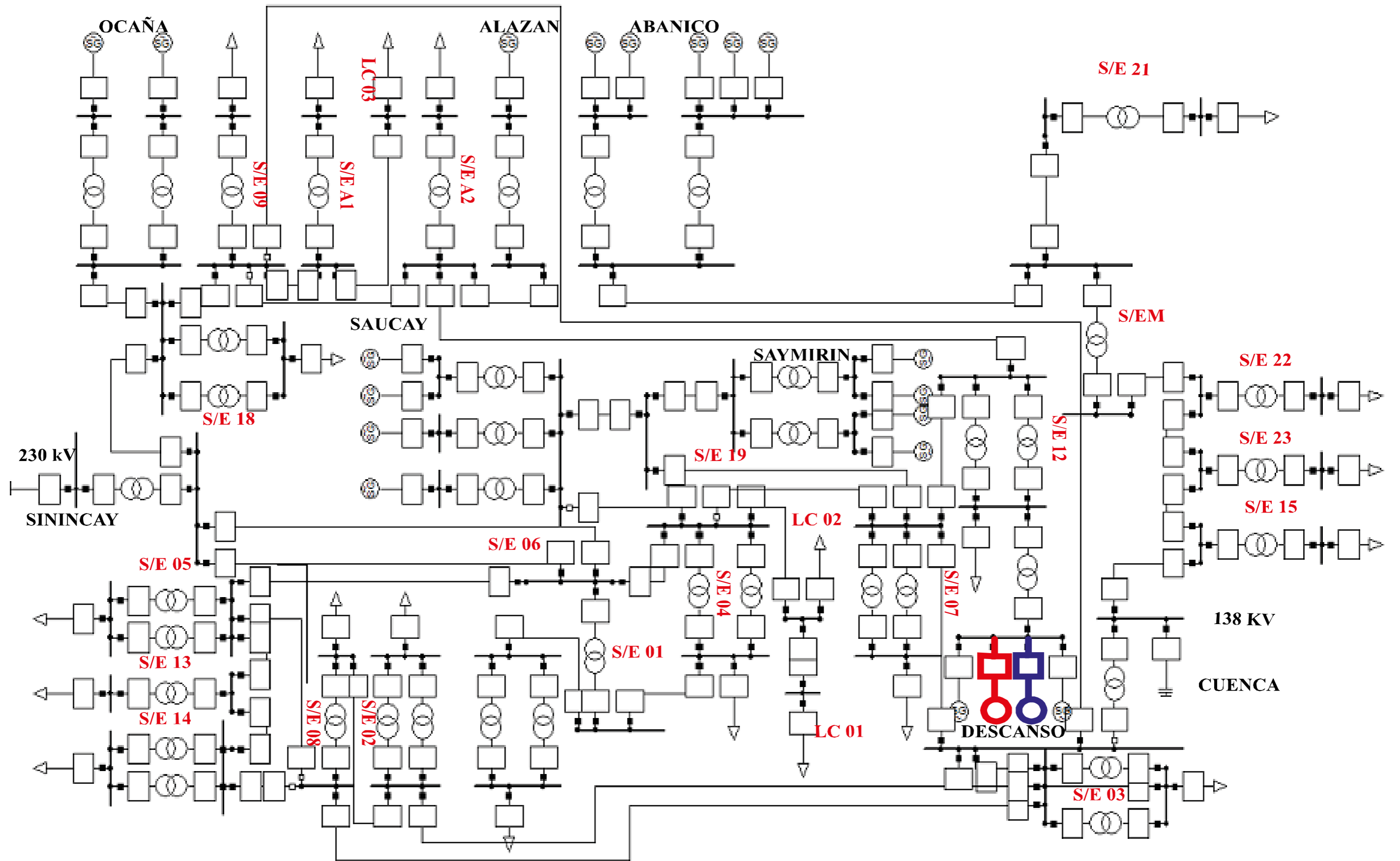
ANEXO B. Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador.

Fuente: Autor



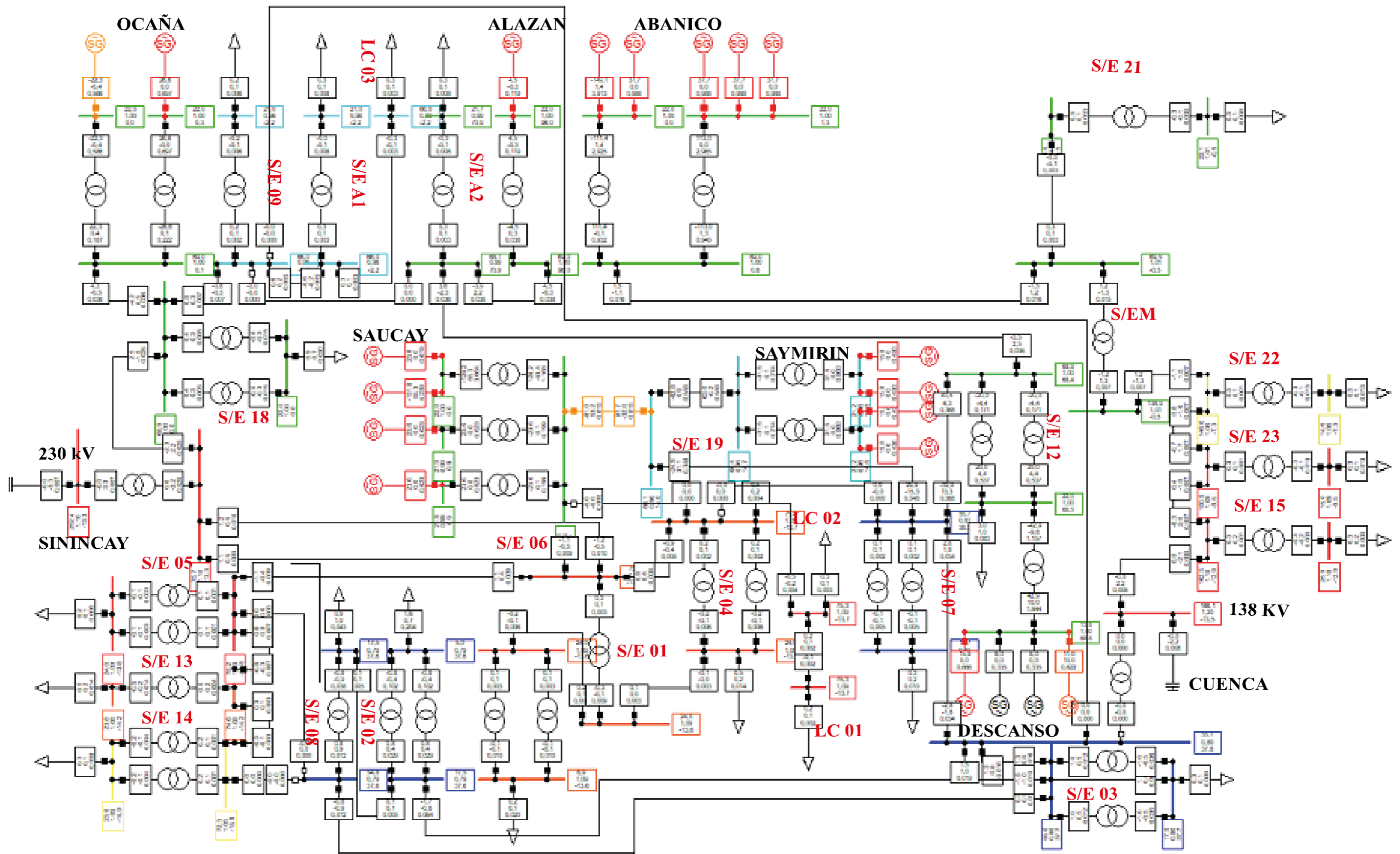
ANEXO C. Red de subtransmisión de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado

Fuente: Autor



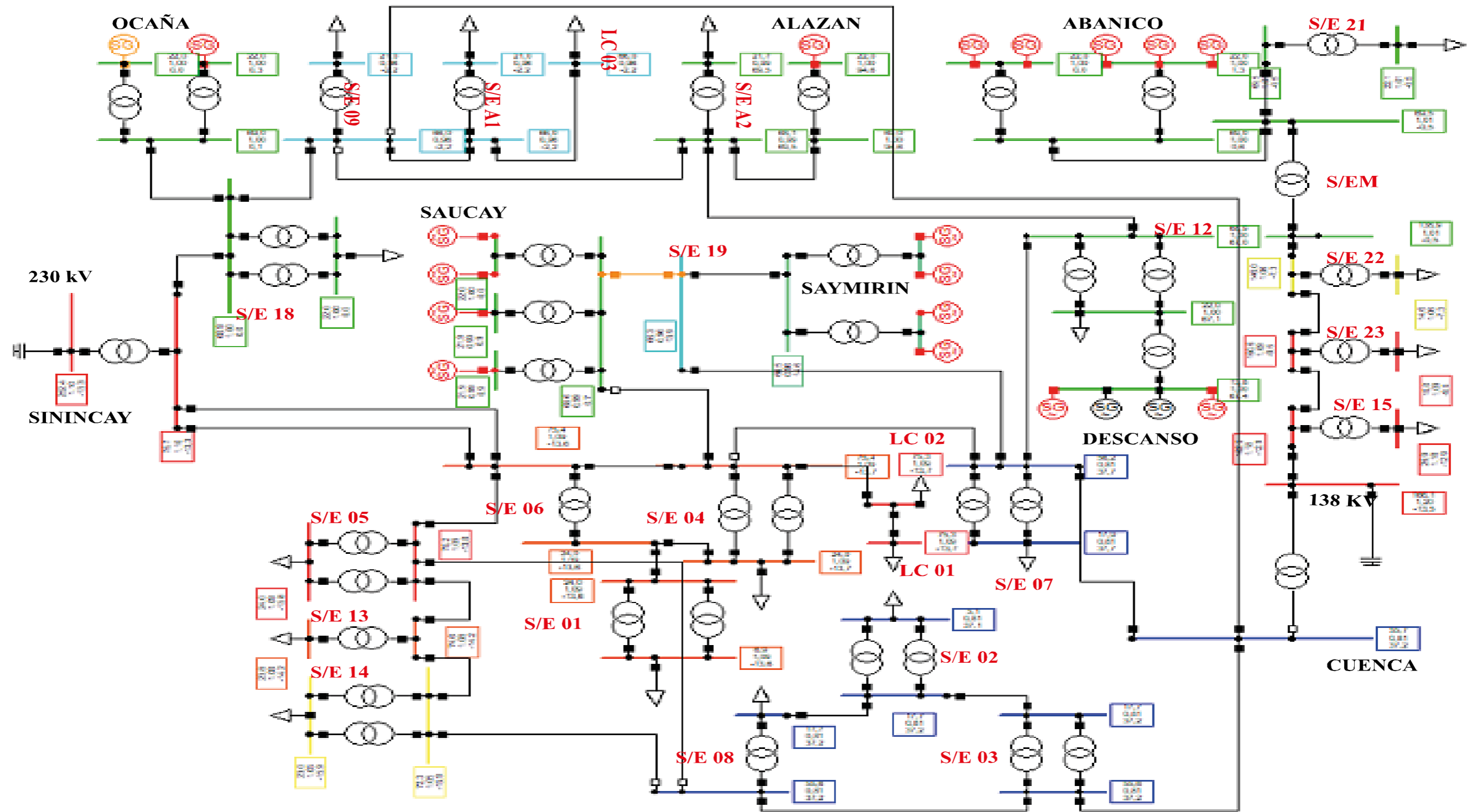
ANEXO E. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador.

Fuente: Autor



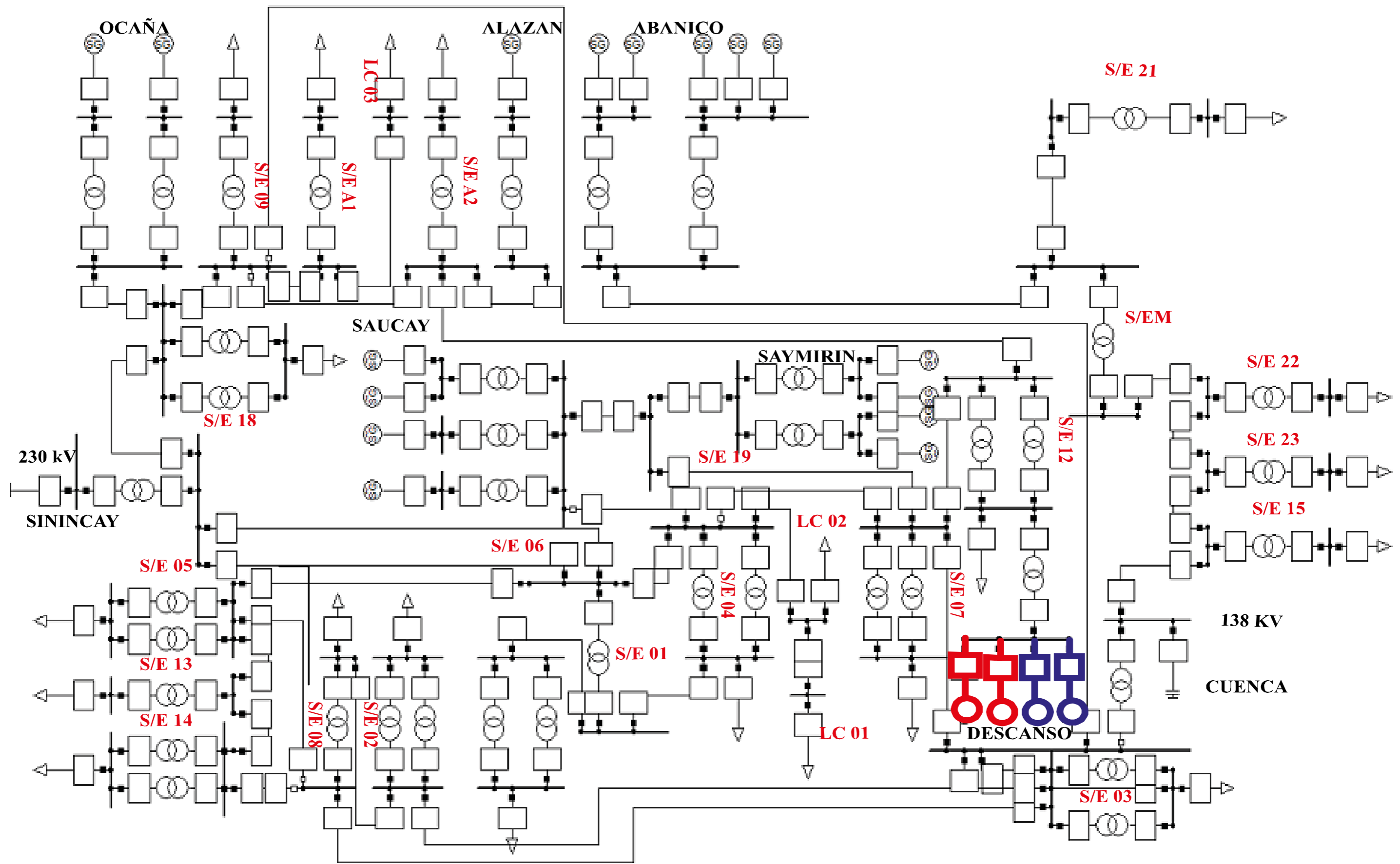
ANEXO F. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado

Fuente: Autor



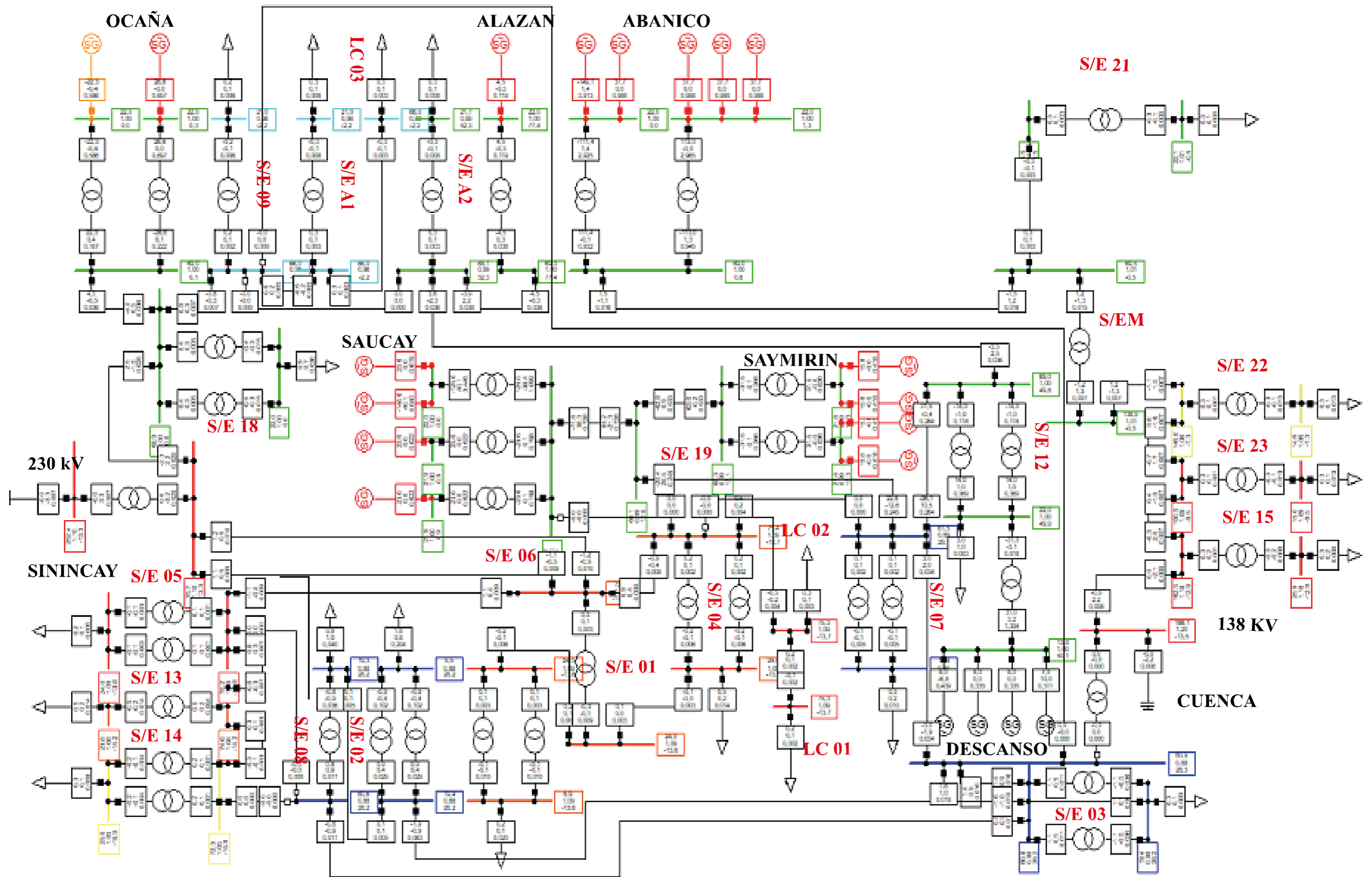
ANEXO G. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado con resultados

Fuente: Autor



ANEXO H. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable completa de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador.

Fuente: Autor




ANEXO I. Red de subtransmisión con inserción de energía renovable completa de la Empresa de Distribución Eléctrica, Cuenca – Ecuador. Simulado

Fuente: Autor

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, José Enrique Aguilar Barros portador de la cédula de ciudadanía N.º 0705648657. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación "Despacho económico ambiental mediante el algoritmo de polinización de flores aplicado a los sistemas eléctricos de potencia" de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 16 de enero de 2023

F:

José Enrique Aguilar Barros.
0705648657