



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**DEPACHO ECONÓMICO EN SISTEMAS
ELÉCTRICOS CON GENERACIÓN HÍBRIDA A
TRAVÉS DEL ALGORITMO DE EVOLUCIÓN
DIFERENCIAL SUPONIENDO ESCENARIOS DE
LIMITACIÓN ENERGÉTICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: JORGE STEVEN CADENA ALBUJA

TUTOR: CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA

Quito -Ecuador

2025

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Jorge Steven Cadena Albuja con documento de identificación No. 1723184121 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 17 de marzo del año 2025

Atentamente,



Jorge Steven Cadena Albuja

1723184121

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Jorge Steven Cadena Albuja con documento de identificación No. 1723184121, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Despacho económico en sistemas eléctricos con generación híbrida a través del algoritmo de evolución diferencial suponiendo escenarios de limitación energética”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 17 de marzo del año 2025

Atentamente,



Jorge Steven Cadena Albuja

1723184121

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña con documento de identificación N° 0503503336, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESPACHO ECONÓMICO EN SISTEMAS ELÉCTRICOS CON GENERACIÓN HÍBRIDA A TRAVÉS DEL ALGORITMO DE EVOLUCIÓN DIFERENCIAL SUPONIENDO ESCENARIOS DE LIMITACIÓN ENERGÉTICA**, realizado por Jorge Steven Cadena Albuja con documento de identificación N° 1723184121, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 17 de marzo del año 2025

Atentamente,



Ing. Carlos Andrés Barrera Singaña, MSc
0503503336

ÍNDICE GENERAL

1	Contenido	
2	Introducción	5
3	Marco teórico.....	6
3.1	Despacho económico	6
3.1.1	Corto Plazo	7
3.1.2	Mediano Plazo	7
3.1.3	Largo Plazo.....	7
3.2	Despacho económico en sistemas con generación híbrida (DESGH)	7
3.2.1	Métodos de generación eléctrica utilizados para el sistema híbrido.....	8
3.3	Manejo de variables estocásticas	9
3.3.1	Funciones de distribución de probabilidad (FPD)	9
3.3.2	Montecarlo para predicción de variables estocásticas	10
3.4	Formulación matemática del DESGH	10
3.5	Técnicas aplicadas a la solución del despacho económico	13
3.5.1	Evolución diferencial (DE)	13
3.5.2	Algoritmo Cultural (CA).....	14
3.5.3	Enjambre de Partículas (PSO)	14
3.5.4	Grey Wolf (GWO)	15
3.6	Implementación de las técnicas para el DESGH	16
4	Sistema Híbrido de Prueba.....	21
5	Análisis de Resultados	22
5.1	Caso 1	23
5.2	Caso 2	27
5.3	Mejor despacho en el caso 1 y 2 durante la mayor y menor demanda.....	30
6	Conclusiones.....	35
7	Trabajos Futuros.....	35
8	Referencias.....	35
8.1	Matriz de Estado del Arte	39
8.2	Resumen de Indicadores	42
9	Anexos.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. SISTEMA UNINODAL.....	12
FIGURA 2. HIDROELÉCTRICAS ACOPLADAS HIDRÁULICAMENTE	13
FIGURA 3. HISTOGRAMA DE LA VELOCIDAD DE VIENTO CON LA DISTRIBUCIÓN WEIBULL AJUSTADA	16
FIGURA 4. HISTOGRAMA DE RADIACIÓN SOLAR CON LA FUNCIÓN WEIBULL AJUSTADA	17
FIGURA 5. HISTOGRAMA DE LOS DATOS DE TEMPERATURA	17
FIGURA 6. HISTOGRAMA DE DATOS DE TEMPERATURA CON LA FUNCIÓN GMM AJUSTADA	17
FIGURA 7. HIDROELÉCTRICAS ACOPLADAS EN CASCADA	22
FIGURA 8. POTENCIA DEMANDADA POR LA CARGA.....	22
FIGURA 9. PREDICCIÓN DE RADIACIÓN SOLAR.....	22
FIGURA 10. PREDICCIÓN DE VELOCIDAD DE VIENTO.....	22
FIGURA 11. PREDICCIÓN DE TEMPERATURA	22
FIGURA 12. POTENCIA GENERADA CON ENERGÍAS RENOVABLES CONVENCIONALES	23
FIGURA 13. ENTRADAS NATURALES DE AGUA	23
FIGURA 14. FLUJO DE DESCARGA DE AGUA POR PSO	23
FIGURA 15. FLUJO DE DESCARGA DE AGUA POR GWO	24
FIGURA 16. FLUJO DE DESCARGA DE AGUA POR DE	24
FIGURA 17. FLUJO DE DESCARGA DE AGUA POR CA	24
FIGURA 18. MANEJO DE RESERVORIOS CON LA TÉCNICA PSO.....	24
FIGURA 19. MANEJO DE RESERVORIOS CON LA TÉCNICA GWO.....	24
FIGURA 20. MANEJO DE RESERVORIOS CON LA TÉCNICA DE.....	24
FIGURA 21. MANEJO DE RESERVORIOS CON LA TÉCNICA CA.....	25
FIGURA 22. PSO PARA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA.....	25
FIGURA 23. GWO PARA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA.....	25
FIGURA 24. DE PARA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA.....	25
FIGURA 25. CA PARA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA.....	25
FIGURA 26. ESQUEMA DE DESPACHO PROPUESTO POR LA TÉCNICA PSO PARA EL CASO 1	26
FIGURA 27. ESQUEMA DE DESPACHO PROPUESTO POR LA TÉCNICA GWO PARA EL CASO 1	26
FIGURA 28. ESQUEMA DE DESPACHO PROPUESTO POR LA TÉCNICA DE PARA EL CASO 1	26
FIGURA 29. ESQUEMA DE DESPACHO PROPUESTO POR LA TÉCNICA CA PARA EL CASO 1	26
FIGURA 30. COSTOS OPERATIVOS	26
FIGURA 31. ENTRADAS NATURALES DE AGUA PREVISTOS PARA EL CASO 2	27
FIGURA 32. FLUJO DE DESCARGA DEL AGUA PARA EL CASO 2 POR PSO	27
FIGURA 33. FLUJO DE DESCARGA DEL AGUA PARA EL CASO 2 POR GWO	27

FIGURA 34. FLUJO DE DESCARGA DEL AGUA PARA EL CASO 2 POR DE	27
FIGURA 35. FLUJO DE DESCARGA DEL AGUA PARA EL CASO 2 POR CA	28
FIGURA 36. MANEJO DE LOS RESERVORIOS EN EL CASO 2 CON PSO	28
FIGURA 37. MANEJO DE LOS RESERVORIOS EN EL CASO 2 CON GWO.....	28
FIGURA 38. MANEJO DE LOS RESERVORIOS EN EL CASO 2 CON DE.....	28
FIGURA 39. MANEJO DE LOS RESERVORIOS EN EL CASO 2 CON CA.....	28
FIGURA 40. PSO PARA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN EL CASO 2	29
FIGURA 41. GWO PARA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN EL CASO 2.....	29
FIGURA 42. DE PARA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN EL CASO 2	29
FIGURA 43. CA PARA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN EL CASO 2	29
FIGURA 44. ESQUEMA DE DESPACHO PROPUESTO POR LA TÉCNICA PSO PARA EL CASO 2	29
FIGURA 45. ESQUEMA DE DESPACHO PROPUESTO POR LA TÉCNICA GWO PARA EL CASO 2	30
FIGURA 46. ESQUEMA DE DESPACHO PROPUESTO POR LA TÉCNICA DE PARA EL CASO 2	30
FIGURA 47.. ESQUEMA DE DESPACHO PROPUESTO POR LA TÉCNICA CA PARA EL CASO 2	30
FIGURA 48. COSTOS LIGADOS A LA OPERACIÓN EN EL CASO 2.....	30
FIGURA 49. GENERACIÓN ELÉCTRICA CON RECURSOS RENOVABLES EN EL CASO 1 PARA LA MENOR DEMANDA	31
FIGURA 50. GENERACIÓN ELÉCTRICA CON RECURSOS RENOVABLES EN EL CASO 1 PARA LA MAYOR DEMANDA	32
FIGURA 51. GENERACIÓN ELÉCTRICA CON RECURSOS RENOVABLES EN EL CASO 2 PARA LA MENOR DEMANDA	33
FIGURA 52. GENERACIÓN ELÉCTRICA CON RECURSOS RENOVABLES EN EL CASO 2 PARA LA MAYOR DEMANDA	34

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. NOMENCLATURA	18
TABLA 2. PSEUDOCÓDIGO UTILIZADO PARA TRATAMIENTO DE VARIABLES ESTOCÁSTICAS Y ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA POR ERNC	18
TABLA 3. ALGORITMO PRINCIPAL PARA EL DESPACHO	19
TABLA 4. PSEUDOCÓDIGO QUE CONTIENE LA RUTINA ED	19
TABLA 5. RUTINA CA	20
TABLA 6. RUTINA PSO.....	20
TABLA 7. RUTINA GWO	21
TABLA 8. PSEUDOCÓDIGO PARA CALCULAR VIOLACIONES POR INCUMPLIMIENTO DE LAS PROHIBICIONES.....	21
TABLA 9. REPETICIÓN QUE MUESTRA EL MEJOR DESPACHO POR CADA TÉCNICA	23
TABLA 10. APORTE PORCENTUAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR PARTE DE LAS HIDROELÉCTRICAS.....	25
TABLA 11. REPETICIÓN QUE PROPONE EL MEJOR ESQUEMA DE DESPACHO EN EL CASO 2.....	27
TABLA 12. APORTE PORCENTUAL A TRAVÉS DE HIDROELÉCTRICAS EN EL CASO 2.....	29
TABLA 13: MATRIZ DE ESTADO DEL ARTE.	39
TABLA 14. COEFICIENTES Y LÍMITES OPERATIVOS DE LAS HIDROELÉCTRICAS PARA EL CASO 1. 43	
TABLA 15. COEFICIENTES Y LÍMITES OPERATIVOS DE LAS TERMOELÉCTRICAS PARA EL CASO 1 43	
TABLA 16. ENTRADAS DE AGUA NATURAL EN EL CASO 1 PARA CADA SUBPERIODO DE OPTIMIZACIÓN	43
TABLA 17. CONDICIONES INICIALES Y FINALES DE LOS RESERVORIOS, VOLÚMENES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE AGUA Y LÍMITES DE LOS CAUDALES PARA LAS HIDROELÉCTRICAS EN EL CASO 1.....	44
TABLA 18. COEFICIENTES Y LÍMITES OPERATIVOS DE LAS HIDROELÉCTRICAS PARA EL CASO 2. 44	
TABLA 19. COEFICIENTES Y LÍMITES OPERATIVOS DE LAS TERMOELÉCTRICAS PARA EL CASO 2 44	
TABLA 20. ENTRADAS DE AGUA NATURAL EN EL CASO 2 PARA CADA SUBPERIODO DE OPTIMIZACIÓN	44
TABLA 21. CONDICIONES INICIALES Y FINALES DE LOS RESERVORIOS, VOLÚMENES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE AGUA Y LÍMITES DE LOS CAUDALES PARA LAS HIDROELÉCTRICAS EN EL CASO 2.....	45
TABLA 22. PARÁMETROS DE LAS CENTRALES SOLARES FOTOVOLTAICAS.....	45
TABLA 23. PARÁMETROS DEL PARQUE EÓLICO.....	45

DESPACHO ECONÓMICO EN SISTEMAS ELÉCTRICOS CON GENERACIÓN HÍBRIDA A TRAVÉS DEL ALGORITMO DE EVOLUCIÓN DIFERENCIAL SUPONIENDO ESCENARIOS DE LIMITACIÓN ENERGÉTICA.

Resumen

Este documento de investigación aborda el tema de despacho económico a corto plazo en sistemas con generación híbrida, ante escenarios de limitación energética producto del estiaje. La finalidad de comparar diferentes escenarios de generación es, evaluar la importancia que tienen las centrales que aprovechan recursos renovables, sobre el costo de operación total de un Sistema Eléctrico de Potencia.

El sistema de generación híbrido está compuesto por hidroeléctricas, termoeléctricas, centrales solares fotovoltaicas y parques eólicos. Estas últimas dos fuentes marcan el punto de partida puesto que su operación está sujeta a posibles intermitencias por la naturaleza estocástica de sus recursos primarios que son la radiación solar, el viento y la temperatura ambiental.

Para predecir sus comportamientos se recurre a la técnica Montecarlo que está ligado a funciones de distribución de probabilidad que servirán para pronosticar la disponibilidad de los recursos durante el horizonte de planificación.

Una vez concluido esto se maneja los casos de estudio como un problema de despacho hidrotérmico resuelto a través de técnicas heurísticas y metaheurísticas con mayor énfasis sobre el algoritmo de Evolución Diferencial.

Palabras clave: Despacho económico, limitación energética, generación híbrida, Monte Carlo, Heurísticas y Metaheurísticas.

Abstract

This research paper addresses the challenge of short-term economic dispatch in hybrid generation systems under scenarios of energy constraints caused by low water levels. The objective of comparing different generation scenarios is to assess the impact of renewable resource-based power plants on the total operating cost of an Electric Power System.

The hybrid generation system consists of hydroelectric plants, thermoelectric plants, photovoltaic solar plants, and wind farms. The latter two sources are particularly significant, as their operation is subject to potential interruptions due to the stochastic nature of their primary resources: solar radiation, wind and ambient temperature.

To predict their behavior, the Monte Carlo method is employed, leveraging probability distribution functions to forecast resources availability over the planning horizon.

Subsequently, the case studies are framed as a hydrothermal dispatch problem, solved using heuristic and metaheuristic techniques, with a particular emphasis on the Differential Evolution algorithm.

Keywords: Economic Dispatch, energy constraints, hybrid generation, Monte Carlo, Heuristics and Metaheuristic.

2 Introducción

La situación energética mundial se enfrenta a varios desafíos, como el constante incremento de demanda u el aumento gradual de los costos de generación, ante estas problemáticas, se nos presenta como una vía de solución el robustecimiento del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) a través de la implementación de fuentes de generación no convencionales tales como la energía eólica o solar, las cuales ayudan en la primera etapa del SEP a mejorar la confiabilidad, además que brindan beneficios al aprovechar recursos renovables. Sin embargo, presentan incertidumbre en cuanto a su operación debido a la aleatoriedad para disponer de estos recursos que dependen de muchos factores como por ejemplo condiciones ambientales producto de la ubicación geográfica del sector de estudio [1][2].

Aunque, una vez instalados en puntos estratégicos pueden traer múltiples beneficios, principalmente monetarios lo que es fundamental dentro de la operación de un SEP ya que el abastecimiento de electricidad debe cumplir con los requerimientos de los usuarios, bajo estándares de calidad y seguridad al menor costo posible. Por tal motivo en la planificación de despacho se deben tomar en cuenta varias restricciones que reducen la capacidad de generación dentro de las centrales dependiendo principalmente del tipo de recurso primario que necesite para generar electricidad ya que el valor económico para operar depende principalmente de este [3]. Esto ha incentivado a que continuamente la tecnología empleada sea desarrollada con el fin de buscar nuevas alternativas de generación al mismo tiempo que se vuelven amigables con el medio ambiente, reduciendo significativamente la contaminación y cubriendo la demanda que es un factor que crece constantemente. Para conseguir esto se ha optado por aprovechar fuentes de energía renovable las cuales se

pueden clasificar en dos tipos, convencionales (ERC) y no convencionales (ERNC) [4][5].

Las ERNC deben ser tratadas como variables estocásticas para un modelo de despacho económico debido a que su comportamiento no es constante en el tiempo y para la predicción de estas se recurre a modelos probabilísticos con el fin de pronosticar su disponibilidad en diferentes horizontes de tiempo [5].

En el presente documento consideramos un sistema con generación híbrida (SGH) el cual está compuesto por centrales hidroeléctricas, térmicas y otras que usan fuentes renovables no convencionales como las centrales solares fotovoltaicas y los parques eólicos. Dado el caso, las restricciones a considerar radican en los niveles de reservorios de agua, costo de combustible, balance de potencia, disponibilidad de recursos renovables, entre otros [6]. Todas estas consideraciones se resumen en balancear la generación entre las diversas centrales que estén presentes en el sistema de tal forma que sus costos operativos sean lo más bajo posible sin comprometer el abastecimiento total de la demanda y respetando los límites operativos propios de cada central de generación [3].

Para pasar de generaciones convencionales que por lo general están compuestas por hidroeléctricas y termoeléctricas a otro tipo de sistema híbrido que incluya ERNC, es necesario realizar estudios previos para determinar la viabilidad de esta implementación. Esto se suele hacer mediante modelos probabilísticos y técnicas de simulación, un ejemplo de esto se muestra en [7] donde se emplea el método Monte Carlo para predecir la disponibilidad de los recursos renovables, en un modelo a corto plazo, de este artículo se observó que la técnica empleada resultó idónea para implementar en simulaciones con generación fotovoltaica y eólica.

Como ya se mencionó anteriormente, optar por generación que aprovecha ERNC es beneficioso, aunque por su alta intermitencia su producción puede llegar a ser insuficiente para cubrir altas demandas afectando la confiabilidad del SEP por lo que su implementación sirve más bien como apoyo para las centrales hidroeléctricas o termoeléctricas que son las más comunes en un sistema eléctrico, y de este modo se puede incrementar su capacidad de producción [5].

Las centrales hidroeléctricas, por sus múltiples ventajas representa una de las mayores fuentes de generación renovable a nivel global gracias a que aprovecha un recurso abundante en el planeta el cual es el agua y al ser tomado directamente de la naturaleza, su costo operacional puede ser despreciable. Sin mencionar que presenta otras beneficios tales como una mayor vida útil en comparación a plantas termoeléctricas lo que sirve para aumentar la confiabilidad y seguridad en el SEP [8].

En lo que respecta a las termoeléctricas dentro del despacho económico, estas aportan con el mayor precio que puede llegar a ser muy elevado debido a que usan combustibles fósiles para el arranque y operación de sus unidades generadoras, sin embargo, contar con este tipo de plantas puede brindar mayor confiabilidad a los sistemas eléctricos de potencia gracias a que sirven para abastecer la demanda que no puede ser suplida por las demás unidades [4].

Cuando se trata de problemas de despacho económico en sistemas con generación híbrida (DESGH) existen varias técnicas que pueden ser utilizadas, en [9] se realiza el despacho mediante programación lineal entera-mixta para un sistema híbrido, mientras que en [10] se hace uso de un algoritmo basado en programación dinámica para resolver el despacho hidrotérmico. Además de estas existen otras técnicas de optimización conocidas como metaheurísticas las cuales dan soluciones a

problemas complejos a través de procesos iterativos hasta encontrar la mejor solución en un espacio de búsqueda [11].

Existe gran cantidad de algoritmos que pueden ser utilizados para optimizar procesos, en [12] se hace uso de una técnica genética que maneja conceptos de selección, mutación y recombinación para encontrar la solución ideal al problema de despacho económico, haciendo un contraste con un método basado en programación lineal para determinar la mejor solución por diferentes vías.

En el presente artículo se muestra el DESGH a corto plazo, a través de técnicas heurísticas y metaheurísticas con el fin de coordinar la operación de las unidades generadoras disponibles. Además, se utiliza la estrategia Monte Carlo para manejar las ERNC y determinar su contribución al sistema. Todo esto simulando escenarios donde la limitación de generación es mayor para las hidroeléctricas en consecuencia de los periodos de estiaje que afectan directamente a los niveles de agua disponible en los reservorios.

El documento a continuación cuenta con una estructura organizada de la siguiente manera: Sección I: Introducción. Sección II: Marco teórico. Sección III: Sistema de prueba IV: Análisis de resultados. Sección V: Conclusiones. Sección VI: Trabajos Futuros. Sección VII: Referencias. Sección VIII: Anexos.

3 Marco teórico

3.1 Despacho económico

La demanda eléctrica es un factor dinámico dentro de la operación del SEP, por tal motivo las centrales de generación deben estar en la capacidad de cubrir los requerimientos de la carga. Ante una variación en la demanda eléctrica, el costo de generación también cambia debido al recurso primario que se necesite para la generación energética, dependiendo de la naturaleza de la central. Con el despacho

económico se establecen las condiciones en las que deben operar las unidades generadoras para abastecer la demanda, es decir que el objetivo es repartir la generación entre las unidades disponibles a fin de minimizar los costos considerando las pérdidas y las restricciones propias de cada planta del sistema [2],[10].

El despacho económico se puede clasificar de la siguiente manera dependiendo el horizonte de planificación.

3.1.1 Corto Plazo

Evaluado en un día o hasta una semana para lo cual se divide en subperiodos que van desde media hora o hasta algunas horas debido a la alta incertidumbre de la carga, sin embargo, lo ideal es que sea analizado a lo largo de las 24 horas del día donde es evidente la variación de la demanda en horas de la mañana así como en la tarde y noche [3].

3.1.2 Mediano Plazo

El despacho se realiza durante un periodo mensual que por lo general considera planes de mantenimiento u otro evento que provoque salidas de unidades de generación [6].

3.1.3 Largo Plazo

Considera periodos de uno o más años dentro de los cuales se realiza análisis mensuales basados en eventos probabilísticos como el crecimiento de la carga o limitaciones en el aprovechamiento de recursos tales como las épocas de estiaje, entre otros [6].

3.2 Despacho económico en sistemas con generación híbrida (DESGH)

Como ya se mencionó, el objetivo del despacho económico es cubrir con la demanda requerida al menor costo posible, es decir que el DESGH debe estar orientado a aprovechar la generación de centrales que aprovechan fuentes de energía renovable ya que, al obtenerse directamente de la naturaleza, su valor económico de

operación resulta insignificante en el análisis de despacho. Las unidades que aportan con el mayor valor económico son las que utilizan combustibles fósiles que en este caso son las termoeléctricas así que deben actuar principalmente cuando los niveles de los recursos renovables presentan magnitudes inapropiadas para la operación de las unidades disponibles en el sistema.

En el presente trabajo, se simulará escenarios donde se limite principalmente la operación de la mayor fuente de generación que vendrían a ser las hidroeléctricas, el objetivo es observar la relación directa que tiene sobre el valor económico ya que las termoeléctricas trabajarán posiblemente a su mayor capacidad debido a que como ya se mencionó la producción de centrales que aprovechan ERNC presentan altas intermitencias así que no están en la capacidad de cubrir altas demandas.

Para analizar el DESGH podemos dividirlo en cuatro subproblemas, donde el primero es el despacho fotovoltaico tiene como objetivo aprovechar en su totalidad la potencia generada en horas con mayor incidencia de radiación solar, ya que los paneles necesitan de este recurso para que los electrones presentes dentro de un dispositivo semiconductor sean excitados para producir voltaje, esto indica que las centrales solares únicamente operarán en horas del día (7 am-18 pm) [5].

Por otro lado tenemos la generación eólica donde su principal recurso es la velocidad del viento la cual varía de un lugar a otro debido a condiciones como la presión atmosférica, así que en el DESGH se debe aprovechar en su totalidad gracias a que el recurso se obtiene gratuitamente, sin embargo, su naturaleza estocástica dificulta la predicción acertada de la potencia que generará [5].

En lo que respecta a las hidroeléctricas, el plan de despacho está destinado a manejar adecuadamente los reservorios, controlando el flujo de agua que será turbinada en las

diferentes horas del día respetando los niveles mínimos y máximos de los reservorios para evitar derrames o desgaste excesivo de agua [13]. Aquí surge un problema debido al acoplamiento de las hidroeléctricas, ya que la decisión de la primera etapa de descarga afectará a la descarga de la siguiente etapa y así sucesivamente, todo esto dependiendo del escenario hidrológico porque se considerará un periodo normal y otro de sequía [14].

Finalmente se tiene el subproblema de despacho térmico que presenta un menor riesgo en comparación a las otras alternativas pero a un costo elevado además que al estar desacoplado, la operación de cada central es independiente y tendrá mayor o menor intervención dependiendo de los requerimientos de la carga [12], [14].

3.2.1 Métodos de generación eléctrica utilizados para el sistema híbrido

En el presente documento se cuenta con cuatro métodos de generación incorporados al sistema híbrido, estos se presentan a continuación.

3.2.1.1 Generación eólica

Se define así a la producción de energía eléctrica a través de turbinas impulsadas por el movimiento del viento el cual varía de una zona a otra dependiendo de factores como la presión atmosférica, cambios estacionales de temperatura o la rotación del planeta. Optar por esta vía de generación puede ser beneficioso en cuestiones económicas y de confiabilidad. Para construir centrales de este tipo es importante realizar un estudio de viento para prever el comportamiento de este y determinar si es factible o no instalar turbinas eólicas en la zona [5], [15],[16].

La potencia generada por N número de aerogeneradores se describe con la siguiente ecuación:

$$P = N * \frac{1}{2} (\rho * A * ef * u^3) \quad (1)$$

Donde:

P: Potencia

ρ : Densidad atmosférica.

A: Área cubierta por las hélices.

ef : Eficiencia del rotor

u: Velocidad del viento

La eficiencia del rotor se determina a través de la ecuación (2).

$$ef = \frac{2 * P_n}{\rho * A * V_n^3} \quad (2)$$

De donde P_n corresponde a la capacidad nominal de la turbina mientras que V_n hace referencia a la velocidad estándar del viento.

3.2.1.2 Generación solar fotovoltaica

Es el aprovechamiento de la radiación solar a través de dispositivos semiconductores, especialmente de silicio, instalados en paneles. Los electrones presentes en estos dispositivos son excitados gracias a la radiación para generar voltaje. La magnitud de este y la cantidad de potencia generada dependerá del número de paneles y la conexión serie, paralelo o mixta que se emplee; además de las características constructivas que dependen de sus fabricantes [5],[17].

El rendimiento de un sistema fotovoltaico depende de varios factores como la ubicación y orientación de los paneles, así como de otros factores del entorno como la temperatura del ambiente, la cual tiene influencia sobre la potencia generada y se debe a que son inversamente proporcionales, si la temperatura aumenta entonces la potencia de salida disminuye y viceversa [17].

Se puede establecer la potencia generada con las ecuaciones mostradas en [9] donde se expresan como:

$$P_{pv} = \left[P_n * \frac{I_{solar}}{1000} * [1 - C_i * (T_j - 25)] \right] * N_{pp} * N_{ps} \quad (3)$$

$$T_j = T_a + \frac{I_{solar}}{800} * (N_{oct} - 20) \quad (4)$$

Donde:

P_{pv} : Potencia solar fotovoltaica [W]

P_n : Potencia nominal de cada módulo [W]

I_{solar} : Irradiación solar [$\frac{W}{m^2}$]

C_i : Coeficiente de temperatura

N_{pp} : Número de módulos conectados en paralelo

N_{ps} : Número de módulos conectados en serie

T_j : Temperatura de la celda fotovoltaica [°C]

T_a : Temperatura ambiental [°C]

N_{oct} : Temperatura nominal de operación de la celda [°C]

3.2.1.3 Generación hidroeléctrica

Se conoce como generación hidroeléctrica al aprovechamiento del potencial de uno de los recursos más abundantes, el agua, para generar electricidad mediante energía mecánica que se consigue al impulsar turbinas. Actualmente es una de las fuentes primarias de generación eléctrica con múltiples ventajas tales como costos operativos insignificantes y un bajo impacto ambiental en comparación a centrales que necesitan combustibles [4],[18].

Al depender del nivel del agua recolectada de la lluvia es importante considerar épocas del año donde el estiaje representa un gran problema ya que limita la operación adecuada de las hidroeléctricas, por tal motivo es indispensable contar con un plan de despacho para manejar el nivel de los reservorios a través del control de flujo de agua que pasa por las turbinas [5].

3.2.1.4 Generación termoeléctrica

La generación termoeléctrica se basa principalmente en aprovechar energía térmica para mover una turbina y así obtener energía eléctrica, este proceso libera gas carbónico al entorno ya que se pueden usar diversos combustibles como carbón o diésel dependiendo del

equipamiento de la central. Esto hace que los costos sean elevados para mantener el sistema operativo, sin embargo, en términos de confiabilidad brindan mayor robustez al SEP ya que sirven como apoyo en horas de alta demanda, no presenta intermitencias como las ERNC además que están desacopladas a diferencia de la mayoría de hidroeléctricas por lo tanto su operación es independiente una de otra [19].

3.3 Manejo de variables estocásticas

La predicción de las variables estocásticas que intervienen en los subproblemas de despacho con ERNC está enfocado en la velocidad del viento, radiación solar y temperatura. Para manejar este tipo de datos que son difíciles de predecir, resulta conveniente utilizar funciones de distribución de probabilidad para caracterizar su comportamiento basado en datos recopilados previamente a fin de obtener resultados lo más acertado posible [20].

3.3.1 Funciones de distribución de probabilidad (FPD)

Las variables aleatorias se definen mediante características cuantificables o medidas a través de un experimento, es decir que pueden cambiar de un resultado a otro por la naturaleza de sus comportamientos que las hace impredecibles. Para fenómenos naturales se establecen posibles valores que pueden tomar estas variables estableciendo un nuevo espacio de muestreo, este proceso se realiza a través de funciones de probabilidad que describen el comportamiento del fenómeno natural en términos de probabilidad [21]. Determinar la función que mejor se adapte a los datos utilizados se vuelve más fácil gracias a las herramientas computacionales que disponemos actualmente, por ejemplo, el software Matlab cuenta con una variedad de herramientas útiles para determinar la mejor FPD así que a continuación se presentan las funciones más comunes que se

implementan para el manejo de variables estocásticas.

3.3.1.1 Distribución Weibull

Para manejar valores de fenómenos naturales se puede hacer uso de la función de Weibull la cual es útil para variables estocásticas que cambian en función del tiempo y viene dada por:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{k}{c} * \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} * e^{-(x/c)^k}; & \text{si } x \geq 0; c, k < 0 \\ 0 & \text{Otros casos} \end{cases} \quad (5)$$

Siendo x la variable y dos factores conocidos como escala (c) y forma (k) que indican que tan dispersa está la distribución y el otro define la forma [22], recurrir a esta función es muy común en trabajos de predicción de viento y radiación solar por su simpleza y facilidad de análisis tal como se ve en [9] y [20].

Para obtener estos factores se puede recurrir a herramientas computacionales que lo convierte en una tarea más simplificada, en este caso se utilizará el software MATLAB que mediante el comando *fitdist* se puede ajustar la función de Weibull a los valores utilizados.

3.3.1.2 Distribución Normal

Por otro lado para manejar datos de temperatura o incluso la misma velocidad de viento es común recurrir a la distribución Normal ya que es útil para manejar fenómenos naturales, esta depende igualmente de dos factores, el valor medio (m) o esperado y la desviación estándar (σ), donde su gráfica se asemeja a una campana por tal motivo recibe el nombre de campana de Gauss [9].

Matemáticamente se define con la siguiente ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

Sin embargo, existen casos donde los datos utilizados no se ajustan a esta FDP lo que puede conducir resultados erróneos.

3.3.1.3 Mezcla de Gaussianas

Los Modelos de Mezcla de Gaussianas (GMM) son modelos probabilísticos que se construyen a partir de sumas finitas de distribuciones de probabilidad Gaussianas o Normales lo que los hace ideales para aplicar en fenómenos naturales por su condición variable [23].

Al ser una suma de funciones Normales también depende de los factores de valor medio y desviación estándar propios de cada una así que matemáticamente se define de la siguiente manera.

$$f(x) = \sum_{k=1}^k \pi_k * N(x|\mu_k, \sigma_k^2) \quad (7)$$

En donde k es el número de componentes gaussianos en la mezcla y cada $N(x|\mu_k, \sigma_k^2)$ es la densidad de una gaussiana con propio valor medio y desviación estándar.

3.3.2 Montecarlo para predicción de variables estocásticas

La técnica Montecarlo es un proceso numérico basado en la estadística para resolver problemas matemáticos a través de la simulación de variables aleatorias, esta técnica consiste principalmente en generar números al azar usando alguna función de distribución de probabilidad como Weibull, distribución Normal o Mezcla de Gaussianas para posteriormente ejecutar un alto número de repeticiones con el fin de reducir el error [24]. Su aplicación en sistemas renovables es ventajoso por la certeza de los resultados, sin embargo, estos dependen de los datos de entrada así que mientras mayor sea la cantidad de estos, los resultados serán más fiables [9].

3.4 Formulación matemática del DESGH

Dentro del DESGH el costo de la generación con ERC y ERNC no es representativo por lo tanto la función objetivo gira en torno al costo de combustibles utilizados por las

termoeléctricas y se define como una ecuación polinomial de segundo orden tal como se plantea a continuación:

$$Fim(P^T im) = ai(P^T im)^2 + biP^T im + ci \quad (8)$$

Donde:

Fim: Función de costo asociada a cada unidad termoeléctrica (*i*) durante el periodo *m* [\$/hora]

P^Tim: Potencia eléctrica producida por la unidad (*i*) en el horizonte de planificación [MW].

ai, bi, ci: factores de costo vinculados a cada generador termoeléctrico.

Con el objetivo de obtener resultados más realistas se puede incluir el efecto de punto de válvula que ocurre al momento de abrir los dispositivos de regulación de vapor para menorar o aumentar la potencia de salida lo que representa aumento en el costo operativo.

Este efecto muestra un comportamiento sinusoidal que altera la ecuación haciendo que pierda su propiedad convexa y no sea uniforme ni diferenciable, por ende, la nueva función objetivo pasa a ser:

$$Fim(P^T im) = ai(P^T im)^2 + bi(P^T im) + ci + |ei \sin(fi(P^{min}Ti - P^T im))| \quad (9)$$

Donde:

ei, fi: Coeficientes del efecto punto de válvula correspondiente para cada termoeléctrica.

P^{min}Ti: Potencia mínima de cada unidad.

De este modo la optimización de la función objetivo del DESGH queda de la siguiente manera:

$$\min(Ft) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{Nt} Fim(P^T im) \quad (10)$$

De aquí, *Ft* es el gasto operativo asociado a los combustibles dentro del lapso de planificación y *Nt* representa el número de centrales termoeléctricas del sistema. Este modelo de DESGH se encuentra limitado

por restricciones de igualdad entre la generación y la demanda, así como limitantes operativas propias de cada central eléctrica.

Dependiendo del caso de estudio, el balance de potencia se puede manejar de dos formas:

$$\sum_{i=1}^{Nt} P_{im}^T + \sum_{j=1}^{Nh} P_{jm}^H + \sum_{k=1}^{Ne} P_{km}^E + \sum_{l=1}^{Nf} P_{lm}^F = P_{Dm} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{Nt} P_{im}^T + \sum_{j=1}^{Nh} P_{jm}^H + \sum_{k=1}^{Ne} P_{km}^E + \sum_{l=1}^{Nf} P_{lm}^F = P_{Dm} + P_{lossm} \quad (12)$$

De las cuales *P^T_{im}*, *P^H_{jm}*, *P^E_{km}* y *P^F_{lm}* representa la energía eléctrica entregada por las *Nt*, *Nh*, *Ne* y *Nf* centrales de combustión, hidroeléctricas, eólicas y fotovoltaicas respectivamente en el horizonte de tiempo *m*. Adicionalmente los parámetros *P_{Dm}* y *P_{lossm}* hacen referencia a la potencia demandada y pérdidas por transmisión.

Cuando se trabaja bajo el balance de potencia del primer caso, se presenta un modelo de despacho económico simplificado con un sistema que cuenta con un solo punto de interconexión conformado por *N* centrales que abastecen la demanda total de modo que las pérdidas en las líneas de transmisión son despreciables o se suma como un valor extra a la demanda, este modelo uninodal se puede observar en la Figura 1.

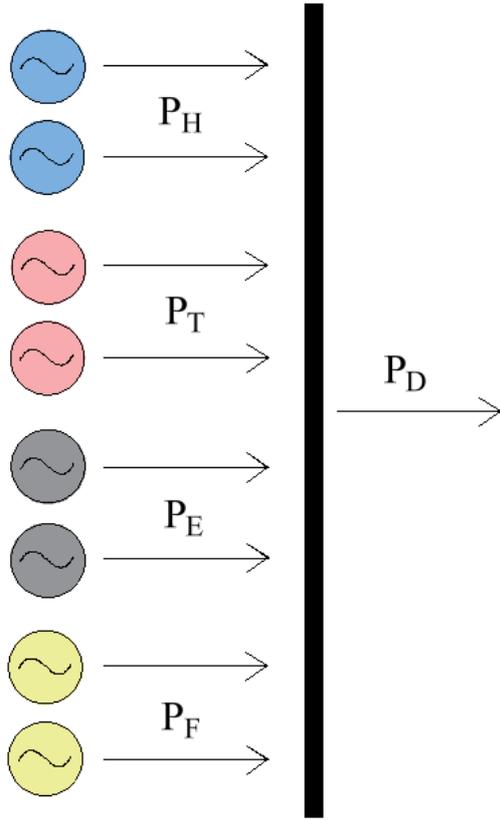


Figura 1. Sistema uninodal

El modelamiento de la energía aportada al sistema por parte de las centrales hidroeléctricas se presenta a través de una ecuación de segundo grado que está ligada a las porciones de agua turbinadas y el nivel de sus embalses [13] tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 P^H_{jm} = & C_{1j}(V_{jm})^2 + C_{2j}(Q_{jm})^2 \\
 & + C_{3j}(V_{jm}Q_{jm}) \\
 & + C_{4j}(V_{jm}) \\
 & + C_{5j}(Q_{jm}) + C_{6j}
 \end{aligned} \quad (13)$$

De esta expresión, las incógnitas V_{jm} y Q_{jm} representan el nivel de cota de almacenamiento esperado al final del despacho y las porciones de agua turbinadas respectivamente, todo esto durante el periodo m . Además, los coeficientes $C_{1j}, C_{2j} \dots C_{6j}$ son términos otorgados para el modelo de cada hidroeléctrica [25].

Las variables V_{jm} y Q_{jm} también presentan restricciones que deben ser incluidas en el modelo de despacho

$$V_j^{min} \leq V_{jm} \leq V_j^{max} \quad (14)$$

$$Q_j^{min} \leq Q_{jm} \leq Q_j^{max} \quad (15)$$

Estas expresiones representan limitaciones mínimas y máximas en cuanto al manejo de los reservorios y el flujo de descarga del agua que atraviesa las turbinas.

Debido a la disponibilidad de agua, se presenta otra restricción propia de los embalses y se trata del nivel con el que inicia cada hidroeléctrica, así como la cota final que se debe garantizar al final del periodo de despacho que para el modelo de corto plazo se debe administrar los reservorios durante las 24 horas de planificación.

Adicionalmente, las hidroeléctricas presentan otra prohibición respecto al comportamiento hidrodinámico en los embalses, lo que se representa en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 V_{jm} = & V_{j(m-1)} + In_{jm} - Q_{jm} \\
 & - S_{jm}
 \end{aligned} \quad (16)$$

En donde:

$V_{j(m-1)}$: Volumen del embalse de las hidroeléctricas en el periodo $m - 1$

In_{jm} : Afluencia natural para cada hidroeléctrica en el intervalo m

S_{jm} : Índice de desbordamiento a través del horizonte de planificación

Para el caso de estudio se considera que las centrales hidroeléctricas están acopladas lo que implica que el volumen de los embalses de abajo dependan de la cantidad de agua turbinada en las hidroeléctricas de las etapas anteriores, esto representa una variación en la ecuación (13) dando como resultado la siguiente expresión:

$$V_{jm} = V_{j(m-1)} + In_{jm} - Q_{jm} - S_{jm} + \sum_{l=1}^{Na} (Q_{jl} + S_{lm}) \quad (17)$$

De aquí, $Q_{jm} + S_{jm}$ representa la descarga de agua y derrame de las Na centrales ubicadas antes de la hidroeléctrica j , en caso de que no se permita el derrame, los valores S_{jm} y S_{lm} se anulan.

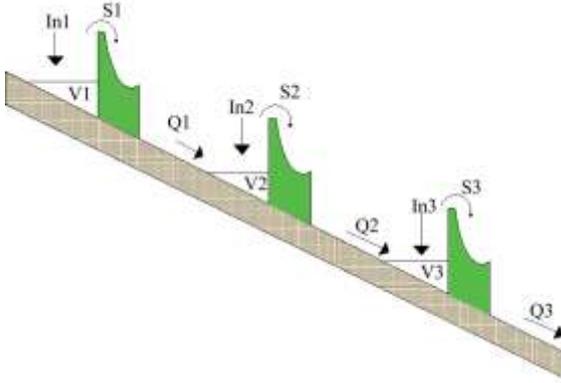


Figura 2. Hidroeléctricas acopladas hidráulicamente

Finalmente, durante la evaluación del mejor escenario de despacho, es necesario determinar los rangos operativos de potencia en las centrales termoeléctricas e hidroeléctricas para acotar el rango de búsqueda donde se determine el modelo que ofrece el menor costo.

Las siguientes expresiones muestran los límites operativos en las hidroeléctricas y termoeléctricas respectivamente.

$$P_{Hj}^{min} \leq P_{Hj}^H \leq P_{Hj}^{max}; \quad j = 1, 2 \dots Nh \quad (18)$$

$$P_{Ti}^{min} \leq P_{Ti}^T \leq P_{Ti}^{max}; \quad i = 1, 2 \dots Ns \quad (19)$$

3.5 Técnicas aplicadas a la solución del despacho económico

Optimizar el DE se puede conseguir a través de diversos métodos, dentro de estos están

las técnicas heurísticas y metaheurísticas que consisten básicamente en procesos que en un principio resultan impredecibles, estas metodologías se basan en el uso de algoritmos creados a partir del comportamiento de algún fenómeno de la naturaleza [4],[26]. Por esta razón existe una gran variedad de algoritmos capaces de optimizar diversos procesos cumpliendo las restricciones propias de cada caso y mediante pasos iterativos, perfeccionar las soluciones candidatas a través de operadores propios de cada técnica.

Para este trabajo se mencionó previamente que el tratamiento de variables estocásticas y predicción de generación a través de las ERNC se realizará mediante la técnica Montecarlo que aprovecha funciones de distribución para estimar los resultados. Debido a que su operación puede sufrir interrupciones, la potencia obtenida a partir de las ERNC debe ser aprovechada al máximo por ende las técnicas de optimización deben manejar la operación de las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas para cubrir la demanda restante después de la intervención de las centrales solares y de los parques eólicos. Para esto se empleará los siguientes métodos heurísticos y metaheurísticos:

3.5.1 Evolución diferencial (DE)

Se trata de una metaheurística que fue propuesta en 1995 por Rainer Storn y Kenneth Price [27] y su optimización se fundamenta en procesos evolutivos. Los individuos iniciales pasan por procesos de mutación, cruce y selección para obtener una nueva población (solución ideal al problema de optimización)[28].

El proceso para optimizar el problema comienza con la inicialización de la población de manera aleatoria dentro del espacio de solución, esto se logra con la siguiente ecuación:

$$X_{i,j} = L_j + ran(U_j - L_j); \quad ran \in [0,1] \quad (20)$$

Donde:

$X_{i,j}$ es el valor del individuo i –ésimo en la dimensión j –ésima.

U_j y L_j son los límites superiores e inferiores correspondiente a la dimensión j . ran es un valor aleatorio dentro del rango $[0, 1]$.

A continuación, la población debe ser “mutada” y para conseguirlo se crea un vector mutante a través de la combinación lineal de tres individuos aleatorios de la población mediante la siguiente expresión:

$$V_i = X_{r1} + F(X_{r2} - X_{r3}) \quad (21)$$

En la cual:

V_i es el vector mutante para el individuo i –ésimo.

X_{r1} , X_{r2} y X_{r3} son tres individuos aleatorios distintos entre sí y diferentes del individuo i –ésimo.

F es un factor de escala que generalmente está en el rango $[0.4, 1]$ y controla la diferencia entre X_{r2} y X_{r3} .

El paso siguiente es el cruzamiento donde el vector X_i y V_i se combinan para generar un vector de prueba U_i , este cruce es controlado por un factor de probabilidad (CR) mediante la siguiente igualdad:

$$U_{i,j} = \begin{cases} V_{i,j}, & \text{si } ran \leq CR \\ X_{i,j}, & \text{si } ran \geq CR \end{cases} \quad (22)$$

Finalmente, el proceso de selección sirve para determinar si el vector de prueba puede sustituir al vector inicial en la siguiente expresión:

$$X_i = \begin{cases} U_i, & \text{si } f(U_i) < f(X_i) \\ X_i, & \text{si } f(U_i) \geq f(X_i) \end{cases} \quad (23)$$

De la cual $f(.)$ es la función objetivo y se reemplaza siempre y cuando el valor de la función objetivo del vector prueba sea mejor que el original.

3.5.2 Algoritmo Cultural (CA)

Esta técnica heurística se basa en el comportamiento social para la evolución de la cultura, cuenta con dos componentes conocidos como espacio de creencias y espacio poblacional que interaccionan entre sí a través de un protocolo de comunicación [13]. El primer espacio sirve para almacenar conocimiento adquirido por los individuos a través de las generaciones, mientras que el segundo espacio es un bloque que almacena los individuos con características propias útiles para determinar su aptitud, en cada iteración, los individuos pueden ser reemplazados por sus “descendientes” que se obtienen al aplicar operadores y son guiados por el espacio de creencias [29].

En [29] se muestran las fuentes de conocimiento que pueden ser utilizadas dentro del CA para tomar decisiones durante la exploración de posibles soluciones, estas fuentes son:

Conocimiento situacional: Almacena las mejores y peores soluciones encontradas hasta el momento.

Conocimiento normativo: Son los límites permitidos para evaluar el comportamiento.

Conocimiento del dominio: Entendimiento de la relación e interacción de los objetos del dominio.

Conocimiento topográfico: Son los patrones espaciales de comportamiento, se crea un mapa que se divide en zonas viables, no viables o semi viables por lo que es un conocimiento poco usado en la optimización.

Conocimiento histórico: Son aquellos patrones temporales de comportamiento.

Para resolver el despacho económico se usará la componente situacional y normativa ya que resultan suficientes para almacenar las mejores soluciones respetando los límites del espacio de búsqueda.

3.5.3 Enjambre de Partículas (PSO)

Propuesto por Kennedy y Eberhart en 1995, esta metodología metaheurística se

fundamenta en la conducta social o el movimiento de especies como las congregaciones de aves o los cardúmenes de peces. La optimización a través de enjambre de partículas consiste en un grupo de individuos dentro de un espacio de búsqueda los cuales cuentan con una posición y velocidad, la primera se actualiza conforme el algoritmo realice sus iteraciones [30].

Cada posible solución es una partícula las cuales se desplazan en el espacio de búsqueda en busca de la mejor posición posible, estas cuentan con un registro de su mejor posición anterior, esto se denomina P_{best} . Además de este valor, existe otro que surge tras cada iteración y se conoce como G_{best} el cual representa la mejor posición del individuo pero esta vez de forma global [31].

Como se mencionó anteriormente, velocidad y posición deben actualizarse tras cada iteración, esto se obtiene utilizando las siguientes igualdades:

$$\vec{X}_i^{k+1} = \vec{X}_i^k + \vec{V}_i^{k+1} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \vec{V}_i^{k+1} = & \beta \vec{V}_i^k + \alpha_1 \text{ran}() (\vec{P}_{best_i} \\ & - \vec{X}_i^k) \\ & + \alpha_2 \text{ran}() (\vec{G}_{best_i} \\ & - \vec{X}_i^k) \end{aligned} \quad (25)$$

De estas, \vec{X}_i^{k+1} y \vec{V}_i^{k+1} representan la posición y velocidad actualizadas respectivamente del individuo i que forma parte de N cantidad de partículas. Los coeficientes α_1 y α_2 son valores fijos de aceleración, $\text{ran}()$ es un valor aleatorio entre 0 y 1 y finalmente el término β es importante en la técnica PSO ya que corresponde al peso de inercia y sirve para dinamizar el proceso de búsqueda de la mejor solución, es decir, es útil para la convergencia rápida del problema [4] y se calcula con:

$$\beta = \beta_{max} - \frac{\beta_{max} - \beta_{min}}{k_{max}} k \quad (26)$$

Aquí β_{max} y β_{min} son los pesos de inercia máximos y mínimos que se asignan como constantes al inicio del problema mientras que k_{max} es el número máximo de iteraciones del problema.

3.5.4 Grey Wolf (GWO)

La técnica metaheurística del Lobo Gris (Grey Wolf) se basa en el comportamiento de los lobos cuando cazan, la manada está organizada por niveles jerárquicos, los líderes son un macho y una hembra denominados alfa (α), el segundo nivel se conoce como beta (β) y ayudan a los líderes, después tenemos a los delta (δ) que son subordinados de los alfa y beta pero tienen poder sobre los omega (ω) que están en el puesto más bajo [32].

Como modelo de optimización, la mejor solución es el lobo alfa, la segunda mejor es beta y así sucesivamente hasta llegar a las posibles soluciones omega, la cacería (optimización) está liderada por los primeros tres niveles jerárquicos, mientras que los omega deben seguir a sus superiores [33].

Cuando la manada caza los lobos tienden a rodear a sus presas, matemáticamente se puede formular de la siguiente forma:

$$\vec{D} = |\vec{C} \vec{X}_p^t - \vec{X}^t| \quad (27)$$

De donde \vec{D} representa la posición de un cazador, \vec{X}_p^t es la ubicación del objetivo en la iteración t , mientras que \vec{X}^t es el vector representativo de la posición individual de los lobos.

Estas posiciones se deben actualizar en cada iteración, lo que se consigue aplicando la siguiente ecuación:

$$\vec{X}^{t+1} = \vec{X}_p^t - \vec{A} \vec{D} \quad (28)$$

Los vectores \vec{A} y \vec{C} utilizados se obtienen con:

$$\vec{A} = 2 \vec{k} \vec{r}_1 - \vec{k} \quad (29)$$

$$\vec{C} = 2 \vec{r}_2 \quad (30)$$

De las cuales \vec{k} es un parámetro que decrece de 2 a 0 a lo largo de las iteraciones, mientras que \vec{r}_1 y \vec{r}_2 son vectores de valores aleatorios en el rango 0 y 1.

Entonces, la técnica Grey Wolf aplicada en el despacho económico busca la mejor solución, es decir la menos costosa. Este es el lobo alfa, mientras que la segunda y tercera mejor solución son beta y delta mientras que omega son las demás posibles soluciones. Usar las soluciones asociadas a los tres primeros niveles jerárquicos es importante para reducir en mayor parte el espacio de búsqueda y así encontrar la solución óptima.

A continuación, se presenta \vec{D}_α , \vec{D}_β y \vec{D}_δ que son vectores donde se almacenan las posiciones de las tres posibles soluciones con mejores valores.

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \vec{X}_\alpha^t - \vec{X}^t| \quad (31)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \vec{X}_\beta^t - \vec{X}^t| \quad (32)$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \vec{X}_\delta^t - \vec{X}^t| \quad (33)$$

Durante cada iteración t estos vectores se actualizan siguiendo las siguientes expresiones, respectivamente:

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha^t - \vec{A}_1 \vec{D}_\alpha \quad (34)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta^t - \vec{A}_2 \vec{D}_\beta \quad (35)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta^t - \vec{A}_3 \vec{D}_\delta \quad (36)$$

De estas posiciones se calcula un promedio que será útil para que las soluciones omega mejores su ubicación y sean útiles en la exploración del espacio de búsqueda.

$$\vec{X}^{t+1} = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (37)$$

3.6 Implementación de las técnicas para el DESGH

Para abordar este problema de despacho, lo primero es realizar un modelo de predicción de las variables estocásticas involucradas en la generación a través de ERNC, para lo cual se debe definir la función de distribución de probabilidad óptima para manejar los datos de velocidad de viento, radiación solar y temperatura.

Los valores que se utilizarán provienen del sitio web de la Secretaría del Medio Ambiente de Quito donde se encuentra la base de datos proporcionada por el centro meteorológico de Cotacollao.

El periodo de análisis será de cuatro años (2019, 2020, 2021 y 2022) precisamente en el mes de agosto para tener una mayor cantidad de datos y así obtener mejores resultados.

Para la selección de FDP es necesario analizar los histogramas propios de cada variable y a través de MATLAB ajustar la FDP que mejor se adapte al comportamiento de los datos.

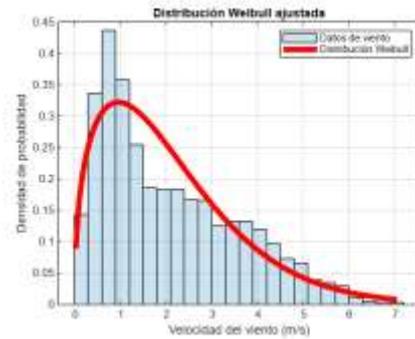


Figura 3. Histograma de la velocidad del viento con la distribución Weibull ajustada

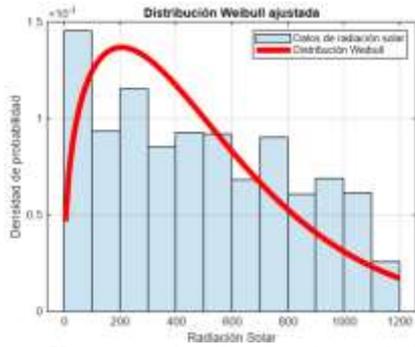


Figura 4. Histograma de radiación solar con la función Weibull ajustada

Para el caso de velocidad de viento y radiación solar la función que mejor se ajusta es Weibull.

Esto no sucede en el histograma de los valores de temperatura.

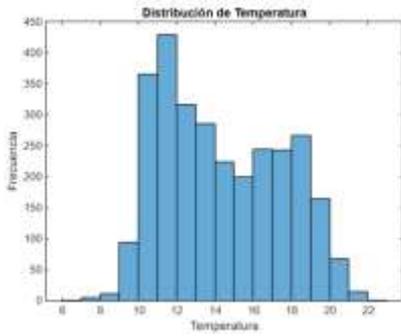


Figura 5. Histograma de los datos de temperatura

Como se aprecia en la Figura 5, existen dos picos así que la distribución Weibull no se puede ajustar, por tal motivo la FDP que mejor se ajusta es una Mezcla de Gaussianas, lo que se aprecia en la Figura 6.

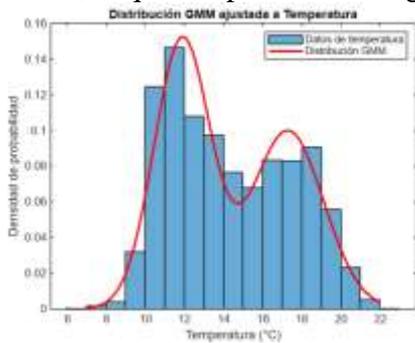


Figura 6. Histograma de datos de temperatura con la función GMM ajustada

Entonces, las funciones de densidad de probabilidad que se utilizarán serán Weibull para velocidad de viento y radiación solar mientras que Mezcla de Gaussianas para la temperatura. Posteriormente la técnica

Montecarlo servirá predecir su comportamiento en un horizonte de 24 horas y con los datos obtenidos ya es posible determinar la potencia que puede ser generada a partir de las condiciones ambientales, la estructuración de las centrales renovables y las ecuaciones presentadas en la sección anterior.

Por otro lado el despacho económico con fuentes convencionales se basa en minimizar la función objetivo que contiene la sumatoria de los costos asociados a la generación respetando todas las limitaciones mencionadas anteriormente, para incluir el efecto de las centrales eólicas y fotovoltaicas en el despacho hidrotérmico se recurre a la estrategia utilizada en [16], donde la potencia obtenida a partir de las ERNC se resta directamente de la demanda total ya que al no contar con sistemas de almacenamiento y el bajo aprovechamiento de estas, se debe despachar obligatoriamente la energía producida. Además, que de este modo forzamos a los algoritmos optimizadores a trabajar sobre la demanda sobrante y cumplimos con el balance energético.

Para el despacho hidrotérmico se emplearán las técnicas heurísticas y metaheurísticas mencionadas en la sección anterior las cuales son: DE, CA, PSO y GWO. Estas internamente cuentan con operadores propios para optimizar las posibles soluciones evaluadas en la función de optimización u objetivo que se presenta a continuación:

$$F_{objetivo_m} = \sum_{i=1}^{Nt} F_{im}(P_{im}^T) + \mu |VI_{BP}| + \varphi \left| \sum_{j=1}^{Nh} VI_{BR} \right| \quad (38)$$

Donde:

$F_{objetivo_m}$ es la función objetivo durante el horizonte de planificación m .

VI_{BP} Incumplimiento de la restricción de balance de potencia.

VI_{BW} Incumplimiento de la restricción del manejo de los reservorios.

μ Factor de castigo por incumplir el balance de potencia.

φ Constante de penalización en el manejo de reservorios.

Esta función objetivo está asociada a los costos operacionales de las centrales termoeléctricas, a esto se le suma un valor extra por no cumplir con las restricciones del sistema, con el fin de forzar el aumento del costo final para que el algoritmo siga iterando hasta encontrar la mejor solución en cuanto a costos y cumplimiento de las restricciones.

Luego de definir la función objetivo se muestra un algoritmo conformado por subprogramas que internamente cuentan con las rutinas propias de cada técnica de optimización, a continuación, se presenta la nomenclatura utilizada dentro de los pseudocódigos.

Tabla 1. Nomenclatura

Nomenclatura Empleada	
vel_{Datos} tmp_{Datos} rs_{Datos}	Base de datos histórica de velocidad de viento, temperatura y radiación solar.
P_R	Potencia obtenida de las ERNC.
POT_D	Potencia total demandada por la carga.
P_{Carga}	Potencia que cubrir tras la intervención de las plantas eólicas y fotovoltaicas.
P_{min}^H, P_{max}^H	Vectores con los rangos operativos de las hidroeléctricas.
P_{min}^T, P_{max}^T	Vectores con los rangos operativos de las termoeléctricas.
V_{min}, V_{max}	Vectores de volumen permitidos en los embalses.

Q_{min}, Q_{max}	Caudales mínimos y máximos turbinados.
V_i, V_f	Vectores de condiciones iniciales y finales de las hidroeléctricas.
In	Esquema de flujo de agua para las hidroeléctricas.
VI_{BP}	Incumplimiento del balance de potencia.
VI_{BR}	Incumplimiento del manejo adecuado de embalses.
Num_r	Cantidad de repeticiones.
C_m^t	Costo operativo durante el tiempo t .
C_{op}	Costo operativo total en la repetición p .
C_{oBEST}	Mejor precio obtenido por el algoritmo principal
\aleph	Repetición con la mejor solución.

En siguiente tabla se muestra el pseudocódigo utilizado para la estimación de la potencia generada a partir de energías renovables no convencionales.

Tabla 2. Pseudocódigo utilizado para tratamiento de variables estocásticas y estimación de la potencia por ERNC

Algoritmo 1. Tratamiento de variables estocásticas y estimación de potencia por ERNC	
Paso 1	Lectura de datos: vel_{Datos} , tmp_{Datos} y rs_{Datos}
Paso 2	Dar el formato dd-MM-yyyy HH:mm:ss a las fechas.
Paso	Definir años y mes de análisis.
Paso 4	Filtrar los datos para el mes y años seleccionados, así como las horas del día con radiación solar (6-17) y los datos únicamente de la subestación Cotocollao

Paso 5	Eliminar datos vacíos o infinitos.
Paso 6	Ajustar distribución Weibull a vel y rs para extraer los factores de forma y escala $weibull_v=fitdist(vel, 'weibull')$ $forma=weibull_v.A$ $escala=weibull_v.B$ $weibull_rs=fitdist(rsl, 'weibull')$ $forma=weibull_rs.A$ $escala=weibull_rs.B$
Paso 7	Simulaciones Monte Carlo para velocidad de viento y radiación solar $nSim=1000$ para un horizonte de planificación de 24 horas.
Paso 8	Calcular la media y los percentiles de 10 y 90 por ciento de las simulaciones.
Paso 9	Calcular valor medio y desviación estándar de las componentes normales de los datos de temperatura.
Paso 10	Simulaciones Monte Carlo para temperatura con mezcla de gaussianas.
Paso 11	Calcular la potencia generada a través de las turbinas eólicas usando la ecuación (1) y (2).
Paso 12	Calcular la potencia generada por plantas fotovoltaicas según (3) y (4).
Paso 13	Almacenar resultados y generar gráficas.

Como se mencionó anteriormente, las técnicas de optimización deben manejar el despacho hidrotérmico así que el algoritmo utilizado se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Algoritmo principal para el despacho

Algoritmo 2. Solución al problema de despacho	
Paso 1	Ingresar los datos:

	$P_{min}^H, P_{max}^H, P_{min}^T, P_{max}^T, V_{min}, V_{max}, Q_{min}, Q_{max}, V_i, V_f, In, VI_{BP}, VI_{BR}, Num_r, POT_D, P_R$
Paso 2	Restar la potencia obtenida de las ERNC de la demanda total. $P_{Carga} = POT_D - P_R$
Paso 4	Determinar restricciones máximas y mínimas de operación en forma de vectores $lowlim = [V_{max} Q_{max} P_{max}^T]$ $upplim = [V_{min} Q_{min} P_{min}^T]$
Paso 4	Resolución del despacho económico con el algoritmo de cada técnica. Para $p=1$ Hasta (Num_r) Hacer $C_{op} = 0$ Para $m=1$ Hasta (24) Hacer $[V_{m,p}, Q_{m,p}, P_{m,p}^T, P_{m,p}^H, C_o^t]$ $\leftarrow fHeu \left(ub, lb, P_{Carga}, In, V_i, V_f, P_{min}^H, P_{max}^H, m \right)$ $C_{op} = C_{op} + C_m^t$ Fin para Fin para
Paso 5	Determinar el mejor precio operativo $C_{o_{BEST}} = C_{o_{p=\kappa}}$
Paso 6	Mostrar la mejor planificación propuesta por cada técnica.
Paso 7	Analizar los resultados

En el algoritmo principal se menciona la función $fHeu$, esta contiene los subprogramas utilizados donde encontramos los algoritmos propios de cada técnica de optimización los cuales se detallan en las siguientes tablas.

Tabla 4. Pseudocódigo que contiene la rutina ED

Algoritmo 3. Subprograma 1 que contiene la rutina ED para el despacho económico considerando acoplamiento hidráulico	
Paso 1	Leer datos de la función: $P_{min}^H, P_{max}^H, POT_D, V_i, V_f, In, m, lowlim, upplim$
Paso 2	Definir parámetros iniciales de la técnica ED

Paso 3	Inicialización aleatoria de la población que está asociada a los niveles de generación de cada planta respetando los límites.
Paso 4	Calcular VI_{BP} y VI_{BR} a través del subprograma 5.
Paso 5	Estimar el resultado de la función de optimización para cada individuo y encontrar la solución y aptitud del individuo que representa el menor costo.
Paso 6	Para (cada iteración desde 1) Hasta (máximo de iteraciones) Por cada individuo (i) seleccionar 3 individuos para Mutación estos deben ser diferentes del actual (r1, r2 y r3).
Paso 7	Calcular el vector mutante en base a la ecuación (21).
Paso 8	Hacer la recombinación creando un vector de prueba que mezcla los valores del mutante y la población según la tasa de recombinación.
Paso 9	Evaluar nuevamente el costo en la función objetivo Si aptitud_prueba < objetivo(i), actualizar el individuo Si aptitud_prueba < mejor_aptitud, actualizar mejor solución y aptitud
Paso 10	Si $VI_{BP} \wedge VI_{BR} \leq tolerancia$ Enviar resultados con el mejor esquema de despacho y costo Sino Volver al paso 4 Fin Si

Tabla 5. Rutina CA

Algoritmo 4. Subprograma 2 que contiene la rutina CA para el despacho económico considerando acoplamiento hidráulico	
Paso 1	Leer datos de la función: $P_{min}^H, P_{max}^H, POT_D, V_i, V_f, In, m,$ $lowlim, upplim$
Paso 2	Definir parámetros iniciales de la técnica CA y componentes de la cultura

Paso 3	Inicializar la población sujetándose a los límites y a las componentes de la cultura
Paso 4	Calcular VI_{BP} y VI_{BR} a través del subprograma 5.
Paso 5	Estimar el resultado de la función de optimización para cada individuo.
Paso 6	Escoger las posiciones de la componente situacional con mejores características.
Paso 7	Aplicar operador cultural para ajustar la descendencia.
Paso 8	Actualizar posiciones y costos de los individuos en la población.
Paso 9	Evaluar nuevamente el costo en la función objetivo.
Paso 10	Si $VI_{BP} \wedge VI_{BR} \leq tolerancia$ Enviar resultados con el mejor esquema de despacho y costo Sino Volver al paso 4 Fin Si

Tabla 6. Rutina PSO

Algoritmo 5. Subprograma 3 que contiene la rutina PSO para el despacho económico considerando acoplamiento hidráulico	
Paso 1	Leer datos de la función: $P_{min}^H, P_{max}^H, POT_D, V_i, V_f, In, m,$ $lowlim, upplim$
Paso 2	Definir parámetros iniciales de la técnica PSO.
Paso 3	Inicialización aleatoria de la ubicación y velocidad de los individuos, considerando límites inferiores y superiores.
Paso 4	Obtener VI_{BP} y VI_{BR} a través del subprograma 5.
Paso 5	Estimar el resultado de la función objetivo para cada vector de partículas
Paso 6	Seleccionar las mejores posiciones globales y locales.
Paso 7	Actualizar ubicación y velocidad de las partículas: \vec{X}_i^{k+1} y \vec{V}_i^{k+1} según (24) y (25).
Paso 8	Si $VI_{BP}, VI_{BR} \leq tolerancia$

<p>Enviar resultados con el mejor esquema de despacho y costo</p> <p>Sino</p> <p>Volver al paso 4</p> <p>Fin Si</p>

Tabla 7. Rutina GWO

<p>Algoritmo 6. Subprograma 4 que contiene la rutina GWO para el despacho económico considerando acoplamiento hidráulico</p>
<p>Paso 1 Leer datos de la función: $P_{min}^H, P_{max}^H, POT_D, V_i, V_f, In, m, lowlim, upplim$</p>
<p>Paso 2 Determinar parámetros iniciales de la técnica Grey Wolf.</p>
<p>Paso 3 Inicialización aleatoria de la población (agentes de búsqueda), respetando límites inferiores y superiores.</p>
<p>Paso 4 Calcular VI_{BP} y VI_{BR} a través del subprograma 5.</p>
<p>Paso 5 Estimar el resultado de la función objetivo para cada vector de posición de los agentes de búsqueda.</p>
<p>Paso 6 Seleccionar los 3 mejores agentes: $\vec{D}_\alpha, \vec{D}_\beta$ y \vec{D}_δ</p>
<p>Paso 7 Actualizar posiciones de las 3 mejores opciones en base a las ecuaciones (34), (35) y (36).</p>
<p>Paso 8 Usar la ecuación (37) para actualizar las posiciones de los agentes omega.</p>
<p>Paso 9 <i>Si</i> $VI_{BP}, VI_{BR} \leq tolerancia$ Almacenar el mejor resultado y enviar. Sino Volver al paso 4 Fin Si</p>

Para determinar las violaciones por incumplir las prohibiciones del balance de potencia y el uso de los reservorios se utilizó otro subprograma que se presenta a continuación:

Tabla 8. Pseudocódigo para calcular violaciones por incumplimiento de las prohibiciones

<p>Algoritmo 7. Subprograma 5 para calcular VI_{BP} y VI_{BR}</p>
<p>Paso 1 Leer las posibles soluciones entregadas por cada método.</p>
<p>Paso 2 Calcular el aporte energético de las hidroeléctricas en base a (10) $P_{absoluta}^H = 0$ Para $j=1$ Hasta (N_h) Hacer Si $m=24$ $V_{jm} = V_M$ Fin Si $P_{jm}^H = f(V_{jm}, Q_{jm})$ Fin Para</p>
<p>Paso 3 Obtener VI_{BR}. $VI_{BR} = 0$ Para $j=1$ Hasta (N_h) Hacer Si $m=1$ $BR = V_0 + I_{jm} - Q_{jm}$ $+ \sum_{k=1}^{N_{up}} Q_{km} - V_{jm}$ Sino $BR = V_{j,m-1} + I_{jm} - Q_{jm}$ $+ \sum_{k=1}^{N_{up}} Q_{km} - V_{jm}$ Fin Si $VI_{BR} = VI_{BR} + BR$ Fin Para</p>
<p>Paso 4 Calcular VI_{BP} con la ecuación (8)</p>
<p>Paso 5 Enviar resultados y finalizar.</p>

Las técnicas DE, CA, PSO y GWO presentadas para resolver el problema de estudio de un sistema con generación híbrida, se implementaron en el software MATLAB R2020b instalado en una computadora con características: Procesador 13th Gen Intel® Core™ i7-1365U CPU @ 1.8 GHz y memoria RAM de 16 GB.

4 Sistema Híbrido de Prueba

El diseño de prueba para el despacho en sistemas con generación híbrida es una variación del modelo propuesto en [13] que

consiste en un sistema uninodal conformado por cuatro centrales hidroeléctricas acopladas hidráulicamente y cinco unidades termoeléctricas. A esto se le suma generación fotovoltaica y eólica basada en los modelos propuestos en [9] y [16].

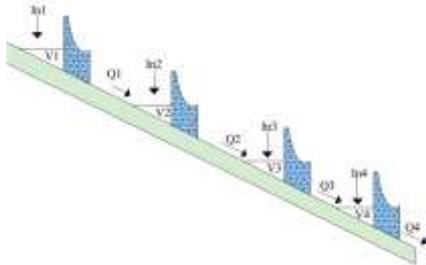


Figura 7. Hidroeléctricas acopladas en cascada

El problema de estudio consiste en simular escenarios con limitación energética, para esto reduciremos forzosamente el potencial de generación hidroeléctrica, que representa la fuente principal de energía en el sistema de prueba híbrido. Esto se consigue modificando el flujo natural de agua en las hidroeléctricas, durante el periodo de análisis y así simular escenarios donde el estiaje afecta al SEP.

Como segundo caso de estudio se trabajará bajo el mismo sistema de generación con la diferencia de que ahora las hidroeléctricas pueden operar a plena capacidad con el fin de contrastar resultados, así como comparar las técnicas de optimización entre sí para determinar la mejor.

En la sección de Anexos se encuentran los coeficientes utilizados en el modelo de costos de generación térmica, sus límites operativos, los factores del modelo de cada planta hidroeléctrica con sus respectivos rangos operativos, manejo de reservorios, descarga de agua, condiciones iniciales y finales de cada planta, así como los modelos de los parques eólicos y las centrales solares fotovoltaicas.

El escenario de demanda para el problema de estudio se muestra en la Figura 8 donde el horizonte de planificación es a corto plazo (24 horas) así que el modelo de despacho se divide en 24 subperiodos de optimización.

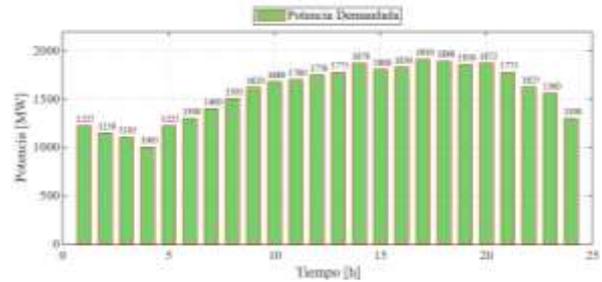


Figura 8. Potencia demandada por la carga

5 Análisis de Resultados

La predicción con técnica Montecarlo basado en funciones de densidad de probabilidad da los siguientes resultados:

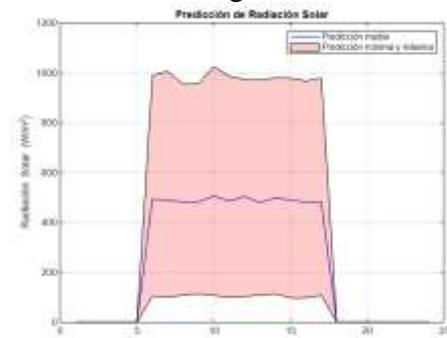


Figura 9. Predicción de radiación solar.

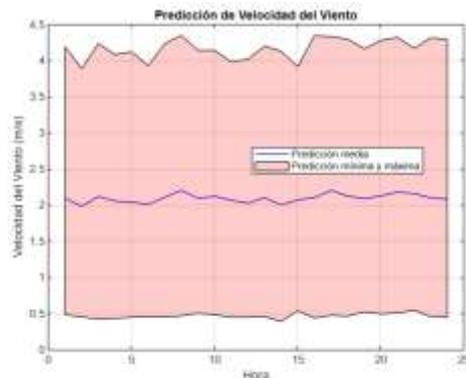


Figura 10. Predicción de velocidad de viento

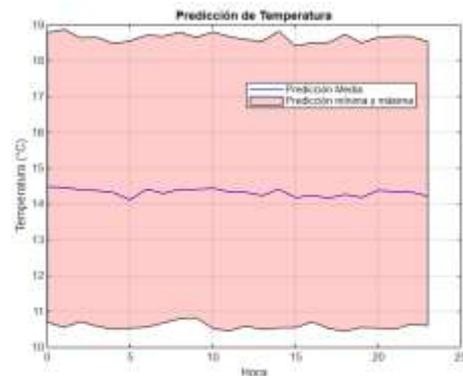


Figura 11. Predicción de temperatura

Para el cálculo de la potencia generada por ERNC se utilizarán los valores máximos, para tener un mayor aprovechamiento de los recursos. En la Figura 12 se presenta la potencia obtenida por estas fuentes.

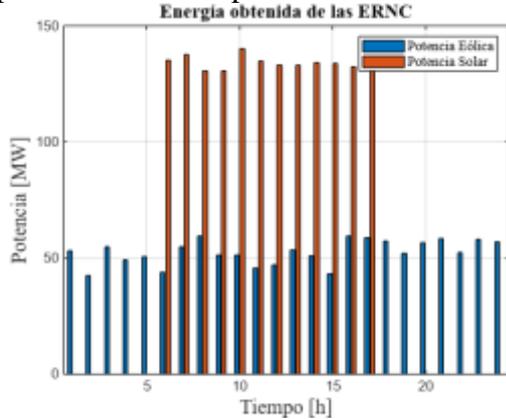


Figura 12. Potencia generada con energías renovables convencionales

Posteriormente para la optimización del despacho hidrotérmico se debe tener en cuenta que todas las técnicas heurísticas y metaheurísticas mantienen algo en común que es la creación inicial aleatoria de soluciones, para posteriormente realizar iteraciones hasta encontrar la mejor candidata. De modo que nunca se obtendrán los mismos resultados, por tal motivo para la simulación se realizarán dos repeticiones por cada técnica con el fin de seleccionar el mejor esquema de despacho que ofrezca cada algoritmo de optimización.

5.1 Caso 1

En el primer escenario la limitación energética es consecuencia del periodo de estiaje que afecta principalmente a los reservorios y en consecuencia la producción de las hidroeléctricas se ve afectada.

De modo que el esquema de entradas naturales de agua disponible para cada hidroeléctrica se establece de la siguiente forma:

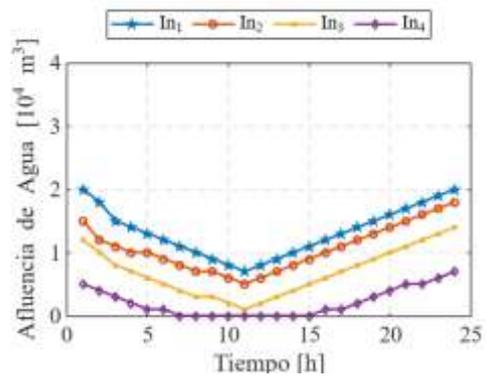


Figura 13. Entradas naturales de agua

Bajo estas condiciones y considerando la naturaleza aleatoria de las técnicas PSO, GWO, DE y CA, se muestra en la Tabla 9 la repetición con el mejor despacho ofrecido por cada algoritmo.

Tabla 9. Repetición que muestra el mejor despacho por cada técnica

TÉCNICA	REPETICIÓN CON EL MEJOR DESPACHO
<i>PSO</i>	1
<i>GWO</i>	2
<i>DE</i>	2
<i>CA</i>	2

A continuación, en la Figura 13 hasta la Figura 16 se pueden observar los diagramas de descarga de fluidos en cada hidroeléctrica, propuesto por las técnicas de optimización durante el horizonte de planificación.

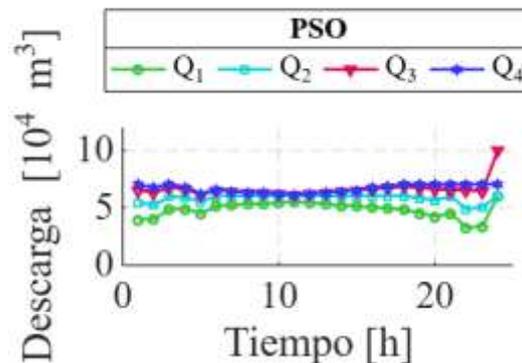


Figura 14. Flujo de descarga de agua por PSO

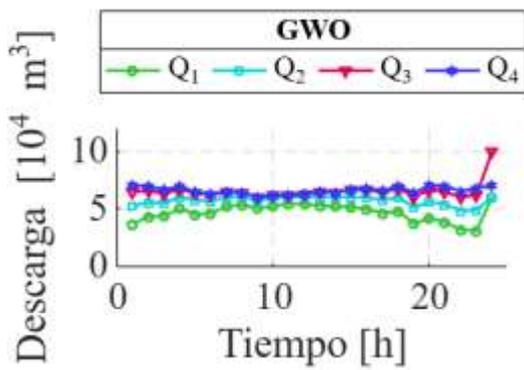


Figura 15. Flujo de descarga de agua por GWO

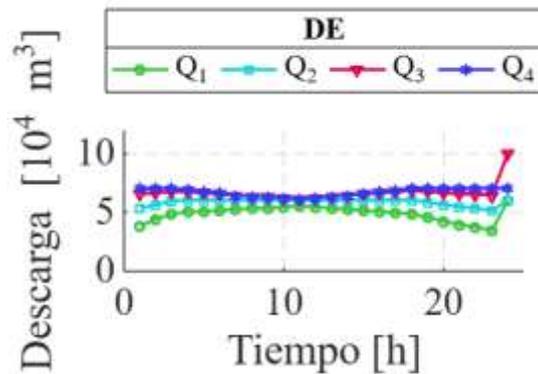


Figura 16. Flujo de descarga de agua por DE

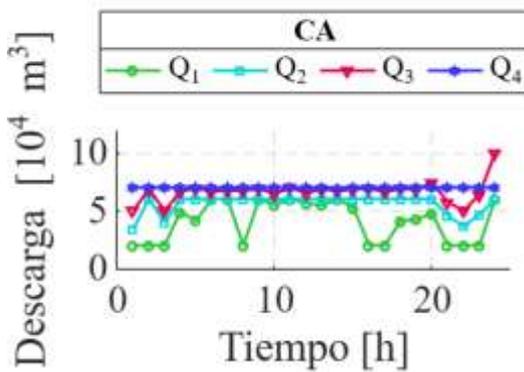


Figura 17. Flujo de descarga de agua por CA

De aquí se observa que el esquema de flujo de descarga proporcionado por la técnica PSO, GWO y DE son muy similares entre sí, además de ser uniformes durante la mayor parte del horizonte de planificación. La técnica que ofrece una mayor variación del comportamiento dinámico del agua es el algoritmo cultural donde se puede apreciar que el flujo de descarga en la primera hidroeléctrica no sigue un patrón uniforme en relación con las demás plantas, esto debido a la estructura interna del CA que provoca una mayor variación de resultados

en comparación a los demás métodos de optimización.

En la Figura 17 hasta la Figura 20 se muestra cómo cada heurística y metaheurística maneja los niveles de los reservorios.

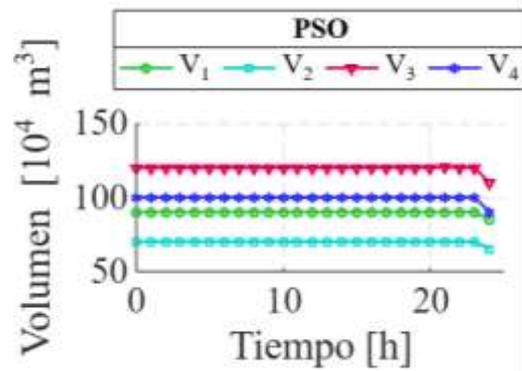


Figura 18. Manejo de reservorios con la técnica PSO

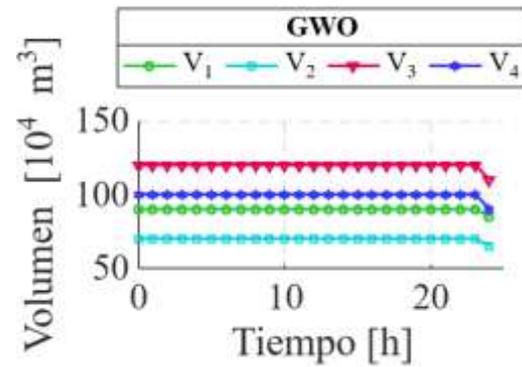


Figura 19. Manejo de reservorios con la técnica GWO

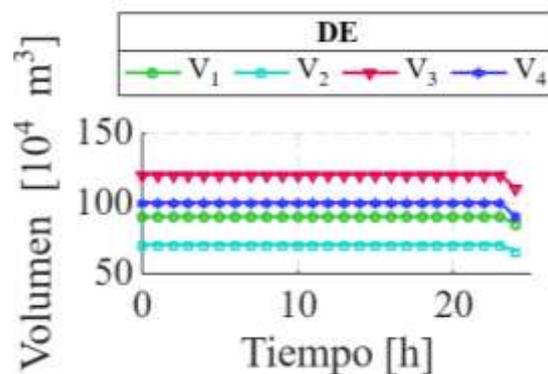


Figura 20. Manejo de reservorios con la técnica DE

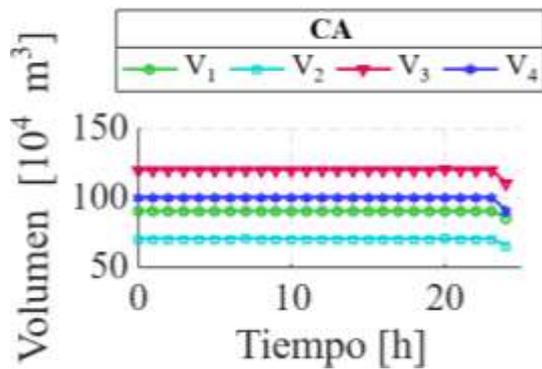


Figura 21. Manejo de reservorios con la técnica CA

Como se aprecia, todas las técnicas manejan una planificación muy similar entre sí, esto se debe a la limitación de generación por hidroeléctricas a consecuencia del periodo de estiaje de modo que la gestión de reservorios no tiene mayor variación porque el nivel de agua final, tras el despacho a corto plazo, no puede disminuir hasta sus niveles críticos.

En base a estos antecedentes, el esquema de generación eléctrica mediante hidroeléctricas que ofrece cada algoritmo de optimización queda de la siguiente manera:

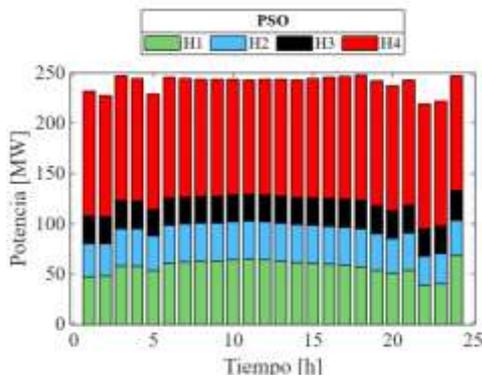


Figura 22. PSO para generación hidroeléctrica

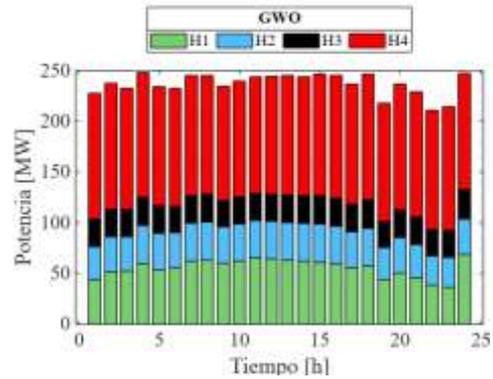


Figura 23. GWO para generación hidroeléctrica

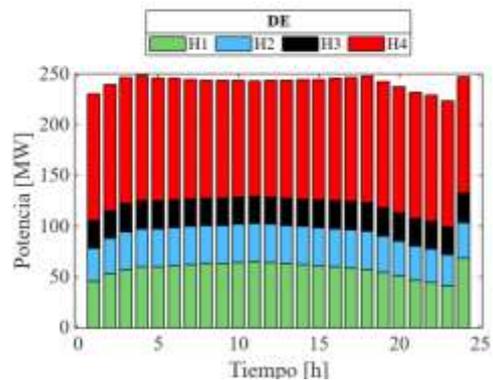


Figura 24. DE para generación hidroeléctrica

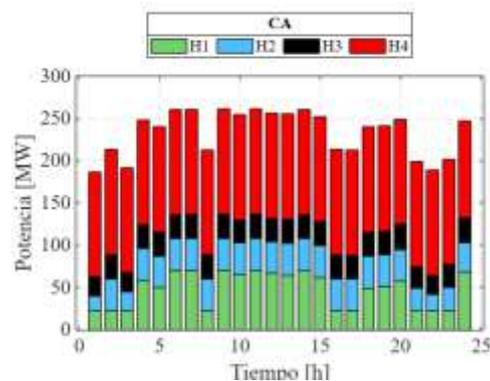


Figura 25. CA para generación hidroeléctrica

A manera de resumen se presenta en la Tabla 10, el aporte de hidroeléctricas a la demanda resultante tras la generación a través de paneles solares fotovoltaicos y turbinas eólicas.

Tabla 10. Aporte porcentual de energía eléctrica por parte de las hidroeléctricas

TÉCNICA	APORTE (%)
PSO	16.553
GWO	16.31
DE	16.646
CA	16.085

Lo que se puede apreciar es que la técnica que aprovecha más la generación hidroeléctrica es la Evolución Diferencial, sin embargo, esta variación no es mayor en comparación a los otros algoritmos.

Finalmente, el esquema de despacho con termoeléctricas e hidroeléctricas propuesto por cada algoritmo se presenta en la Figura 26 hasta la Figura 29.

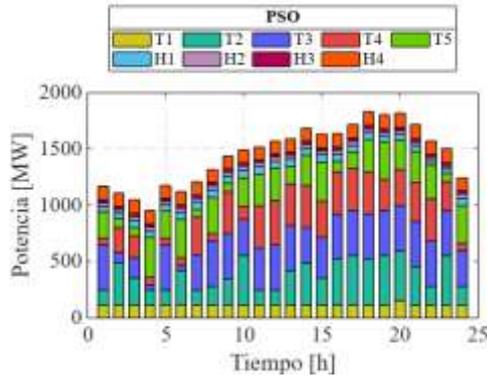


Figura 26. Esquema de despacho propuesto por la técnica PSO para el caso 1

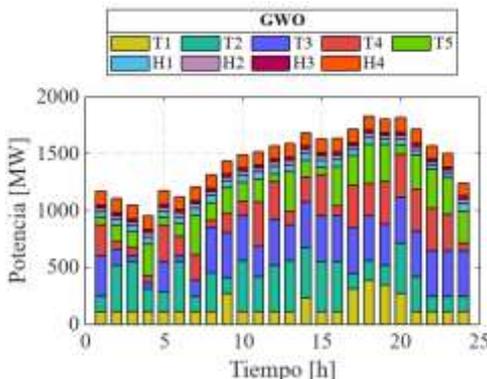


Figura 27. Esquema de despacho propuesto por la técnica GWO para el caso 1

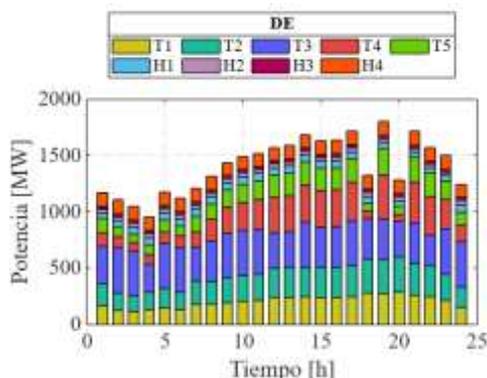


Figura 28. Esquema de despacho propuesto por la técnica DE para el caso 1

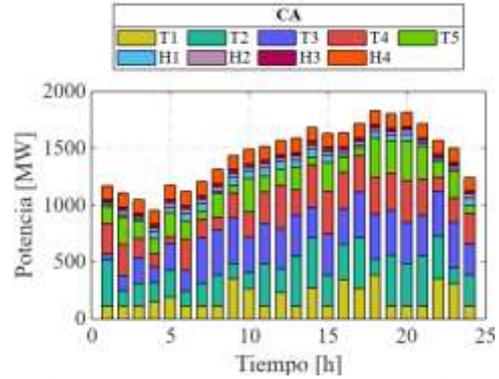


Figura 29. Esquema de despacho propuesto por la técnica CA para el caso 1

Lo que se puede apreciar es que, con todos los algoritmos, las centrales termoeléctricas que contribuyen con mayor energía son las T2 y T3.

En el caso de la técnica PSO la central T1 contribuye con la menor cantidad de potencia y su operación no varía en gran parte a excepción de las 20:00 donde trabaja a mayor potencia; mientras que con las técnicas GWO, DE y CA la central T1 también es la que menor aporte tiene sin embargo operan a mayor capacidad por lo que el trabajo se distribuye más equitativamente entre las otras termoeléctricas.

Finalmente, de todos los algoritmos utilizados el que ofrece un esquema de operación con una repartición más uniforme de la potencia que generará cada termoeléctrica es la Evolución Diferencial. Para concluir con el análisis del caso uno se presenta en la Figura 30 los costos ligados a la generación eléctrica.

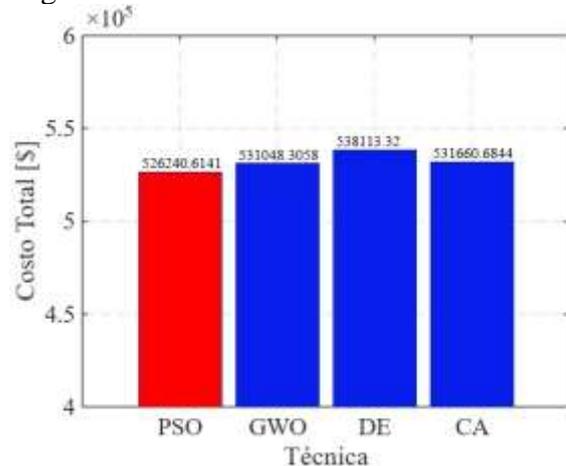


Figura 30. Costos operativos

De aquí se observa que el algoritmo de optimización que ofrece el esquema de despacho con el precio más bajo es la metaheurística PSO.

Cabe recalcar que la Evolución Diferencial es el algoritmo de interés, de modo que, comparando ambos precios, la diferencia entre estos es de \$11872.71 la cual ya es una diferencia notable si consideramos que el segundo mejor precio, obtenido por GWO, tiene una diferencia de \$4807.69 con costo de PSO.

5.2 Caso 2

La finalidad del segundo caso de estudio es simular un escenario donde las condiciones son favorables para tener mayor aporte de potencia por parte de las centrales hidroeléctricas de modo que se limite forzosamente la operación de las termoeléctricas, todo esto bajo los mismos niveles de aporte de las centrales solares y eólicas ya que no se puede controlar su operación.

Para esto es necesario modificar los niveles de agua en los embalses, los caudales y las entradas naturales de agua previstos para cada subperiodo de optimización. En la Figura 31 se muestra la afluencia natural de agua para el caso dos.

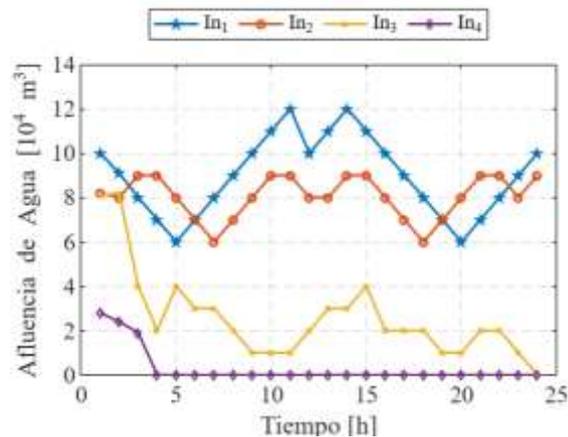


Figura 31. Entradas naturales de agua previstos para el caso 2

Con los antecedentes de la aleatoriedad de las poblaciones iniciales, las repeticiones que ofrecen la mejor solución por cada algoritmo se presentan a continuación.

Tabla 11. Repetición que propone el mejor esquema de despacho en el caso 2

TÉCNICA	REPETICIÓN CON EL MEJOR DESPACHO
PSO	1
GWO	1
DE	2
CA	2

El esquema de descarga de agua por cada algoritmo de optimización se presenta en las siguientes figuras.

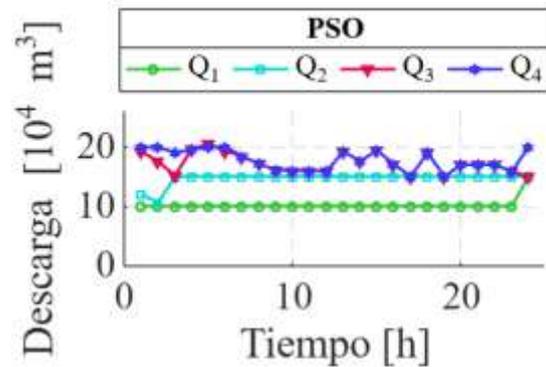


Figura 32. Flujo de descarga del agua para el caso 2 por PSO

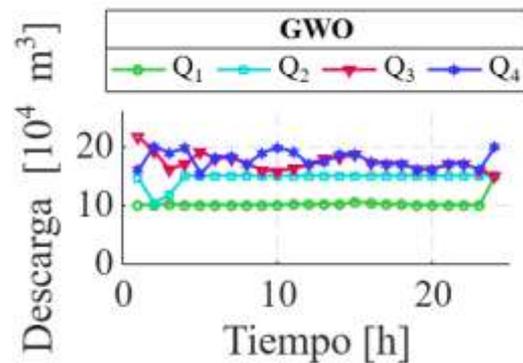


Figura 33. Flujo de descarga del agua para el caso 2 por GWO

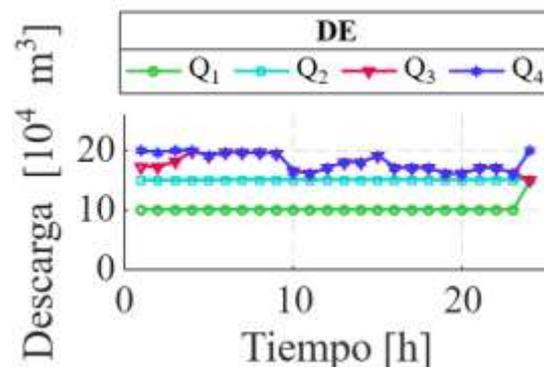


Figura 34. Flujo de descarga del agua para el caso 2 por DE

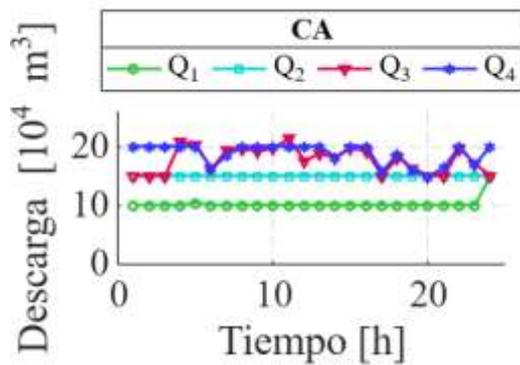


Figura 35. Flujo de descarga del agua para el caso 2 por CA

A diferencia del caso 1, los esquemas de descarga de agua proporcionados por cada técnica son muy diferentes entre sí, además, cabe recalcar que el Algoritmo de Evolución Diferencial propone una planificación uniforme para el comportamiento del flujo dinámico del agua a diferencia de las otras técnicas que presentan esquemas con mayores variaciones a lo largo del horizonte de planificación. Adicionalmente si comparamos los esquemas del caso 2 en conjunto con las planificaciones del caso 1 ya no son similares entre sí, esto se debe a que, al tener mayor cantidad de recursos, las posibles vías de solución también aumentan y por tal motivo, los algoritmos ofrecen mayores variaciones en sus resultados.

A continuación, en las Figuras 36, 37, 38 y 39 se muestra la planificación para el manejo de los reservorios.

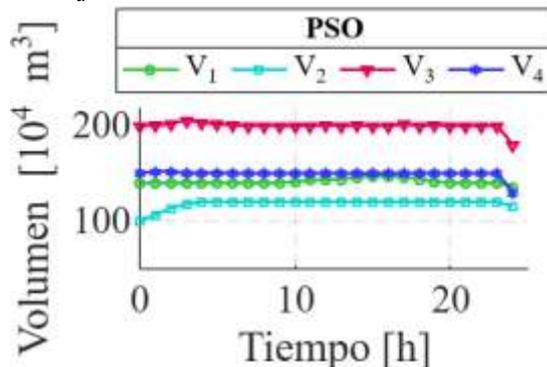


Figura 36. Manejo de los reservorios en el caso 2 con PSO

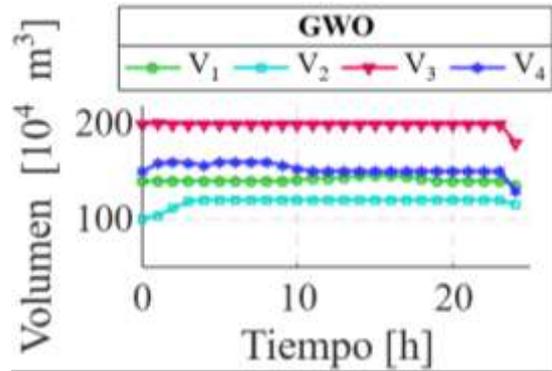


Figura 37. Manejo de los reservorios en el caso 2 con GWO

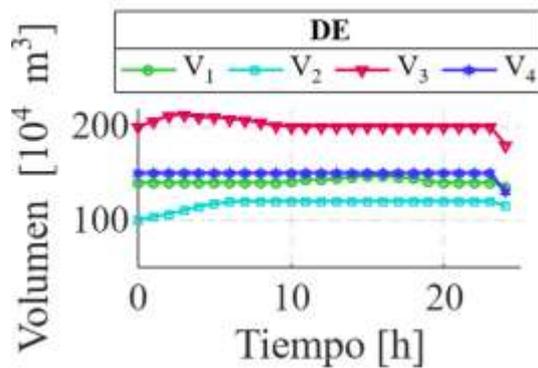


Figura 38. Manejo de los reservorios en el caso 2 con DE

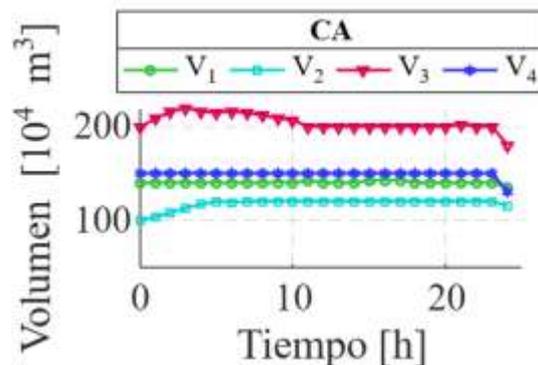


Figura 39. Manejo de los reservorios en el caso 2 con CA

Lo que se puede observar es que los esquemas de planificación en el manejo de los reservorios son muy similares entre sí, todos aprovechan en su mayoría al tercer reservorio gracias a que es el que tiene mayor capacidad de almacenamiento, por tal razón los algoritmos varían en mayor parte los niveles de este, de manera que los niveles de cota final no sean inferiores a los límites establecidos para no comprometer la operación en posteriores horizontes de despacho.

Con estas consideraciones, el aporte de hidroeléctricas por cada algoritmo se presenta a continuación:

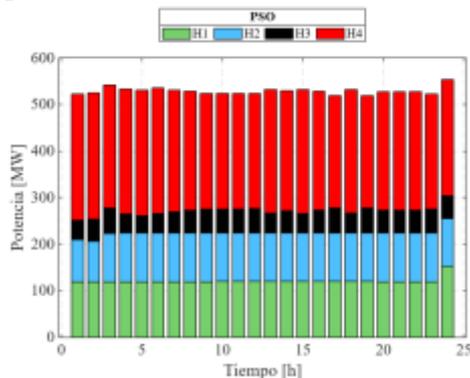


Figura 40. PSO para generación hidroeléctrica en el caso 2

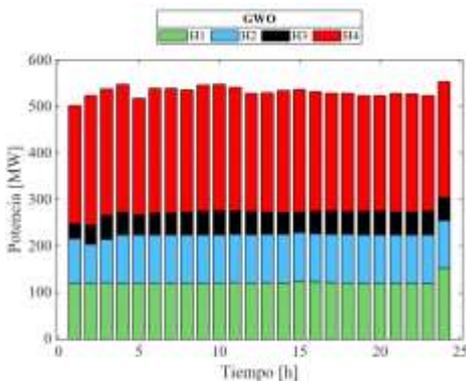


Figura 41. GWO para generación hidroeléctrica en el caso 2

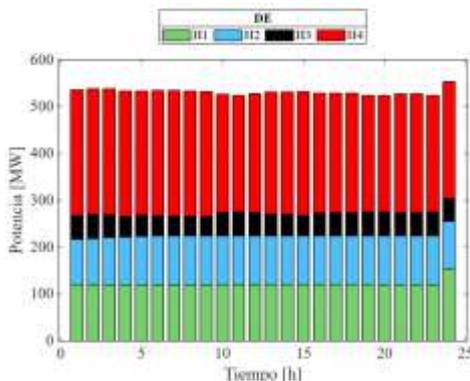


Figura 42. DE para generación hidroeléctrica en el caso 2

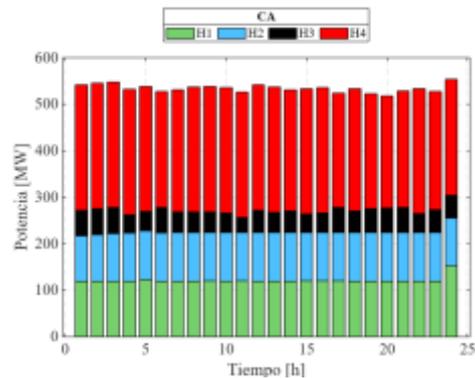


Figura 43. CA para generación hidroeléctrica en el caso 2

La mayor diferencia entre ambos casos radica en la contribución energética por parte de las hidroeléctricas, lo que se muestra resumidamente en la Tabla 12, donde está la contribución porcentual por cada técnica, después de la energía obtenida de las ERNC.

Tabla 12. Aporte porcentual a través de hidroeléctricas en el caso 2

TÉCNICA	APORTE (%)
PSO	36,42
GWO	36.645
DE	36.561
CA	36.756

A continuación, se presenta el esquema de despacho en combinación de las termoeléctricas e hidroeléctricas para el escenario de demanda.

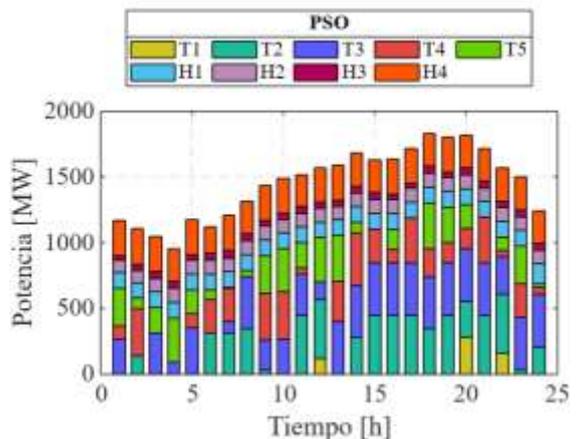


Figura 44. Esquema de despacho propuesto por la técnica PSO para el caso 2

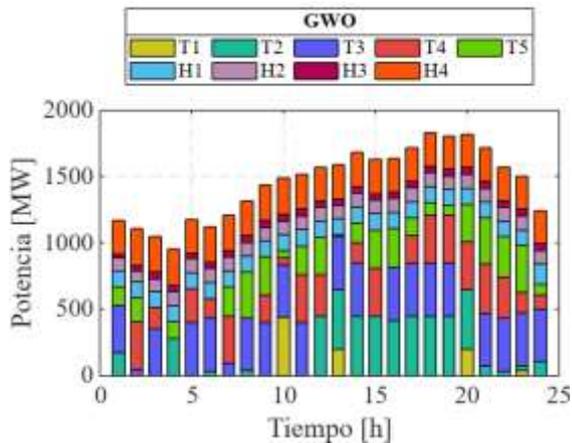


Figura 45. Esquema de despacho propuesto por la técnica GWO para el caso 2

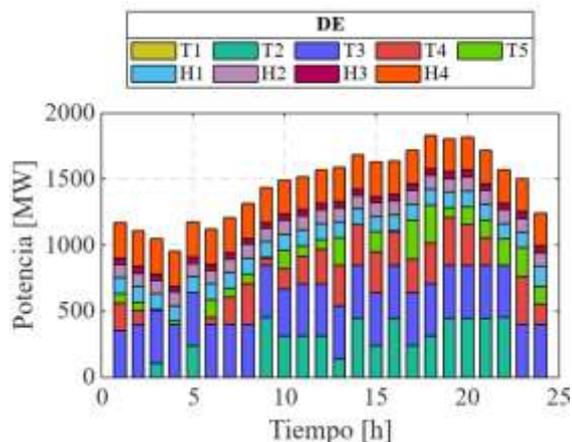


Figura 46. Esquema de despacho propuesto por la técnica DE para el caso 2

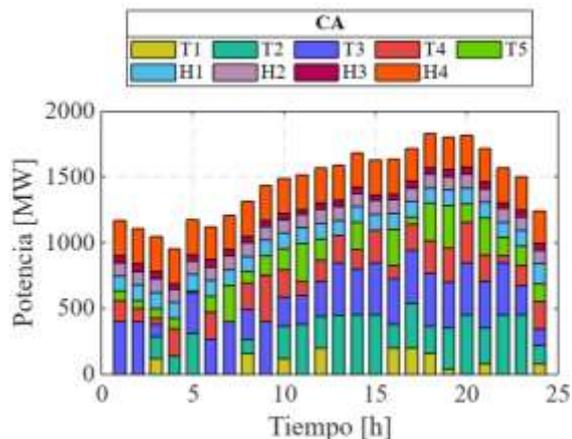


Figura 47.. Esquema de despacho propuesto por la técnica CA para el caso 2

Lo que se puede notar es que en el caso 2 sucede algo similar al caso previo, y es que tanto T1 como T2 son las unidades que contribuyen con mayor potencia a lo largo el horizonte de planificación. Ahora enfocándonos únicamente en este

escenario, cabe mencionar que la unidad T1 opera únicamente como suplemento ante periodos con alta demanda a excepción del algoritmo DE donde la contribución de T1 es totalmente nula, lo que conlleva a que la operación de las otras termoeléctricas esté en sus límites máximos.

Para finalizar el análisis del caso 2 se presenta el costo ligado a la operación de las unidades termoeléctricas e hidroeléctricas en la Figura 48 para el despacho económico.

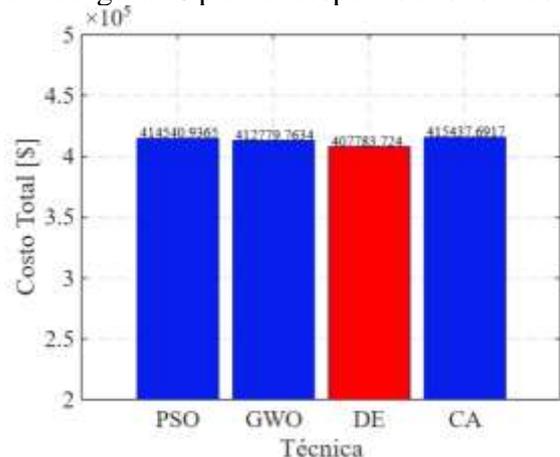


Figura 48. Costos ligados a la operación en el caso 2

La técnica que ofrece el mejor costo es la Evolución Diferencial con una diferencia de \$4996.04 con respecto al segundo mejor precio que ofrece el algoritmo GWO. Esta diferencia a nivel de un SEP de gran tamaño puede no ser significativa.

5.3 Mejor despacho en el caso 1 y 2 durante la mayor y menor demanda.

Para el caso 1, la técnica que ofrece el mejor esquema de despacho es PSO y para el caso 2, la técnica DE entrega la mejor solución. Con estos antecedentes, se presenta en la Figura 49 hasta la Figura 52, el aporte de potencia a través de fuentes renovables mediante el software DigSilent Power Factory, durante las horas con menor y mayor demanda (4:00 y 17:00).

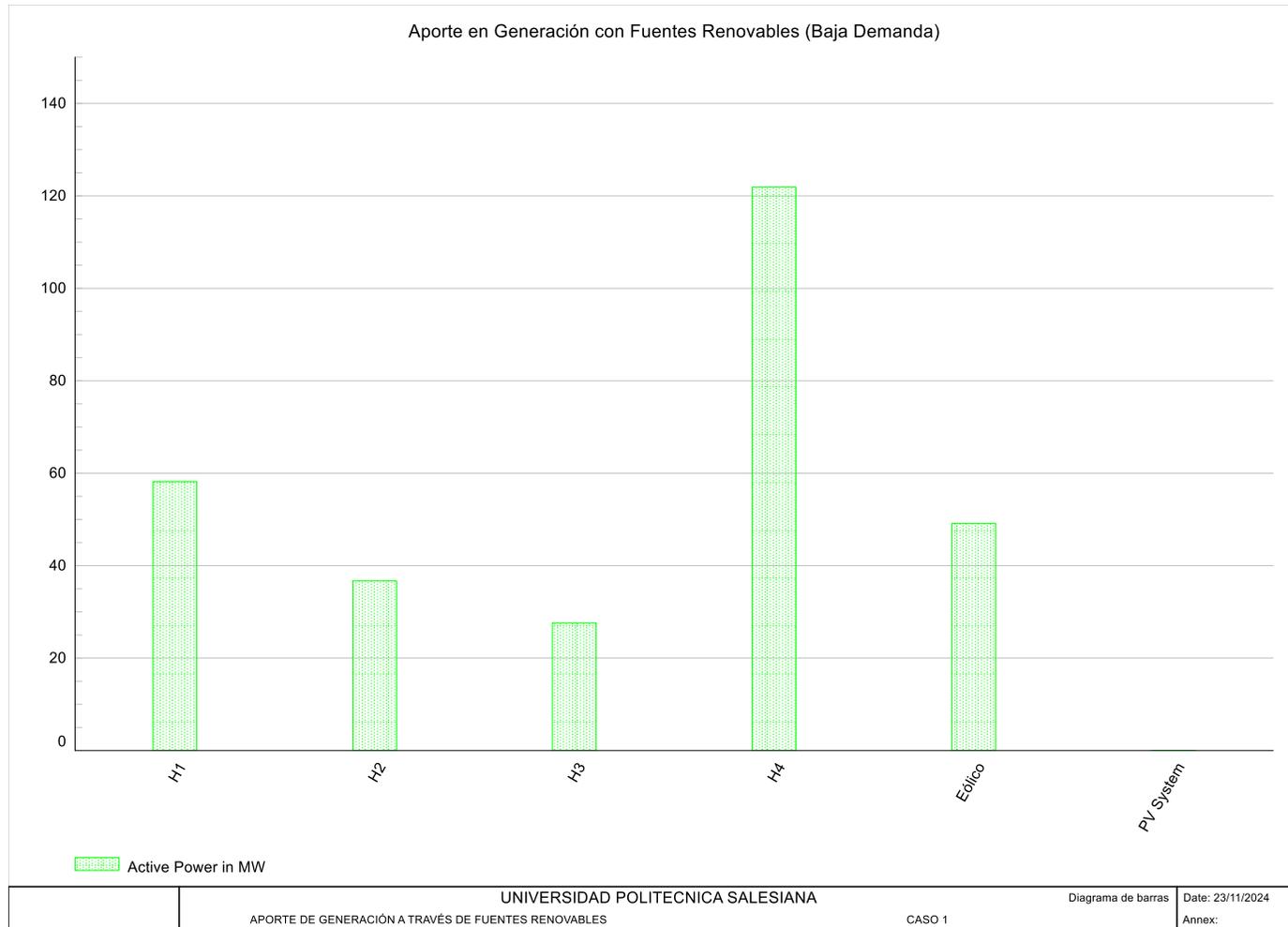


Figura 49. Generación eléctrica con recursos renovables en el caso 1 para la menor demanda

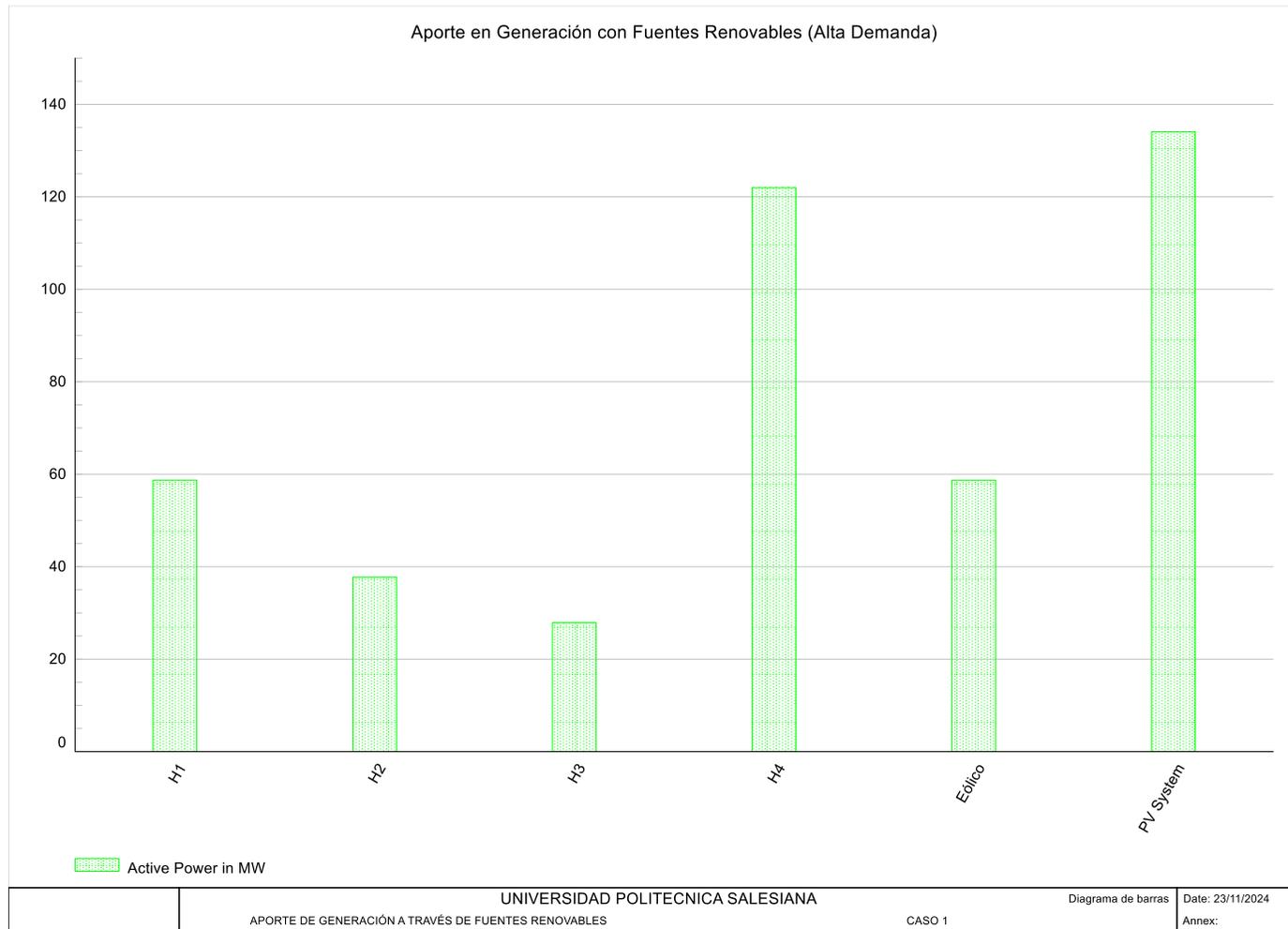


Figura 50. Generación eléctrica con recursos renovables en el caso 1 para la mayor demanda

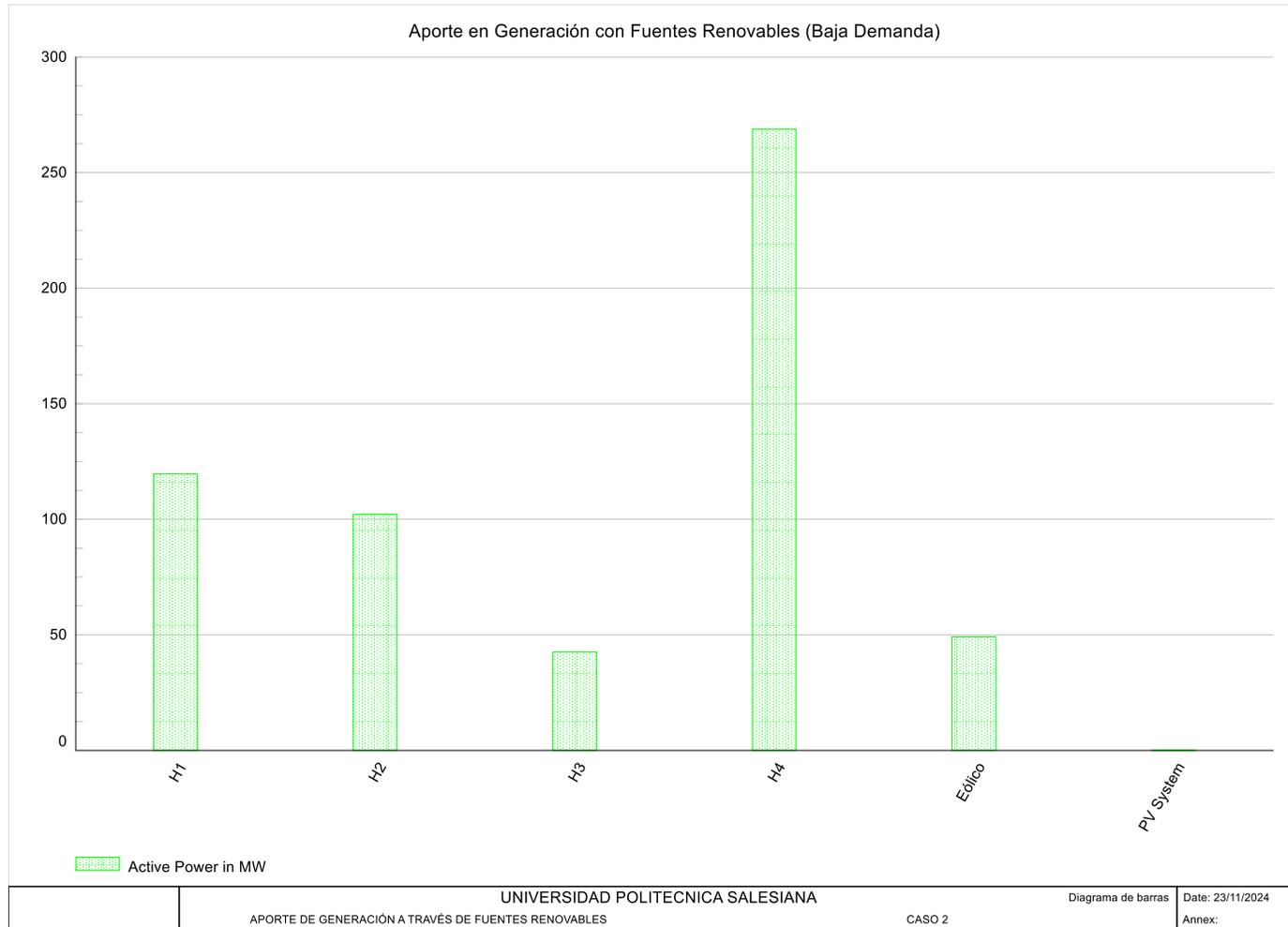


Figura 51. Generación eléctrica con recursos renovables en el caso 2 para la menor demanda

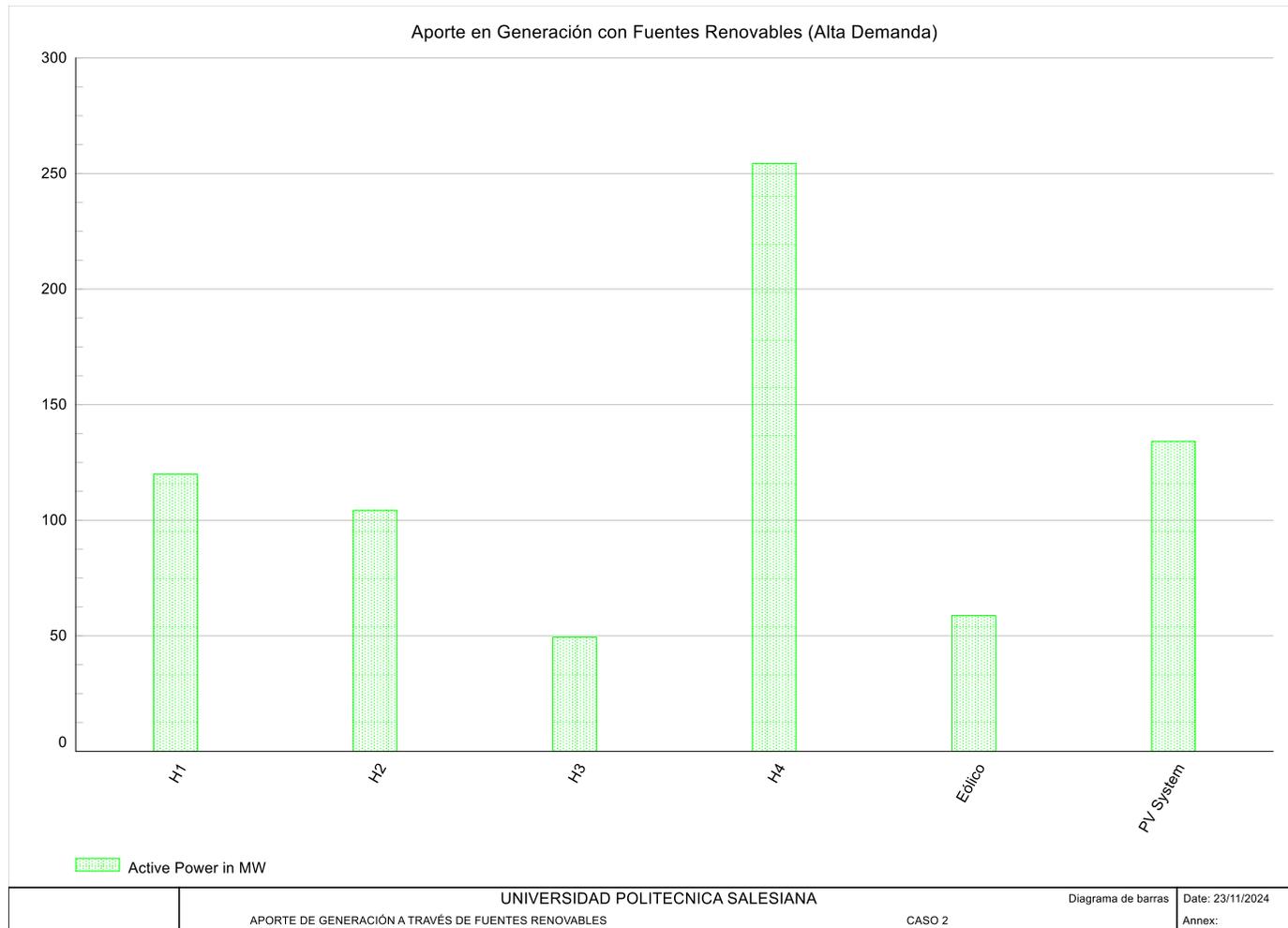


Figura 52. Generación eléctrica con recursos renovables en el caso 2 para la mayor demanda

En base a las figuras mostradas anteriormente, se puede observar que las fuentes renovables no convencionales tienen un gran aporte sobre la demanda total, principalmente por parte de las centrales solares fotovoltaicas durante las horas con mayor demanda.

6 Conclusiones

Los periodos de estiaje representan un gran problema para un Sistema Eléctrico de Potencia que depende principalmente por la operación de hidroeléctricas, por esta razón se opta por incorporar centrales que aprovechen fuentes renovables, de modo que sirvan como apoyo a la generación eléctrica. Y de este modo, tener una transición de sistemas tradicionales a sistemas híbridos. Aunque como se observó, la principal desventaja radica en la incertidumbre para disponer del recurso primario, no obstante, es una forma de robustecer el sistema en su etapa de generación y así aumentar su confiabilidad. En estos escenarios de limitación energética el abastecimiento de la carga no se vio afectado debido a que las termoeléctricas en conjunto de las centrales solares fotovoltaicas y las turbinas eólicas tenían la capacidad de cubrir la potencia necesaria durante todo el horizonte de planificación por lo que la carga no sufre cortes de energía.

En lo que respecta al algoritmo de Evolución Diferencial, mostró ser eficaz, así como las otras técnicas de optimización con las que se comparó, para resolver problemas de despacho económico en sistemas con generación híbrida. Si se desea determinar cuál fue mejor, se podría considerar aspectos como el tiempo de ejecución en donde la técnica PSO finalizaba sus iteraciones en menor tiempo. Aunque esto no tiene gran importancia porque todos los algoritmos cumplieron con el propósito de optimizar el despacho económico.

7 Trabajos Futuros

- Realizar el despacho económico en un sistema híbrido donde la generación no es suficiente para cubrir la demanda de modo que se planifiquen escenarios de corte de carga.
- Planificar el despacho económico en un sistema híbrido considerando almacenamiento con baterías principalmente para la generación solar fotovoltaica.
- Utilizar técnicas de optimización híbridas para solucionar el despacho económico ante escenarios de limitación energética.

8 Referencias

- [1] S. E. Bastidas Morocho and H. N. Arcos Martínez, “Despacho Económico del Sistema Híbrido de las Islas Santa Cruz y Baltra Incorporando la Aleatoriedad de Potencia de los Sistemas Eólico y Solar Fotovoltaico,” *Rev. Técnica “Energía,”* vol. 16, no. 1, pp. 1–7, 2019, doi: 10.37116/revistaenergia.v16.n1.2019.329.
- [2] C. Veloz, D. L. Jimenez J., V. C. Almache B., and R. Salazar Achig, “Evaluación de un modelo de optimización no lineal para el despacho económico de microrredes aisladas,” *Ingenius,* no. 31, pp. 32–42, 2024, doi: 10.17163/ings.n31.2024.03.
- [3] A. Vargas and W. Sifuentes, “Despacho Economico Hidrotermico Multibase Multinodal de Corto Plazo. Estado del Arte de los Metodos de Optimizacion,” no. May 2014, p. 9, 2014, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Wilfredo-Sifuentes/publication/229031445_DESPACHO_ECONOMICO_HIDR

- OTERMICO_MULTIEMBASE_MULTINODAL_DE_CORTO_PLAZO_ESTADO_DEL_ARTE_DE_LOS_METODOS_DE_OPTIMIZACION/links/0fcfd509bffd55ab2c000000/DESPACHO-ECONOMICO-HIDROTERM
- [4] P. Vallejo, "Evaluación mediante indicadores clave de rendimiento del despacho económico hidrotérmico resuelto por medio de técnicas heurísticas," 2021.
- [5] D. Orbea, "Despacho Económico En Sistemas Eléctricos De Potencia Considerando El Comportamiento Estocástico De Centrales De Generación a Base De Energías Renovables No Convencionales," pp. 1–50, 2021, [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19786/1/UPS-TTS244.pdf>
- [6] S. Pinzón, "Despacho económico de generación hidroeléctrica y termoeléctrica usando programación dinámica," 2020.
- [7] A. Y. Abdelaziz, Y. G. Hegazy, W. El-Khattam, and M. M. Othman, "Optimal allocation of stochastically dependent renewable energy based distributed generators in unbalanced distribution networks," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 34–44, 2015, doi: 10.1016/j.epsr.2014.09.005.
- [8] C. Severiche, "El agua y la generación de energía en entornos de sostenibilidad," *Rev. la Esc. Ing. y Arq. Cap&Cua. Ciencia, Tecnol. y Cult.*, no. 9, pp. 1–6, 2013.
- [9] R. Valle, "Despacho Economico De Corto Plazo Para El Sistema Hibrido De Las Islas Santa Cruz Y Baltra, Ante Varios Escenarios De Aporte De Energía Renovable No Convencional," pp. 1–109, 2022, [Online]. Available: https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/23402/1/CD_12829.pdf
- [10] S. Pinzon Masache and C. Barrera-Singana, "Short-term hydrothermal economic dispatch applied on hydraulic coupled power plants using dynamic programming," *2020 Ieee Andescon, Andescon 2020*, 2020, doi: 10.1109/ANDESCON50619.2020.9272182.
- [11] J. Moreno Vega, M. Melián Batista, and J. Moreno Pérez, "Metaheurísticas: Una visión global," *Intel. Artif. Rev. Iberoam. Intel. Artif.*, vol. 7, no. 19, pp. 7–28, 2003.
- [12] G. Ruiz, G. Manso, C. Juan, and G. Rendón, "Un nuevo modelo de despacho hidrotérmico en ambientes de mercado usando algoritmos genéticos," *Sci. El Tech.*, vol. XII, no. 30, p. 31.36, 2006.
- [13] M. Nazari-Heris, B. Mohammadi-Ivatloo, and G. B. Gharehpetian, "Short-term scheduling of hydro-based power plants considering application of heuristic algorithms: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, no. March 2016, pp. 116–129, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.043.
- [14] P. Vallejo-Correa, C. Barrera-Singaña, and A. Valenzuela, "Evaluation of Heuristic Techniques for Solving the Short-Term Hydrothermal Scheduling based on Key Performance Indicators (KPIs)," *ETCM 2021 - 5th Ecuador Tech. Chapters Meet.*, 2021, doi: 10.1109/ETCM53643.2021.9590707.
- [15] J. M. G. Alvarez and J. C. G. Targarona, "Generación eólica empleando distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia," *DYNA*, vol. 78, no. 169, pp. 95–104, 2011.

- [16] S. Ramos, M. V. Ramírez-Martínez, and A. Garcés, “Impacto de la generación eólica en el despacho hidrotérmico de mediano plazo,” *Rev. Fac. Ing.*, vol. 1, no. 73, pp. 214–224, 2014.
- [17] C. Cualchi, “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA CON INTEGRACIÓN A LA RED ELÉCTRICA EN EL EDIFICIO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.,” 2019.
- [18] J. Zalamea, “Despacho Hidrotérmico de Mediano Plazo aplicado al Complejo Hidroeléctrico Paute Integral,” *Rev. Técnica “energía,”* vol. 18, no. 1, pp. 95–105, 2021, doi: 10.37116/revistaenergia.v18.n1.2021.465.
- [19] C. Díaz, “Despacho económico de generación termoeléctrica usando métodos de sensibilidad AC,” *Acad. Manag. Rev.*, p. 29, 2019.
- [20] P. Vergara-Barrios, J. Rey-López, G. Osma Pinto, and G. Ordóñez-Plata, “Evaluación del potencial solar y eólico del campus centra de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 13, no. 2, pp. 49–57, 2014.
- [21] A. F. Prieto, “DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD,” 2015.
- [22] J. Carlos and S. Rico, “Comparación de métodos para determinar los parámetros de Weibull para la generación de energía eólica.,” *Sci. Tech. Año XVIII*, vol. 18, no. 2, pp. 315–320, 2013.
- [23] C. D. S. Martínez, “Modelo de mezclas Gaussianas como clasificadores en el contexto de Machine Learning,” pp. 1–26, 2022.
- [24] E. G. Diego Carrión, Estuardo Correa, “Predicción de la Demanda Eléctrica a Corto Plazo Mediante Cadenas de Markov y Monte Carlo,” *RISTI - Rev. Iber. Sist. e Tecnol. Inf.*, no. May, 2020, doi: 10.17013/risti.n.pi-pf.
- [25] S. Kumar and R. Naresh, “Efficient real coded genetic algorithm to solve the non-convex hydrothermal scheduling problem,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 29, no. 10, pp. 738–747, 2007, doi: 10.1016/j.ijepes.2007.06.001.
- [26] P. Benitez, “Despacho Económico Considerando La Emisión De Gases e Integración De Energía Fotovoltaica Mediante La Utilización Del Algoritmo De Libélulas,” 2022.
- [27] Y. Wu, B. Zhao, and L. Liu, “Solving economic load dispatch problem with valve point effect using mean guiding differential evolution,” *Proc. IECON 2017 - 43rd Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, vol. 2017-Janua, no. 1, pp. 434–439, 2017, doi: 10.1109/IECON.2017.8216077.
- [28] Y. Shi, H. Gao, and D. Wu, “An improved differential evolution algorithm with novel mutation strategy,” *IEEE SSCI 2014 - 2014 IEEE Symp. Ser. Comput. Intell. - SDE 2014 2014 IEEE Symp. Differ. Evol. Proc.*, pp. 1–8, 2015, doi: 10.1109/SDE.2014.7031540.
- [29] C. A. Oliveira De Freitas, R. C. Limao De Oliveira, D. J. Azevedo Da Silva, J. C. Leite, and J. De Almeida Brito Junior, “Solution to economic - emission load dispatch by cultural algorithm combined with local search: case study,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 64023–64040, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2877770.
- [30] D. A. Dias Tamayo, A. Garcés Ruiz, and D. Gonzalez Ocampo, “Despacho económico en sistemas

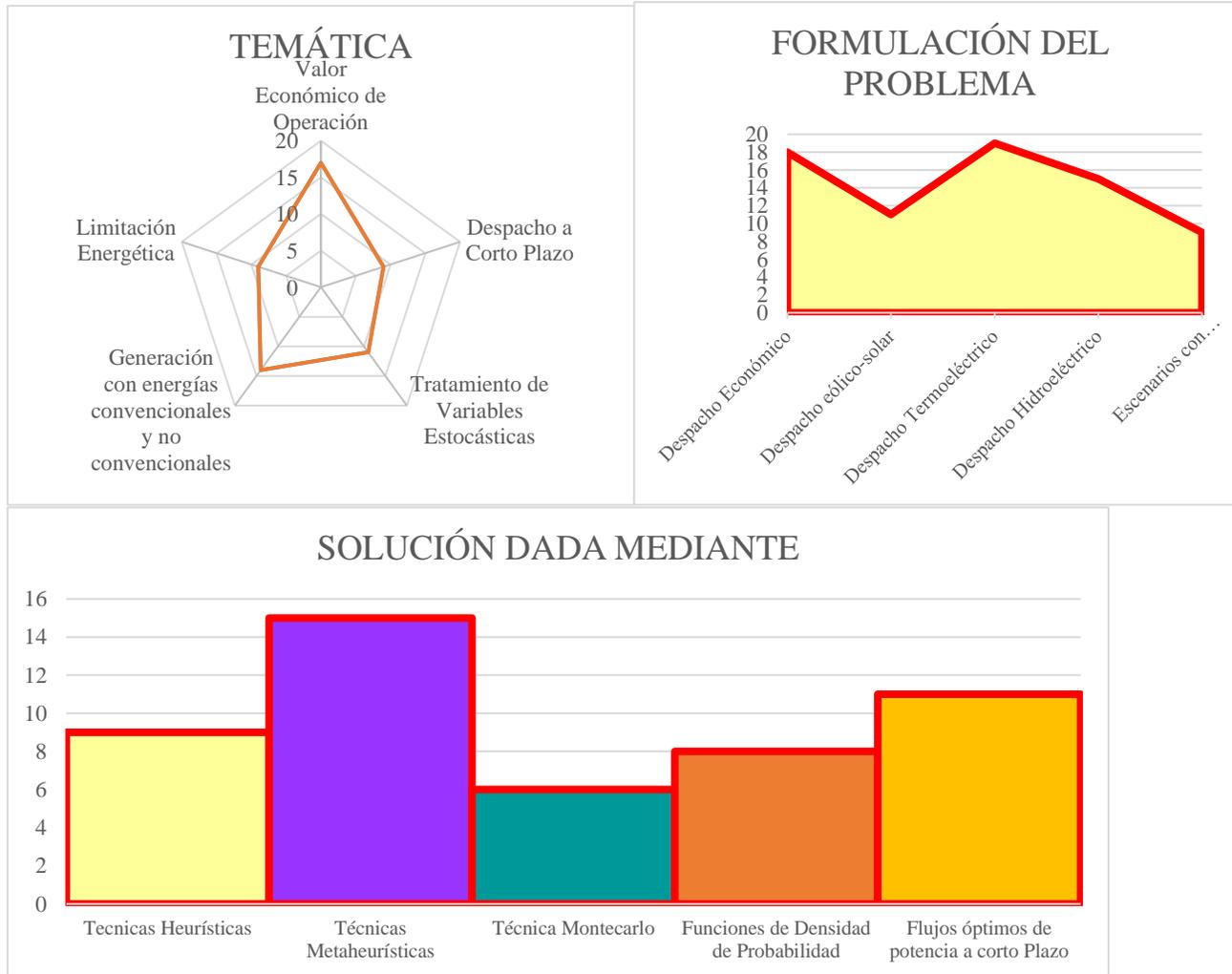
- de potencia considerando estabilidad transitoria,” *Rev. Tecnura*, vol. 21, no. 51, p. 27, 2017, doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a02.
- [31] S. Banerjee, K. Dasgupta, and C. K. Chanda, “Short term hydro–wind–thermal scheduling based on particle swarm optimization technique,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 81, pp. 275–288, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.IJEPES.2016.01.031.
- [32] S. Sharma, S. Mehta, and N. Chopra, “Economic Load Dispatch Using Grey Wolf Optimization,” *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 5, no. 4, pp. 128–132, 2015, [Online]. Available: www.ijera.com
- [33] L. I. Wong, M. H. Sulaiman, M. R. Mohamed, and M. S. Hong, “Grey Wolf Optimizer for solving economic dispatch problems,” *Conf. Proceeding - 2014 IEEE Int. Conf. Power Energy, PECon 2014*, pp. 150–154, 2014, doi: 10.1109/PECON.2014.7062431.

8.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 13: Matriz de estado del arte.

DESPACHO ECONÓMICO EN SISTEMAS ELÉCTRICOS CON GENERACIÓN HÍBRIDA A TRAVÉS DEL ALGORITMO DE EVOLUCIÓN DIFERENCIAL SUPONIENDO ESCENARIOS DE LIMITACIÓN ENERGÉTICA																								
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN			SOLUCIÓN DE PROPUESTA					
				Valor Económico de Operación	Despacho a Corto Plazo	Tratamiento de Variables Estocásticas	Generación con energías convencionales	Limitación Energética	Despacho Económico	Despacho eólico-solar	Despacho Termoeléctrico	Despacho Hidroeléctrico	Escenarios con Limitación de Generación	Comportamiento estocástico de los	Balance de Potencia	Límites de generación	Función objetivo	Evolución Diferencial	Algoritmo Cultural	Grey Wolf	PSO	Técnicas Heurísticas	Técnicas Metaheurísticas	Técnica Montecarlo
1	2019	Despacho Económico del Sistema Híbrido de las Islas Santa Cruz y Baltra Incorporando la Aleatoriedad de Potencia de los Sistemas Eólico y Solar Fotovoltaico	4	☒	☒				☒				☒									☒	☒	
2	2024	Evaluación de un modelo de optimización no lineal para el despacho económico de microrredes aisladas	0	☒				☒	☒	☒	☒		☒			☒	☒							
3	2014	Despacho Economico Hidrotermico Multibalse Multinodal de Corto Plazo. Estado del Arte de los Metodos de Optimizacion	4		☒			☒	☒		☒			☒	☒	☒				☒	☒			
4	2021	Evaluación mediante indicadores clave de rendimiento del despacho económico hidrotérmico resuelto por medio de técnicas heurísticas	0	☒	☒	☒			☒		☒			☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒			☒
5	2021	Despacho Económico En Sistemas Eléctricos De Potencia Considerando El Comportamiento Estocástico De Centrales De Generación a Base De Energías Renovables No Convencionales	2			☒	☒		☒	☒		☒	☒							☒				☒
6	2020	Despacho económico de generación hidroeléctrica y termoeléctrica usando programación dinámica	3	☒		☒			☒		☒			☒	☒	☒								
7	2015	Optimal allocation of stochastically dependent renewable energy based distributed generators in unbalanced distribution networks	114			☒	☒			☒				☒		☒								

8.2 Resumen de Indicadores



9 Anexos

Tabla 14. Coeficientes y límites operativos de las hidroeléctricas para el caso 1

HIDROELÉCTRICA	C1	C2	C3	C4	C5	C6	P_{max}	P_{min}
1	-0.004	-0.4	0.035	0.85	12	-50	100	0
2	-0.0045	-0.31	0.017	1.16	9.6	-75	100	0
3	-0.0013	-0.31	0.015	0.5	5	-45	100	0
4	-0.0035	-0.32	0.022	1.5	13.5	-85	100	0

Tabla 15. Coeficientes y límites operativos de las termoeléctricas para el caso 1

TERMOELÉCTRICA	A	B	C	E	F	P_{max}	P_{min}
1	800	17	0.0005	855	0.079	500	110
2	900	15.1	0.00078	559	0.091	450	135
3	715	14	0.0006	484	0.071	400	50
4	475	15.1	0.00065	315	0.061	400	65
5	300	15.5	0.0008	140	0.044	350	70

Tabla 16. Entradas de agua natural en el caso 1 para cada subperiodo de optimización

HORA	RESERVORIOS			
	1	2	3	4
1	2	1.5	1.2	0.5
2	1.8	1.2	1.0	0.4
3	1.5	1.1	0.8	0.3
4	1.4	1	0.7	0.2
5	1.3	1	0.6	0.1
6	1.2	0.9	0.5	0.1
7	1.1	0.8	0.4	0
8	1	0.7	0.3	0
9	0.9	0.7	0.3	0
10	0.8	0.6	0.2	0
11	0.7	0.5	0.1	0
12	0.8	0.6	0.2	0
13	0.9	0.7	0.3	0
14	1	0.8	0.4	0
15	1.1	0.9	0.5	0
16	1.2	1	0.6	0.1
17	1.3	1.1	0.7	0.1
18	1.4	1.2	0.8	0.2
19	1.5	1.3	0.9	0.3
20	1.6	1.4	1	0.4
21	1.7	1.5	1.1	0.5
22	1.8	1.6	1.2	0.5
23	1.9	1.7	1.3	0.6
24	2	1.8	1.4	0.7

Tabla 17. Condiciones iniciales y finales de los reservorios, volúmenes máximos y mínimos de agua y límites de los caudales para las hidroeléctricas en el caso 1

$V_{inicial}$	V_{final}	V_{min}	V_{max}	Q_{min}	Q_{max}
90	85	60	100	2	6
70	65	50	80	2	6
120	110	80	140	5	10
100	90	70	100	3	7

Tabla 18. Coeficientes y límites operativos de las hidroeléctricas para el caso 2

HIDROELÉCTRICA	C1	C2	C3	C4	C5	C6	P_{max}	P_{min}
1	-0.004	-0.4	0.035	0.85	12	-50	500	400
2	-0.0045	-0.31	0.017	1.16	9.6	-75	500	400
3	-0.0013	-0.31	0.015	0.5	5	-45	500	400
4	-0.0035	-0.32	0.022	1.5	13.5	-85	500	400

Tabla 19. Coeficientes y límites operativos de las termoeléctricas para el caso 2

TERMOELÉCTRICA	A	B	C	E	F	P_{max}	P_{min}
1	800	17	0.0005	855	0.079	500	0
2	900	15.1	0.00078	559	0.091	450	0
3	715	14	0.0006	484	0.071	400	0
4	475	15.1	0.00065	315	0.061	400	0
5	300	15.5	0.0008	140	0.044	350	0

Tabla 20. Entradas de agua natural en el caso 2 para cada subperiodo de optimización

HORA	RESERVORIOS			
	1	2	3	4
1	10	8.2	8.1	2.8
2	9.1	8	8.2	2.4
3	8	9	4	1.9
4	7	9	2	0
5	6	8	4	0
6	7	7	3	0
7	8	6	3	0
8	9	7	2	0
9	10	8	1	0
10	11	9	1	0
11	12	9	1	0
12	10	8	2	0
13	11	8	3	0
14	12	9	3	0
15	11	9	4	0
16	10	8	2	0
17	9	7	2	0
18	8	6	2	0

19	7	7	1	0
20	6	8	1	0
21	7	9	2	0
22	8	9	2	0
23	9	8	1	0
24	10	9	0	0

Tabla 21. Condiciones iniciales y finales de los reservorios, volúmenes máximos y mínimos de agua y límites de los caudales para las hidroeléctricas en el caso 2

$V_{inicial}$	V_{final}	V_{min}	V_{max}	Q_{min}	Q_{max}
140	135	80	150	10	15
100	115	60	120	10	15
200	180	100	240	15	30
150	130	70	160	10	20

Tabla 22. Parámetros de las centrales solares fotovoltaicas

Potencia nominal de cada módulo	Coefficiente de temperatura	Paneles paralelo	en Paneles serie	en	Número de centrales fotovoltaicas
165 [W]	0.000044 [%/°C]	20	7000		6

Tabla 23. Parámetros del parque eólico

Densidad del aire	Radio	Potencia nominal de la turbina	Número de turbinas
1.2 [kg/m ³]	60 [m]	5 [MW]	250