

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

UNIDAD DE POSGRADO



TESIS

**INTEGRACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CON BATERÍAS
EN PARQUES EÓLICOS Y FOTOVOLTAICOS PARA MEJORAR EL
DESPACHO ECONÓMICO EN ESCENARIOS DE ALTA GENERACIÓN
EÓLICA Y SOLAR**

**PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS
CON MENCIÓN EN ENERGÉTICA**

ELABORADO POR:

NILTON ROOSEVELT CHINCHA ALVA

ASESOR

Mg. ROBERTO TAMAYO PEREYRA

LIMA, PERÚ

2024

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a mis padres, esposa e hijo primogénito Fabiano por su apoyo y motivación que me brindan día con día para alcanzar nuevas metas profesionales y personales.

Nilton Chinchá A.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi asesor, al Ing. Roberto Tamayo Pereyra, por su orientación y sugerencias para la culminación de mi tesis.

Nilton Chincha A.

En memoria a mi compañero de cuatro patas "Theto" por sus largas horas de compañía en este proceso de investigación.

Nilton Chinchá A.

RESUMEN

Actualmente, los sistemas de almacenamiento con baterías o BESS – *por sus siglas en inglés “Battery Storage System”* – vienen siendo implementados a gran escala en varios países de Europa, Asia, Oceanía y últimamente en Latinoamérica (“LATAM”) para solucionar diferentes problemáticas que se presentan en las actividades que conforman el sector eléctrico (generación, transmisión, distribución y comercialización) y a la vez impulsar el desarrollo de la transición energética, motivando estudios y discusión sobre los impactos positivos y/o negativos en la cadena de valor del sector eléctrico, y los potenciales cambios normativos necesarios para su implementación, como por ejemplo, utilizar los BESS integrado a los parques eólicos y fotovoltaicos – *en escenarios de alta inserción de energía renovable variable (ERV) al sistema eléctrico* – para mejorar mediante una gestión eficiente el recurso primario (eólico y solar) en la producción de electricidad, impactando indirectamente en la minimización del costo de operación del sistema en el despacho económico y en las emisiones de gases de efectos invernadero al desplazar generación convencional que utiliza recurso no renovables. Además de mejorar la flexibilidad de la operación del sistema eléctrico. Por lo que, La integración de los BESS en parques eólicos y fotovoltaico es considerado – *en varios países avanzados en desarrollo de energía renovables* – como una de las formas más sofisticadas de almacenar energía renovable tanto a nivel de grandes plantas de generación de electricidad como al nivel de consumidor particular.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo cuantificar el impacto de mejorar el despacho económico en la gestión eficiente de los recursos eólico y solar en la producción de electricidad, mediante la integración de los sistemas de almacenamiento con baterías a los parques eólicos y fotovoltaicos en un escenario de alta inserción de ERV (eólica y solar) en un sistema eléctrico multinodal, teniendo como características de operación en algunas etapas de tiempo del periodo de análisis, que la oferta de ERV supera a la demanda eléctrica.

Para lograr el objetivo, se revisó y analizó diferentes fuentes de información tales como artículos científicos publicados en revistas indexadas, tesis de maestrías, tesis

doctorales y videos de grabaciones de congresos y seminarios internacionales que están relacionadas con el presente trabajo de investigación. Esta información permite argumentar y sustentar el impacto de integrar los sistemas de almacenamiento con baterías en los parques eólicos y fotovoltaicos para mejorar el despacho económico en los sistemas eléctricos en escenarios de alta inserción de ERV. Cabe indicar que, la implementación del modelo matemático desarrollado en la presente investigación, se ha realizado en el compilador del software GAMS (General Algebraic Modeling System) el cual resolverá un problema de optimización de despacho económico de tipo No Lineal (PNL), mediante el solver “CONPOT” que viene como parte de las licencias habilitadas en el software.

El desarrollo de la formulación matemática que representa el modelamiento de la integración de sistemas de almacenamiento en parques eólicos y/o fotovoltaicos y su implementación como parte de las ecuaciones y restricciones en un modelo matemático de optimización de despacho económico, implica que los BESS gestionarán de manera eficiente la ERV generada en momentos de alta producción, almacenando el excedente (proceso de carga de la BESS) y liberándolo cuando sea necesario (proceso de descarga de la BESS). Esto permite evitar depender de fuentes de energía más costosas (que utilizan combustibles fósiles) y desaprovechar el recurso eólico y solar en la gestión eficiente de la ERV; logrando de manera indirecta la reducción del costo total de generación eléctrica y los gases de efecto invernadero de CO₂ provocado por el uso de fuentes fósiles en la producción de electricidad. Cabe indicar que, el modelamiento de los BESS para su proceso de carga utiliza la propia generación de los parques eólicos y/o fotovoltaicos, no considerando el retiro de potencia activa de la red del sistema eléctrico. Asimismo, precisar que los Costos de Inversión (CI) y de Operación y Mantenimiento (OyM) de los BESS, no han sido considerados como parte de la función objetivo, parámetros, variables de decisión y/o restricciones; dado que el modelo matemático de optimización de despacho económico tiene como objetivo optimizar los costos operativos generados en la producción de electricidad y no los CI y OyM de los activos de generación y BESS que participan en el despacho económico.

Se han realizado tres casos de estudio con diferentes escenarios de perfil de generación de Energía Renovable Variable (ERV) – 70% eólica y 30% fotovoltaica, 100% eólica y 100% fotovoltaica – teniendo en común que en cada caso la producción de ERV generada para el sistema eléctrico es la misma. Asimismo, la configuración del sistema eléctrico es Multinodal con seis barras, 11 líneas de transmisión, tres centrales térmicas, una central hidroeléctrica con embalse, parque eólico y/o fotovoltaico, evaluando en cada caso los escenarios SIN y CON sistemas de almacenamiento con baterías (BESS).

Los resultados obtenidos han permitido cuantificar y analizar que la integración de los sistemas de almacenamiento con baterías a los parques eólicos y solares, mejora la gestión de la ERV en el despacho económico del sistema eléctrico resultando en escenarios de alta generación eólica y solar. Para ello, se ha cuantificado el ahorro y beneficio sobre los costos de operación del sistema eléctrico y la matriz de electricidad, considerando escenarios SIN y CON sistemas de almacenamiento con baterías (BESS) para cuatro casos de estudio.

Finalmente, la presente investigación se considera una contribución para cuantificar los impactos de las BESS en el aprovechamiento y gestión eficiente del recurso eólico y solar, vista desde la mejora del despacho económico de corto plazo al integrar las BESS a los parques eólicos y/o fotovoltaicos en escenarios de alta generación de ERV, situación que actualmente se vienen presentando en países de Europa y algunos de LATAM.

Palabras Claves: Sistemas de almacenamiento con Baterías (BESS), Parques eólicos y fotovoltaicos, Costos de operación del sistema, Despacho económico, Matriz de Electricidad, Multinodal, GAMS, CONOPT.

ABSTRACT

Currently, Battery Energy Storage Systems (BESS) are being implemented on a large scale in various countries across Europe, Asia, Oceania, and recently in Latin America (LATAM) to address different challenges in the activities that make up the electricity sector (generation, transmission, distribution, and commercialization) while also promoting the development of the energy transition. This has sparked studies and discussions on the positive and/or negative impacts on the value chain of the electricity sector, as well as the potential regulatory changes needed for its implementation. For instance, BESS can be integrated with wind and photovoltaic parks in scenarios of high penetration of variable renewable energy (VRE) into the electricity system, improving the efficient management of primary resources (wind and solar) in electricity production. This can indirectly impact the reduction of system operating costs in economic dispatch and reduce greenhouse gas emissions by displacing conventional generation that uses non-renewable resources. Moreover, it enhances the operational flexibility of the electrical system. Therefore, the integration of BESS into wind and photovoltaic parks is considered—by several countries advanced in renewable energy development—as one of the most sophisticated ways to store renewable energy, both at large-scale electricity generation plants and at the individual consumer level.

The objective of this research is to quantify the impact of improving economic dispatch in the efficient management of wind and solar resources for electricity production through the integration of battery energy storage systems into wind and photovoltaic parks in a scenario of high VRE penetration (wind and solar) in a multi-node electrical system. A characteristic of operation in some time stages during the analysis period is that the VRE supply exceeds the electricity demand.

To achieve the objective, various sources of information were reviewed and analyzed, including scientific articles published in indexed journals, master's theses, doctoral dissertations, and recordings of international conferences and seminars related to this research. This information supports the argument and rationale behind the impact of integrating battery energy storage systems into wind and photovoltaic parks to improve

economic dispatch in electrical systems in scenarios of high VRE penetration. It is worth noting that the mathematical model developed in this research was implemented using the GAMS (General Algebraic Modeling System) software, which will solve a nonlinear economic dispatch optimization problem (NLP) using the “CONOPT” solver, included in the licensed software package.

The development of the mathematical formulation representing the modeling of the integration of storage systems into wind and/or photovoltaic parks and its implementation as part of the equations and constraints in an economic dispatch optimization model means that BESS will efficiently manage the VRE generated during periods of high production, storing the surplus (BESS charging process) and releasing it when needed (BESS discharging process). This avoids relying on more expensive energy sources (those using fossil fuels) and wasting wind and solar resources in VRE management, indirectly reducing total electricity generation costs and CO₂ greenhouse gas emissions caused by the use of fossil fuels in electricity production. It should be noted that the BESS charging process modeling uses the generation from the wind and/or photovoltaic parks themselves, without considering the withdrawal of active power from the electrical system grid. Furthermore, the Investment Costs (CI) and Operation and Maintenance (O&M) Costs of BESS have not been considered as part of the objective function, parameters, decision variables, and/or constraints, as the objective of the economic dispatch optimization model is to optimize the operational costs generated in electricity production, not the CI and O&M costs of generation assets and BESS participating in the economic dispatch.

Three case studies were carried out with different Variable Renewable Energy (VRE) generation profile scenarios—70% wind and 30% photovoltaic, 100% wind, and 100% photovoltaic—with the common factor that the VRE production for the electrical system is the same in each case. Additionally, the electrical system configuration is multi-node with six buses, 11 transmission lines, three thermal power plants, a hydroelectric power plant with a reservoir, wind and/or photovoltaic parks, evaluating in each case the scenarios WITHOUT and WITH battery storage systems (BESS).

The results obtained have allowed us to quantify and analyze that the integration of battery storage systems into wind and solar parks improves the VRE management in the economic dispatch of the electrical system, resulting in scenarios of high wind and solar generation. The savings and benefits on the operating costs of the electrical system and the electricity matrix have been quantified, considering scenarios WITHOUT and WITH BESS for four case studies.

Finally, this research is considered a contribution to quantifying the impacts of BESS in the efficient utilization and management of wind and solar resources, as seen from the perspective of improving short-term economic dispatch by integrating BESS into wind and/or photovoltaic parks in scenarios of high VRE generation, a situation currently occurring in European countries and some in LATAM.

Keywords: Battery Storage Systems (BESS), Wind and Photovoltaic Parks, System Operating Costs, Economic Dispatch, Electricity Matrix, Multi-Nodal, GAMS, CONOPT.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	V
ABSTRACT.....	VIII
INTRODUCCIÓN	XVII
CAPÍTULO I.: ASPECTOS GENERALES Y METODOLÓGICOS DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.2. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE ESTUDIO	6
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	11
1.3.1. PROBLEMA PRINCIPAL	11
1.3.1.1. PROBLEMAS SECUNDARIOS.....	11
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	11
1.5. OBJETIVOS.....	13
1.5.1. OBJETIVO PRINCIPAL	13
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.6. HIPÓTESIS.....	14
1.6.1. HIPÓTESIS GENERAL	14
1.6.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	14
1.7. VARIABLES, DIMENSIONES, INDICADORES Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	14
1.8. UNIDAD DE ANÁLISIS	16
1.9. FUENTES DE INFORMACIÓN E INSTRUMENTOS UTILIZADOS	16
1.10. TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.10.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	17
1.10.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	17
1.11. MÉTODO DE DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
1.12. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	18
1.13. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS	18
CAPÍTULO II.: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	19
2.1 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	19
2.1.1 TECNOLOGÍA DE ALMACENAMIENTO PARA REDES ELÉCTRICAS	21
2.1.2 APLICACIONES DE UN BESS EN LAS REDES ELÉCTRICAS.....	25
2.1.3 DESPACHO ECONÓMICO.....	27

2.1.4	MODELO DE COSTOS DE LAS UNIDADES TERMOELÉCTRICAS.....	29
2.1.5	COORDINACIÓN HIDROTÉRMICA.....	30
2.1.6	MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN	31
2.1.6.1	PROGRAMACIÓN LINEAL	31
2.1.6.2	PROGRAMACIÓN NO LINEAL.....	31
2.1.6.3	PROGRAMACIÓN DINÁMICA	34
2.2	MARCO CONCEPTUAL	35
2.2.1	SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CON BATERÍAS.....	35
2.2.2	INTEGRACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE	36
2.2.3	PARQUES EÓLICOS Y FOTOVOLTAICOS	36
2.2.4	MEJORA EN EL DESPACHO ECONÓMICO	36
2.2.5	ENERGÍA EÓLICA Y SOLAR	37
2.2.6	MATRIZ DE ELECTRICIDAD.....	37
CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN		38
3.1	CASOS DE ANÁLISIS	38
3.2	PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELAMIENTO.....	39
3.2.1	DEMANDA ELÉCTRICA HORARIA	40
3.2.2	PARQUE GENERADOR.....	41
3.3	CONFIGURACIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS EN EL MODELAMIENTO.....	45
3.4	FORMULACIÓN DE LAS ECUACIONES Y RESTRICCIONES DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CON BATERÍAS Y SU INTEGRACIÓN CON LOS PARQUES EÓLICOS Y FOTOVOLTAICOS	49
3.4.1	ECUACIÓN DEL ESTADO DE CARGA DE UNA BESS.....	50
3.4.2	RESTRICCIONES ASOCIADAS A LA POTENCIA DE CARGA Y DESCARGA DE LAS BESS.....	50
3.4.3	ECUACIÓN QUE INTEGRA LA BESS CON LOS PARQUES EÓLICOS Y FOTOVOLTAICOS	51
3.5	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELAMIENTO DE LAS BESS EN EL MODELO DE DESPACHO ECONÓMICO	53
3.5.1	ECUACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO	53
3.5.2	ECUACIONES Y RESTRICCIONES DE LOS LÍMITES ASOCIADOS AL PARQUE GENERADOR.....	54
3.5.3	ECUACIÓN DE BALANCE NODAL.....	55

3.5.4	DIAGRAMA DE FLUJO	56
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE LA HISPÓTESIS		57
4.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	57
4.1.1	CASO 1	57
4.1.2	CASO 2	62
4.1.3	CASO 3	66
4.2	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	70
4.3	CONTRASTACIÓN DE LAS HIPÓTESIS FORMULADAS	71
CONCLUSIONES		81
RECOMENDACIONES		83
REFERENCIAS		85
ANEXOS		87

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 MATRIZ DE ELECTRICIDAD, PERÚ, 2023.	7
FIGURA 2.1. FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CON BATERÍA	22
FIGURA 2.2. COMPONENTE DE UN BESS	23
FIGURA 2.3. <i>FUNCIONAMIENTO DE UNA BATERÍA DE ION-LITIO</i>	24
FIGURA 3.1. DEMANDA ELÉCTRICA HORARIA	41
FIGURA 3.2. <i>PRODUCCIÓN DEL PARQUE EÓLICO HORARIO</i>	43
FIGURA 3.3. PRODUCCIÓN DEL PARQUE FOTOVOLTAICO HORARIO	44
FIGURA 3.4. CASO 1: SIN BESS Y CON BESS	46
FIGURA 3.5. CASO 2: SIN BESS Y CON BESS	47
FIGURA 3.6. CASO 3: SIN BESS Y CON BESS	48
FIGURA 3.7. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CON BATERÍA INTEGRADOS AL PARQUE EÓLICO Y/O FOTOVOLTAICO	52
FIGURA 4.1. CASO 1: RESULTADOS DEL DESPACHO ECONÓMICO SIN BESS	58
FIGURA 4.2. CASO 1: RESULTADOS DEL DESPACHO ECONÓMICO CON BESS.....	60
FIGURA 4.3. CASO 1: RESULTADOS DEL COSTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA: SIN Y CON BESS	61
FIGURA 4.4. CASO 1: MATRIZ DE ELECTRICIDAD	61
FIGURA 4.5. CASO 2: RESULTADOS DEL DESPACHO ECONÓMICO SIN BESS	62
FIGURA 4.6. CASO 2: RESULTADOS DEL DESPACHO ECONÓMICO CON BESS	64
FIGURA 4.7. CASO 2: RESULTADOS DEL COSTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA: SIN Y CON BESS	65
FIGURA 4.8. CASO 2: MATRIZ DE ELECTRICIDAD	66
FIGURA 4.9. CASO 3: RESULTADOS DEL DESPACHO ECONÓMICO SIN BESS	67
FIGURA 4.10. CASO 3: RESULTADOS DEL DESPACHO ECONÓMICO CON BESS.....	68
FIGURA 4.11. CASO 3: RESULTADOS DEL COSTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA: SIN Y CON BESS	69
FIGURA 4.12. CASO 3: MATRIZ DE ELECTRICIDAD	70
FIGURA 4.13. CASO 1: RESULTADOS DEL DESPACHO ECONÓMICO SIN BESS	72
FIGURA 4.14. CASO 1: RESULTADOS DEL DESPACHO ECONÓMICO CON BESS	73

FIGURA 4.15. CASO 2: RESULTADOS DEL DESPACHO ECONÓMICO SIN BESS	74
FIGURA 4.16. CASO 2: RESULTADOS DEL DESPACHO ECONÓMICO CON BESS	74
FIGURA 4.17. CASO3: RESULTADOS DEL DESPACHO ECONÓMICO SIN BESS	75
FIGURA 4.18. CASO 3: RESULTADOS DEL DESPACHO ECONÓMICO CON BESS	76
FIGURA 4.19. CASO 1: RESULTADOS DEL COSTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA: SIN Y CON BESS	77
FIGURA 4.20. CASO 3: RESULTADOS DEL COSTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA: SIN Y CON BESS	78
FIGURA 4.21. CASO 1: MATRIZ DE ELECTRICIDAD	79
FIGURA 4.22. CASO 2: MATRIZ DE ELECTRICIDAD	79
FIGURA 4.23. CASO 3: MATRIZ DE ELECTRICIDAD	80

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	15
TABLA 2.1.	TIPOS DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.....	19
TABLA 2.2.	CARACTERÍSTICA ECONÓMICA DE LOS TIPOS DE BESS	25
TABLA 2.3.	CARACTERÍSTICA TÉCNICA DE LAS BESS	25
TABLA 2.4.	APLICACIONES DE UN BESS EN REDES ELÉCTRICAS.....	26
TABLA 3.1.	CASOS DE ESTUDIOS	39
TABLA 3.2.	DEMANDA ELÉCTRICA HORARIA – POTENCIA	40
TABLA 3.3.	PARÁMETROS DE ENTRADA DE LA FUNCIÓN DE COSTOS DE LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS	41
TABLA 3.4.	PARÁMETROS DE ENTRADA DE LA CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	42
TABLA 3.5.	PARÁMETROS DE ENTRADA Y PRODUCCIÓN HORARIA DEL PARQUE EÓLICO.....	42
TABLA 3.6.	PARÁMETROS DE ENTRADA Y PRODUCCIÓN HORARIA DEL PARQUE FOTOVOLTAICO.....	43
TABLA 3.7.	PARÁMETROS DE ENTRADA PARA EL MODELAMIENTO –BESS	45

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación desarrolla la integración de los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos para mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación renovable (eólico y solar). Cabe indicar que, actualmente el operador del sistema peruano, en su modelo de despacho de corto plazo (“Modelo Yupana”) no tiene incorporado los sistemas de almacenamiento con baterías (BESS) y ello se debe a que actualmente en nuestro país no tenemos normativa para el uso de esta tecnología en el despacho económico. Además, no presentamos un escenario de alta inserción de ERV en la operación de nuestro mercado eléctrico peruano, teniendo actualmente 5,7% de participación de ERV en la matriz de electricidad al año 2023.

En tal sentido, lo que se pretende con la presente investigación es cuantificar los impactos y beneficios al sistema eléctrico de mejorar el despacho económico y el uso de los recursos eólico y solar en la matriz de electricidad integrando sistemas de almacenamiento con baterías a los parques eólicos y fotovoltaicos, en un escenario de alta inserción de ERV, escenario factible a ser alcanzado en el Perú debido al gran potencial de recurso eólico y solar que se dispone, pero que lamentablemente, al día de hoy, no hay mecanismo que se encuentren en ejecución para impulsar y fomentar el desarrollo de la inversión privada en la ejecución de nuevos proyectos de parques eólico y fotovoltaicos. Sin embargo, a octubre de 2024 se tiene conocimiento sobre una cartera de proyectos de generación de parques eólicos y fotovoltaicos, elaborados por desarrolladores de proyectos, que cuentan con Estudio de Operatividad (EO) y otros con Estudios de Preoperatividad (EPO), lo que refleja un gran interés en el desarrollo e implementación de proyectos de ERV en nuestro país, tal es así que al mes de setiembre de 2024 se tiene ha tenido una participación de 11,2% de generación ERV (eólica y solar) en la matriz de electricidad.

El trabajo de investigación desarrollado en la presente tesis, está dividido en cuatro capítulos, que a continuación se detallan:

En el capítulo 1, denominado “Aspectos Generales y metodológicos de la Investigación”, presenta los antecedentes, el planteamiento y la formulación del problema. Se justifica la importancia de la investigación, y, además, se establecen los objetivos, junto con la operacionalización de las variables. También se presenta el tipo y nivel de investigación, así como el método de diseño de la investigación. Por último, se detallan las técnicas y el análisis de procesamiento de datos.

El capítulo 2, denominado “Marco Teórico y Conceptual”, presenta los fundamentos conceptuales necesarios que desarrollan y fundamentan el tema de investigación, que incluye la definición y objetivo de un despacho económico en un sistema eléctrico, el uso de los sistemas de almacenamiento con baterías en el sistema eléctrico, modelamiento de los costos de una central termoeléctrica y los tipos de programación para la optimización de un problema.

El capítulo 3, denominado “Formulación matemática de las ecuaciones y desarrollo del modelo de optimización”, donde se aborda la formulación matemática, ecuaciones y restricciones utilizada en el modelamiento para mejorar el despacho económico y el uso de los recursos eólico y solar en la matriz de electricidad integrando sistemas de almacenamiento con baterías a los parques eólicos y fotovoltaicos. Cabe destacar, que los Costos de Inversión (CI) y de Operación y Mantenimiento (OyM) de los BESS, no han sido considerados como parte de la función objetivo, parámetros, variables de decisión y/o restricciones, dado que el modelo matemático de optimización de despacho económico tiene como objetivo optimizar los costos operativos generados en la producción de electricidad y no los CI y OyM de los activos de generación y BESS que participan en el despacho económico.

El capítulo 4, denominado “Discusión de los Resultados y Contrastación de la Hipótesis”, describe los cuatro casos de estudio que permitirán analizar y cuantificar los impactos de los BESS integrados a parques eólicos y/o fotovoltaicos en la mejora del despacho económico en escenarios de alta generación de ERV, realizando con esto la contrastación de las hipótesis. Asimismo, se realiza la comparación de los resultados de los cuatro casos considerando en cada uno de ellos, los escenarios CON y SIN sistemas de almacenamiento

con baterías y como ello impacta de manera indirecta en el costo de operación del sistema y de manera directa en la matriz de electricidad.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones que se derivan del presente trabajo de investigación.

CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES Y METODOLÓGICOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes de la Investigación

La presente investigación se desarrolla en el marco de mejorar la gestión eficiente de los recursos de la ERV para la generación de electricidad incorporando para ello el modelamiento de sistemas de almacenamiento con Baterías (BESS) integrados a parques eólicos y fotovoltaicos y su implementación como parte de las ecuaciones y restricciones en un modelo matemático de optimización de despacho económico, que se fundamenta y desarrolla en la teoría marginalista – *que actualmente rige el mercado de corto plazo del Mercado Mayorista Eléctrico Peruano* – así como en otros países.

El desarrollo e implementación del modelo matemático de optimización de despacho económico en la presente investigación, tiene como finalidad optimizar la función objetivo de minimizar el costo de operación del sistema eléctrico como resultado de encontrar los valores de las variables de decisión que permita tener una solución óptima global factible – *que a la vez atienda a la demanda eléctrica y cumpla con las restricciones técnicas y operativas* – y analizar como los BESS impactan de manera indirecta en el costo de operación y de manera directa en la gestión de los recursos de la ERV para la generación de electricidad.

A. Castillejo-Cuberos et al. (2023)¹, proponen analizar diferentes configuraciones de plantas fotovoltaicas con baterías operando bajo un algoritmo de optimización de despacho que considera pronósticos de potencia operativa, información de precios de mercado y una serie de restricciones para mejorar su acoplamiento con las redes eléctricas. Además, el sistema de batería se modela considerando los fenómenos eléctricos, térmicos y de degradación que ocurren durante su ciclo de vida, además de

¹ A. Castillejo, Cardemil J.M., Escobar R. (2023). “Techno-economic assessment of photovoltaic plants considering high temporal resolution and non-linear dynamics of battery storage. (Artículo Científico). Elsevier B.V. - ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120712>

considerar una eficiencia de carga/descarga variable y se simula a alta resolución temporal para tener en cuenta cualquier dinámica no lineal subhoraria.

Los resultados de su investigación, conllevaron a que, considerar pasos de tiempo superiores a 30 minutos para la simulación de la batería durante el envío, puede generar diferencias notables en los indicadores clave de rendimiento en comparación con casos de un minuto y se descubrió que 10 minutos ofrecían el mejor compromiso en precisión y costo computacional. Además, se descubrió que, dependiendo de su diseño, las tasas de degradación anual efectiva de las baterías son muy variables y pueden alcanzar valores que se desvían sustancialmente de los supuestos constantes comúnmente utilizados, lo que demuestra el valor de los modelos de degradación para la evaluación del ciclo de vida

Finalmente, de la investigación, Castillejo observó que se podían obtener configuraciones de planta adecuadas para modos operativos específicos, como suavizado y reducción de picos, analizando sus características de despacho bajo el algoritmo de optimización de despacho, en lugar de seguir el enfoque habitual de configurar el modo operativo y ajustar la planta para ello. Este hallazgo sugiere que una filosofía de diseño que adapte el diseño de la planta a la dinámica del mercado podría ser muy adecuada para sistemas eléctricos en los que ningún agente central determina la expansión del sistema.

S. Chen et. (2021)² , propone un modelo avanzado de planificación para la expansión de sistemas de almacenamiento de energía integrados con la generación de energías renovables. Este modelo está diseñado para analizar el impacto de los sistemas de almacenamiento en la integración eficiente de fuentes renovables, destacando la necesidad de aumentar la flexibilidad del sistema eléctrico debido a la naturaleza variable de estas fuentes de energía. El modelo incorpora una alta resolución temporal y detalles operativos tanto de las unidades de generación como de los sistemas de almacenamiento, optimizando el despacho económico. Además, tiene como objetivo la reducción de los

² Siyuan Ch., Zheng L., Weiqui L. (2021). Integrating high share of renewable energy into power system using customer-sited energy storage. (Artículo Científico). Elsevier B.V. - ScienceDirect .
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110893>

costos del sistema eléctrico, proporcionando una solución integral y eficiente para la integración de energías renovables en la red eléctrica.

Para la evaluación del modelo se consideró como caso de estudio la provincia china de Sichuan por sus abundantes recursos renovables y su creciente cuota de energía renovables en el sistema eléctrico, dando como resultado, tres importantes aportes: 1) el almacenamiento de energía podría sustituir parcialmente a las centrales eléctricas de carbón y aportar flexibilidad para integrar una elevada cuota de energía renovables en el sistema eléctrico; 2) las emisiones de CO₂ pueden reducirse significativamente a un coste de 30 dólares por tonelada; 3) los beneficios obtenidos por los sistemas de almacenamiento de energía no cubre el coste actual del almacenamiento de energía; por lo que para potenciar el desarrollo de los sistemas de almacenamiento de energía es necesario que se siga reduciendo los costes de almacenamiento mediante la mejora de tecnologías y el apoyo de políticas de Estado.

Finalmente, la investigación concluye que, debe mejorarse el mecanismo del mercado de electricidad, el cual debe añadir incentivos a los sistemas de almacenamiento de energía; tales como, aumentar las diferencias de los precios de energía en punta y valle, así como aumentar el precio por potencia en la tarifa eléctrica.

Kumar (2020)³, estudia que una opción viable para suministrar electricidad en conexiones de redes aisladas, es implementar un sistema híbrido de energía renovable integrado a una configuración de sistemas de baterías, basándose su caso de estudio en tres tipos de tecnología de baterías como plomo-ácido (PA), Ion-Litio y níquel-hierro (Ni-Fe).

En su investigación, Kumar utilizó algoritmos metaheurísticos en Matlab, donde determinó la mejor configuración global.

³ Polamarasetty P. Kumar, Rajeshwer P. (2020). "Optimization of an off-grid integrated hybrid renewable energy system with different battery technologies for rural electrification in India". (Artículo Científico). Elsevier B.V. - ScienceDirect . <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101912>

Carlos (2018)⁴, propone valorar la viabilidad técnica y económica de incorporar un sistema de baterías de ion-litio a una central fotovoltaica dentro del sistema eléctrico chileno. En su estudio, analizó 30 configuraciones diferentes de baterías para su integración en una planta fotovoltaica, considerando variaciones en la demanda, costos de inversión y propuestas regulatorias.

Se concluye que, basándose en los resultados obtenidos, que la integración de un sistema de almacenamiento con baterías de ion-litio en una central fotovoltaica no es rentable en el sistema eléctrico chileno. Esto se debe a que la remuneración generada por la operación del sistema de almacenamiento de energía con baterías (BESS) no cubre los costos de inversión. La dificultad para recuperar estos costos se atribuye al bajo diferencial de costos marginales entre el día y la noche, la estructura de remuneración de los cargos de potencia y los elevados costos actuales de esta tecnología. Sin embargo, también señaló que se analizó la proyección de precios de las baterías de BESS, concluyendo que se espera obtener rentabilidades positivas a partir de los años 2023-2024.

Sebastian (2017)⁵, consiste en evaluar la rentabilidad económica de implementar un sistema de baterías para la administración de cargos por potencia en el mercado chileno, para ello implementará una metodología.

La metodología que emplea Sebastián en su tesis, es determinar el valor que entrega el proyecto tanto para un cliente regulado que se ve beneficiado por los ahorros generados por el sistema, como para una empresa dedicada a la comercialización de las baterías y la entrega del servicio de administración de cargos por potencia.

⁴ Fabián Orlando Navarro. (2019), “*Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica aplicadas en generación con fuentes renovables, una revisión sistemática de literatura*”. (Tesis de Maestría). Universidad de Chile. Disponible en <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76810>

⁵ Toledo, F. S. (2015), “*Modelo Integrado del Mercado de Gas Natural con el Despacho Hidrotérmico de Largo Plazo aplicado al Sistema Interconectado Central se Chile*”. Tesis de Magister. Universidad Católica de Chile (Chile). Disponible en https://repositorio.uc.cl/xmlui/bitstream/handle/11534/21505/Toledo_Felipe.pdf

Jorge (2022)⁶, describe un escenario de un parque eólico en donde es posible aprovechar los excedentes de energía durante las horas nocturnas y en periodos de menor demanda mediante el uso de sistemas de almacenamiento energético con baterías. Se propone una tecnología que cumpla con las características adecuadas en términos de dimensionamiento de potencia y energía, así como la viabilidad financiera de instalar un banco de baterías. Esta propuesta considera la curva máxima de la red de distribución y el tiempo de descarga.

A partir de los resultados, concluye que, a pesar de que el banco de baterías es una solución técnica viable para el aprovechamiento de excedentes, en las condiciones analizadas la inversión no es justificable. Se recomienda reevaluar la posibilidad de realizar la inversión en el futuro cuando los costos de las tecnologías de almacenamiento disminuyan.

Brayan (2019)⁷, se enfoca en revisar y analizar los impactos de la integración de las baterías de Ion de Litio a los sistemas de potencia, como muestra de esto se realizaron simulaciones cumpliendo con todos los objetivos desarrollados mediante el software NEPLAN, dado que tiene un modelo más completo y desarrollado y una mejor base instalada a nivel mundial que el software PowerWorld.

A partir de los resultados Brayan concluye que, la incorporación de sistemas de almacenamiento de energía permite mantener la frecuencia y la estabilidad de la red, permitiendo el suministro continuo de potencia y energía, dando confiabilidad al sistema.

⁶ Jorge David Araya R.. (2022), “Integración de un sistema de almacenamiento de energía en un parque eólico, estudio de caso”. (Programa de investigación). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Disponible en <https://doi.org/10.18845/tm.v35i7.6333>

⁷ Brayan Andres (2019), “Evaluación de la integración de sistemas de baterías en los sistemas de potencia utilizando el software Powerworld”. (Tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali. Disponible en <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/11797/T08865>

1.2. Identificación y Descripción del Problema de estudio

En un escenario de alta inserción de energía renovable variable (eólica y fotovoltaica) no resulta óptimo para el despacho económico, el no almacenar la energía variable eólica y solar (oferta) en varias horas del día en los momentos en que la oferta supera a la demanda eléctrica requerida; ello conllevará a elevados costos de operación e inflexibilidades en el sistema por inestabilidad entre la oferta y la demanda, y a la ineficiencia de gestionar de mejor manera el potencial de los recursos eólico y solar para la operación del sistema.

Actualmente, en el Perú, los agentes existentes del mercado mayorista, no tienen implementado un BESS como parte de sus parques eólicos y fotovoltaicos para la gestión del recurso renovable en el despacho económico, debido a que, hasta el día de hoy, no existe normativa con rango de ley y reglamento que señale el uso de la tecnología de los BESS, así como que agente o actores del sector eléctrico debería ser responsables de su implementación, administración y remuneración.

En diversas naciones, esta problemática ha sido objeto de debate entre los actores del sector eléctrico, el operador del sistema y las autoridades gubernamentales. El objetivo de estas discusiones es flexibilizar el sistema eléctrico, mejorar el uso de recursos renovables (gestionando eficientemente la energía) y promover la transición energética mediante la incorporación de tecnologías avanzadas que garanticen un suministro eléctrico oportuno, económico y confiable para satisfacer la demanda. En consecuencia, numerosos países están evaluando soluciones avanzadas de almacenamiento energético basadas en baterías (BESS). En otros lugares, ya se han implementado regulaciones para fomentar el desarrollo de las BESS, las cuales se están convirtiendo en elementos esenciales para una solución global en la cadena de suministro eléctrico (generación, transmisión y distribución), adaptándose a las necesidades y características específicas de cada sistema eléctrico. Una de las soluciones significativas que ofrecen las BESS son los beneficios técnicos y económicos, que incluyen la reducción de la inversión en infraestructura de generación, transmisión y distribución, así como la disminución de los costos operativos del sistema eléctrico.

generación fotovoltaica (956 GWh) con respecto a los 58 393 GWh que representa el total de la producción de la generación de electricidad en el SEIN para el año 2023. Mientras que, la matriz queda sostenida por una importante participación de fuente térmica (46%) e hidráulica (48%); no obstante, esta última, tiene la particularidad de estar expuestas a sequías por lo que existe una probabilidad de ocurrencia de una sequía asociado a la variable hidrología , que de ocurrir tendría un gran impacto en la operación del SEIN, elevando el costo de operación del sistema, el costo marginal y reduciendo la flexibilidad del SEIN ante un desbalance entre la oferta y la demanda.

Sin embargo, esto no quiere decir, que el país no disponga de potencial de recursos eólico y solar, pues en un estudio realizado por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) en colaboración con el Ministerio de Energía y Minas del Perú, se publicó en 2016 una versión actualizada del Atlas Eólico del Perú. Este documento permitió cuantificar el potencial eólico renovable aprovechable a una altura de 100 metros, estimando que el Perú posee 20 493 MW de recursos eólicos disponibles para la instalación de sistemas de generación eléctrica. Asimismo, estudios del Banco Mundial identifican que las regiones de Arequipa, Moquegua y Tacna cuentan con mayores recursos solares del país, presentando un potencial de 25 000 MW para el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas y solar térmica, según fuentes del Ministerio de Energía y Minas (MINEM).

Según la estadística de cierre al año 2023, en el Perú la generación de electricidad de parques fotovoltaicos ha alcanzado en promedio 12 horas de operación continuas, alcanzado con ello factores de plantas máximo de 38% (octubre) y mínimo de 27% (mayo); mientras que en los parques eólicos ha alcanzado en promedio 24 horas de operación continuas, alcanzado factores de planta máximo de 58% (setiembre) y mínimo de 26% (marzo), teniéndose en el Perú factores de planta de parques fotovoltaicos y eólicos mayores al promedio global que rondan para: i) parques fotovoltaicos valores máximo de 25% a 35% y mínimo de 10% a 15%; y ii) parques eólicos mayores valores mínimos de 20% y máximos de 40%.

Por otra parte, el estudio realizado por el Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional (COES) el 10 de agosto de 2015, referente a la capacidad máxima de generación no convencional (eólica y solar fotovoltaica) en el SEIN para el año 2018, reveló que la máxima integración de generación renovable no convencional (RER) que el SEIN puede soportar, manteniendo la estabilidad del sistema, es de 2 656 MW. Esta capacidad está distribuida regionalmente de la siguiente manera: área Norte (720 MW), área Centro (1 332 MW) y área Sur (604 MW). Por lo que, se avizora la necesidad de flexibilizar las redes de transmisión troncal (SPT y SGT) y regional (SST y SCT) con la entrada de nuevas tecnologías que permitan integrar mayor capacidad de ERV para garantizar la seguridad en la operación del SEIN.

En este contexto, para aprovechar plenamente el potencial eólico y solar del país, será necesario flexibilizar el sistema de transmisión e implementar nuevas tecnologías que permita una operación óptima, segura, confiable y una gestión eficiente de los recursos de energías primarias para la generación de electricidad, asegurando de esta manera mayor integración de las energías renovables en las redes de transmisión y distribución, que nos llevará hacia la transición energética.

En consecuencia, que de darse el caso de alta inserción de gran capacidad de ERV (eólica y solar) – *debido a la ejecución de Puesta en Servicio de nuevos proyectos y ampliaciones de proyectos de ERV* – en el corto y mediano plazo en el SEIN, y asumiendo que las condiciones actuales del mercado eléctrico fomenten la instalación de nuevas inversiones de ERV pero no la entrada de nuevas tecnologías como los BESS , estaremos en un escenario en donde no se utilizará de manera eficiente la ERV generando ineficiencias en el despacho económico, la operación, seguridad del sistema e inercia del (SEIN). Aunado, al problema de no implementar sistemas de almacenamiento de energía que permitan mejorar el despacho económico, la operación y seguridad del SEIN.

En el Diagnóstico del Plan de Transmisión 2025-2034, publicado en febrero de 2023, referido al Anexo “ Evaluación Largo Plazo Generación Eficiente SEIN”, concluye que, se requiere generación eficiente a partir del año 2026 con 100 MW y alcanzando el valor de 2 100 MW en el 2034, en un escenario de demanda media y en condiciones de

estiaje que afecta la disponibilidad de generación hidroeléctrica; por lo cual, esto originaría incremento en los costos marginales del SEIN a precios mayores de 100 US\$/MWh en horas de máxima demanda del SEIN; debido a la operación de generación de las reservas frías que utilizan diésel, cuyos costos variables son muy elevados. En este escenario, de probabilidad media de ocurrencia, la situación para nueva generación eficiente se agrava puesto que estando a inicios del año 2024 a dos años del 2026, no hay muchas probabilidades de ejecución de nuevos proyectos sobre todo hidroeléctricos que llevan un mayor tiempo de ejecución, así como nuevos proyectos termoeléctricos cuyas complicaciones dependen de la disponibilidad de transporte del ducto de Gas Natural ; no obstante, los proyectos de parques eólicos y fotovoltaicos siguen a la espera que el Estado promueva la inversión para que estas tecnologías renovables no sigan dependiendo del mecanismo de subastas sino que puedan participar compitiendo en el mercado mayorista y de esta manera aumentar la participación de este recurso en la matriz de electricidad.

Cabe precisar que, a la fecha, el MINEM no ha actualizado el porcentaje objetivo de participación RER en el consumo nacional de electricidad, según lo indicado en numeral 2.2, artículo 2 de la Ley N° 1002 “Decreto Legislativo de Promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables”. No obstante, se ha propuesto modificatorias normativas con rango de ley para promover nuevas inversiones de proyectos renovables mediante el mecanismo de licitaciones de suministro de electricidad y que a la vez permita obtener precios competitivos de energía para los usuarios regulados.

Por lo tanto, la problemática identificada en casos de alta inserción de ERV, hace necesario evaluar, analizar y cuantificar el impacto de los sistemas de almacenamiento con baterías integrado a los parques eólicos y fotovoltaicos para mejorar el despacho económico impactando de manera indirecta en la reducción del costo de operación y de manera directa en la gestión eficiente del uso de los recursos eólico y solar para la generación de electricidad.

1.3. Formulación del Problema

1.3.1. Problema Principal

¿En qué medida la integración de sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos permitirá mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar?

1.3.2. Problemas Secundarios

1. ¿En qué medida la energía de carga en los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos permitirá mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar?
2. ¿En qué medida la energía de descarga en los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos permitirá mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar?
3. ¿En qué medida se verá afectado el despacho económico de un sistema eléctrico CON y SIN sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos en escenarios de alta generación eólica y solar?
4. ¿En qué medida se verá afectada la matriz de electricidad de un sistema eléctrico CON y SIN sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos en escenarios de alta generación eólica y solar?

1.4. Justificación e importancia de la investigación

La presente investigación se justifica debido al impacto teórico, económico, social y ambiental.

- En el aspecto teórico, la presente investigación aporta al desarrollo de la formulación matemática en la integración de sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y/o fotovoltaicos, y su implementación en un modelo matemático de optimización de despacho económico como parte de las ecuaciones, variables de decisión y restricciones.
- En el aspecto económico, la presente investigación contribuye de manera indirecta a la minimización del costo de operación del sistema, mediante el uso de sistemas de almacenamiento con baterías que permitirá mejorar de manera directa la gestión eficiente de los recursos eólico y solar, que participarán en el modelo matemático de optimización de despacho económico en el corto plazo, obteniendo como resultado una mayor participación y aprovechamiento de la ERV y una disminución de la generación convencional con fuentes no renovables. Es decir, permite disponer de energía renovable en el sistema eléctrico ante un escenario de falta de generación eficiente flexible en horas de máxima demanda del sistema eléctrico, y por ende mejorar de manera indirecta la seguridad del sistema eléctrico.
- En el aspecto social, la presente investigación beneficiará a la sociedad en su conjunto debido a que se otorgará un suministro oportuno, económico y confiable en bien de la demanda eléctrica, puesto que mejorará la flexibilidad del sistema eléctrico, evitando futuros racionamientos por falta de estabilidad en el sistema. Asimismo, permitirá contextualizar y discutir escenarios de adecuación normativa para aprovechar los precios de energía competitivos en las licitaciones de suministro de electricidad para el abastecimiento de la demanda regula, lo cual podrá reflejarse en las tarifas de electricidad en la componente de precio de energía.
- En el aspecto ambiental, la presente investigación contribuye de manera indirecta a la disminución de CO₂ en la generación de electricidad, al utilizar de manera eficiente los recursos renovables eólico y solar, mejorando su factor

de planta al aumentar la generación eléctrica con energía limpia (renovable) y disminuyendo la generación de electricidad con fuentes no renovables, para atender la demanda eléctrica de un sistema eléctrico.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo Principal

Integrar los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos para mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar.

1.5.2. Objetivos Específicos

1. Determinar la energía de carga en los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos para mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar.
2. Determinar la energía de descarga en los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos para mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar.
3. Determinar el resultado del despacho económico, CON y SIN sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos para medir el impacto en escenarios de alta generación eólica y solar.
4. Determinar el resultado de la matriz de electricidad de un sistema eléctrico CON y SIN sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos para medir el impacto en escenarios de alta generación eólica y solar.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

La integración de sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos, permite mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar.

1.6.2. Hipótesis Específicas

H1: La determinación de la energía de carga en los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos mejora el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar.

H2: La determinación de la energía de descarga en los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos mejora el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar.

H3: La determinación del resultado del despacho económico CON y SIN sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos permite medir el impacto en escenarios de alta generación eólica y solar.

H4: La determinación del resultado de la matriz de electricidad de un sistema eléctrico CON y SIN sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos permite medir el impacto en escenarios de alta generación eólica y solar

1.7. Variables, dimensiones, indicadores y operacionalización de variables

En la Tabla 1.1 se presentan las variables independientes y dependientes, junto con sus definiciones conceptuales y operacionales. Asimismo, se incluyen sus dimensiones, indicadores y escala de medición.

En el Anexo 1, se presenta la matriz de consistencia que sostiene al presente tema de investigación.

Tabla 1.1.

Operacionalización de Variables

INTEGRACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CON BATERÍAS EN PARQUES EÓLICOS Y FOTOVOLTAICOS PARA MEJORAR EL DESPACHO ECONÓMICO EN ESCENARIOS DE ALTA GENERACIÓN EÓLICA Y SOLAR					
VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	OPERACIONALIZACIÓN		ESCALA DE MEDICIÓN
			DIMENSIONES	INDICADORES	
Independiente (X) Integración de Sistemas de Almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaico.	Es una estrategia de gestión de la energía que aprovecha de manera eficiente el recurso eólico y solar, mediante la integración de la generación de energía renovable con la tecnología de sistemas de almacenamiento de energía con baterías o también llamadas BESS - por sus siglas en inglés – que permiten acumular la energía eléctrica en forma química – <i>siendo actualmente los BESS de tecnología de Ion -Litio</i> – las que han revolucionado el mercado de baterías por ser más ligeras, tener mayor densidad de carga, un rápido ciclo de carga/descarga, tener alta eficiencia, y experimentar costos de inversión a la baja, la cual está motivando su masificación a nivel mundial.	Es la cantidad de Energía Generada de los parques eólicos y fotovoltaica que se carga y descarga en los sistemas de almacenamiento con baterías.	Potencia Tiempo	El valor de "potencia de carga" que se almacena los sistemas de almacenamiento con Baterías, en resolución horaria (24 horas)	MW
				El valor de "potencia de descarga", que inyecta de los sistemas de almacenamiento con Baterías al sistema eléctrico, en resolución horaria (24 horas)	MW
Dependiente (Y) Mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación renovable eólica y solar.	Es aprovechar y hacer uso de manera eficiente la gestión de los recursos eólicos y solar para la generación de electricidad agregando variables, parámetros y restricciones en el modelo de optimización de despacho económico, contribuyendo de manera indirecta en la minimización del costo de operación.	Es el resultado de resolver – mediante <i>algoritmos</i> – un modelo matemático optimización de despacho económico, cuya función objetivo es minimizar el costo de operación del sistema, satisfaciendo la demanda eléctrica, para ello se debe encontrar los valores óptimos globales de las variables de decisión para obtener la solución óptima factible de la función objetivo, asegurando que se cumplan todas las restricciones del modelo.	Valor monetario	Valor del Costo de Operación del Sistema	Miles de USD
			Potencia óptima despachada del uso del recurso eólico y solar mediante y su participación en la matriz de electricidad.	Porcentaje de participación de potencia Solar y/o Eólica que se inyecta al Sistema eléctrico SIN almacenarse en la batería	%
				Porcentaje de participación de potencia de Descarga de los sistemas de almacenamiento CON Baterías que inyecta al sistema	%

Nota: Elaboración propia.

1.8. Unidad de Análisis

La unidad de análisis en la presente investigación comprende un sistema eléctrico conformado por: seis (6) barras, (11) líneas de transmisión, (03) centrales térmicas, (01) central de hidroeléctrica, (01) parque eólico, (01) parque fotovoltaico, (02) sistemas de almacenamiento con baterías y una demanda de resolución de 24 horas en (3) barras. La cuales serán objeto de aplicación y análisis en escenarios de alta inserción de generación renovable eólica y solar.

1.9. Fuentes de Información e Instrumentos Utilizados

La investigación se realizó fundamentalmente con datos de fuentes académicas, libros especializados sobre sistemas de almacenamiento de energía y datos históricos del SEIN al año 2023, tales como la generación eólica y fotovoltaica, de las cuales a partir de la información histórica de parques renovables existentes (representativos) se determinaron el perfil o caracterización de la curva de generación horaria y su factor de planta. Asimismo, para la determinación de la demanda eléctrica se modelo considerando la proporción de la demanda del norte, centro y sur del SEIN con información histórica al año 2022 y por ende su modelamiento bajo una configuración multinodal simplificando las tres áreas como tres puntos de demanda considerando el porcentaje de participación de los valores históricos.

La herramienta utilizada para la presente investigación fue el software GAMS con su solver CONOPT⁹ – que forma parte de las licencias habilitadas del GAMS – para resolver el problema de optimización de programación no lineal, debido a la función de costos cuadrática de las centrales térmicas modeladas.

⁹ GAMS/CONOPT tiene un método rápido para encontrar una primera solución factible que es particularmente adecuado para modelos con pocos grados de libertad. https://www.gams.com/latest/docs/S_CONOPT.html

1.10. Tipo y Nivel de la Investigación

1.10.1. Tipo de Investigación

Teniendo en cuenta que la presente investigación busca mejorar el despacho económico de un sistema eléctrico mediante la integración de los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos en escenarios de alta generación renovable eólica y solar, que permitirá reducir el costo de operación del sistema, aprovechar de manera eficiente el recurso eólico y solar para la generación de electricidad, aumentar el porcentaje de participación de generación renovables eólico y solar desplazando la generación con combustibles fósiles, mejorar la gestión de la oferta y demanda; y que todo ello en suma impactará en mejorar la eficiencia, continuidad y seguridad del suministro eléctrico, a partir de un mayor uso del recurso eólico y solar. En ese sentido, podemos afirmar que la presente investigación es de tipo aplicada.

1.10.2. Nivel de Investigación

Considerando que la presente investigación busca describir y explicar la integración de los los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos en escenarios de alta generación eólica y solar, se considera que la presente investigación es de carácter **descriptivo y explicativo**, debido a:

- a) Descriptivo: Se realiza una descripción sobre el uso de los sistemas de almacenamiento con baterías y su integración en parques eólicos y fotovoltaicos- mediante tres casos de estudio - así como la recopilación de los datos técnicas de los sistemas de almacenamiento, parque de generación, curva de carga de la demanda eléctrica y datos del perfil de generación del parque eólico y fotovoltaico, con resolución horaria.
- b) Explicativo: Debido a que se busca explicar el por qué la integración de los sistemas de almacenamiento con baterías permitirá mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar; para ello, se desarrolla un modelo de matemático de la integración de los BESS a los parques eólicos y

fotovoltaicos (sin considerar que la BESS se carga del Sistema Eléctrico) con la finalidad de realizar simulaciones para cuantificar y analizar los impactos en el despacho económico y en la matriz de electricidad.

1.11. Método de diseño de la investigación

El método de diseño de investigación es de tipo cuantitativo, experimental ya que su finalidad es verificar o corroborar de forma numérica las proposiciones planteadas en la investigación a través de la formulación de hipótesis basadas en relaciones entre variables. Se explora la relación causa-efecto entre variables. Además, esta investigación presenta una relación experimental, ya que se analizará 3 casos de alta inserción de energía renovable.

1.12. Técnicas de Recolección y Procesamiento de Datos

Para la presente tesis se empleó información de la web institucional del OSINERGMIN, COES, MINEM y fuentes especializadas digitales tales como libros especializados en sistemas de almacenamiento en energía; y como técnica de recopilación se utilizó la búsqueda, ubicación y análisis de datos pertinentes. Esta información ha permitido evaluar el impacto de la implementación del modelamiento de los sistemas de almacenamiento con baterías integrados a los parques eólicos y fotovoltaicos y el uso eficiente del recurso eólico y solar.

Para el procesamiento de datos se utilizaron las herramientas Excel y Power BI.

1.13. Análisis y procesamiento de los datos

El horizonte de análisis es de 24 horas, equivalente a un día, con la finalidad de hacer notar el impacto de los sistemas de almacenamiento con baterías integrados a los parques eólicos y fotovoltaicos.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Sistemas de Almacenamiento de Energía

Los sistemas de almacenamiento de energía son dispositivos cruciales en el panorama energético contemporáneo al capturar energía en momentos específicos para su utilización en períodos posteriores. Este proceso de captura se denomina carga, y la liberación de la energía se conoce como descarga. La función principal del almacenamiento de energía radica en la conversión de una forma de energía a otra, como es el caso de las baterías que almacenan energía química para su posterior conversión en electricidad.

Estos sistemas se clasifican de diversas maneras, siendo una de ellas la forma en que se almacena la energía. En términos generales, los tipos de almacenamiento de energía incluyen: mecánico, electroquímico, electromagnético, eléctrico y térmico. En la Tabla 2.1 se presenta un diagrama detallando los diferentes métodos de almacenamiento y sus tecnologías principales asociadas.

Tabla 2.1.

Tipos de sistemas de almacenamiento de Energía

Formas de almacenamiento de energía	Ejemplos
Mecánico 	Bombeo hidráulico Volantes de inercia Aire comprimido
Electroquímico 	Baterías Hidrógeno
Eléctrico 	Supercondensadores Superconductores magnéticos
Térmico 	Sales fundidas

Fuente: Revista INRENA 2023

a) **Almacenamiento en forma de energía mecánica:**

- Almacenamiento por bombeo hidroeléctrico (PHS): Utiliza el exceso de energía para bombear agua a un depósito elevado. Cuando se necesita energía, se libera el agua hacia una turbina para generar electricidad. Es una de las formas más comunes y maduras de almacenamiento.
- Volantes de inercia (Flywheels): Almacenan energía en un rotor de alta velocidad. La energía se conserva como energía cinética y se puede extraer desacelerando el volante para generar electricidad.
- Almacenamiento de aire comprimido (CAES): Utiliza energía para comprimir aire en cavernas subterráneas o tanques. Cuando se necesita energía, el aire comprimido se libera y pasa por una turbina para generar electricidad.

b) **Almacenamiento en forma de energía eléctrica:**

- Baterías de iones de litio: La tecnología más común de almacenamiento electroquímico. Utiliza la movilidad de los iones de litio entre el ánodo y el cátodo para almacenar y liberar energía. Son eficientes y ampliamente utilizadas en aplicaciones de vehículos eléctricos y redes eléctricas.
- Baterías de flujo (Flow batteries): Almacenan energía en dos líquidos electrolíticos que fluyen a través de una membrana para generar electricidad. Son adecuadas para aplicaciones estacionarias, ya que permiten escalabilidad y tiempos de descarga largos.
- Baterías de plomo-ácido: Son una tecnología antigua pero confiable, principalmente utilizada en sistemas de respaldo de energía. Su eficiencia es menor en comparación con las de iones de litio.
- Baterías de iones de Sodio (Na): Son una tecnología prometedora que podría complementar o incluso reemplazar a las baterías de litio en ciertas aplicaciones, especialmente aquellas en las que el costo y la sostenibilidad son factores clave. A medida que se optimizan los materiales y se resuelven los problemas actuales de baja densidad energética (almacenan menos energía por unidad de peso), baja eficiencia, tamaño (voluminoso) y vida útil más corta; comparada con las Baterías

de Ion-Litio. Es probable que en el futuro podamos ver la implementación de este tipo de baterías.

c) Almacenamiento eléctrico:

- Supercondensadores: Almacenan energía directamente como una diferencia de carga en un campo eléctrico. Son capaces de entregar grandes cantidades de energía rápidamente, pero con tiempos de almacenamiento más cortos y una menor densidad energética en comparación con las baterías.
- Superconductores (SMES - Superconducting Magnetic Energy Storage): Almacenan energía en un campo magnético generado por una corriente que circula en una bobina de material superconductor. Ofrecen una rápida entrega de energía y alta eficiencia, aunque son caros y requieren bajas temperaturas para funcionar

d) Almacenamiento térmico:

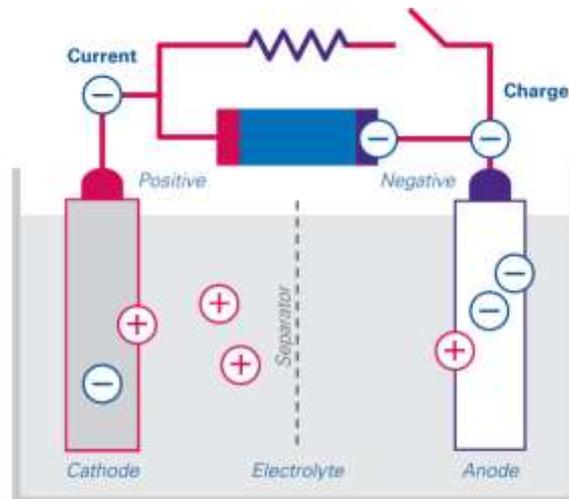
- Almacenamiento térmico sensible: Almacena calor en materiales como agua o roca que experimentan un cambio de temperatura. Se usa en aplicaciones como el almacenamiento de energía solar térmica, donde se almacena el calor del sol para convertirlo en electricidad durante la noche.
- Almacenamiento térmico latente: Utiliza materiales de cambio de fase (PCM) que absorben y liberan grandes cantidades de energía durante su transición entre estados (por ejemplo, de sólido a líquido). Se emplea para almacenamiento a mediana escala.
- Almacenamiento termodinámico (TES - Thermal Energy Storage): Puede almacenar calor o frío en forma de energía térmica para su uso posterior, común en sistemas de refrigeración o en plantas solares concentradas.

2.1.1 Tecnología de almacenamiento para redes eléctricas

- a) **Baterías**: Los sistemas de almacenamiento de energía en baterías, conocidos como BESS por sus siglas en inglés (Battery Energy Storage System) son dispositivos fundamentales en la transformación de la energía química en electricidad y viceversa mediante celdas electroquímicas. Estas celdas se

componen de un cátodo (electrodo positivo), un ánodo (electrodo negativo) y un electrolito, como se muestra en la Figura 2.1.

Figura 2.1.
Funcionamiento de un sistema de almacenamiento con Batería



Fuente: Revista INRENA 2023.

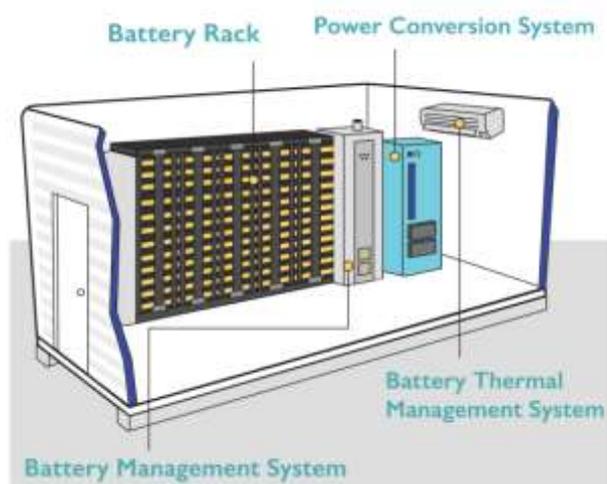
En el proceso de descarga, la diferencia de potencial entre los electrodos facilita el movimiento de iones, lo que promueve la circulación de electrones del cátodo al ánodo. Durante la carga, las reacciones se invierten y la batería se recarga con la aplicación de un voltaje externo entre los electrodos. En la Figura 2.2 se indican los principales componentes de un sistema BESS a ser considerados en la evaluación de un proyecto de inversión que involucre el uso de estos sistemas. Dichas componentes, se describen a continuación:

- Estante de baterías: Agrupa celdas y módulos de baterías conectados en serie o paralelo.
- Sistema de conversión de energía (PCS): Convierte corriente alterna (CA) en corriente continua (CC) y viceversa, facilitando el flujo de energía entre el BESS y la red.
- Sistema de gestión de energía: Monitorea, controla y optimiza el flujo de energía entre el BESS y la red eléctrica.
- Sistema de gestión de batería: Protege el BESS y maximiza su vida útil monitoreando constantemente parámetros como voltaje, corriente,

temperatura y nivel de energía disponible, asegurando su funcionamiento dentro de especificaciones.

- Sistema de gestión térmica de la batería: Regula la temperatura de la batería mediante intercambiadores de calor para evitar sobrecalentamientos y garantizar su funcionamiento óptimo.

Figura 2.2.
Componente de un BESS

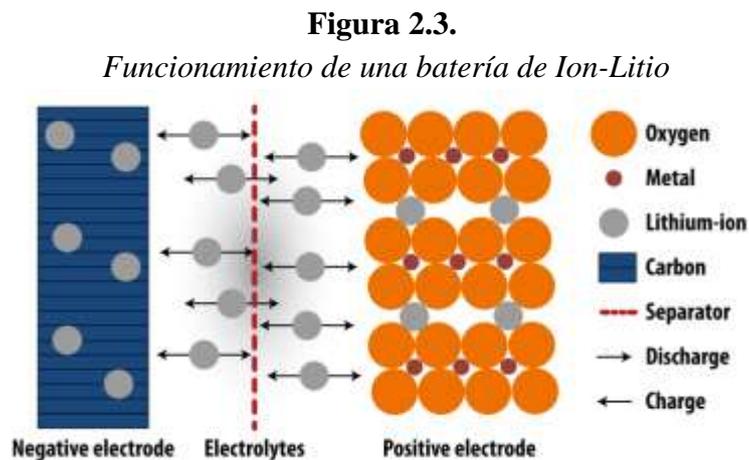


Fuente: Revista INRENA 2023.

Este conjunto de componentes y su correcta gestión son fundamentales para el desempeño efectivo y la durabilidad de los sistemas de almacenamiento de energía en baterías en el contexto de proyectos de inversión en el sector eléctrico.

Además, existen diferentes tipos de baterías, que se diferencian según su construcción, materiales, diseño y funcionamiento. A continuación, se presentan la batería que posee un mayor avance tecnológico y despliegue comercial a nivel mundial:

- **Batería de Ión-litio:** Estas baterías emplean un ánodo de carbono grafito, un cátodo de óxido de litio y un electrolito líquido orgánico no acuoso. En la Figura 2.3 se muestra la operación de este tipo de baterías. Durante la carga, los iones de litio se desplazan desde el cátodo a través del electrolito hacia el ánodo, donde se unen con electrones externos y se depositan como átomos de litio entre las capas del carbono grafito. La descarga sigue el proceso inverso.



Fuente: Revista INRENA 2023.

Las baterías de iones de litio son actualmente la opción líder en dispositivos electrónicos portátiles y vehículos eléctricos, gracias a su eficiencia superior, alta densidad energética, rápida capacidad de respuesta y larga vida útil. En el ámbito de la red eléctrica, estas baterías desempeñan un papel clave, desde la alimentación de sistemas residenciales como los paneles solares fotovoltaicos hasta su aplicación en servicios de regulación de frecuencia con capacidades que van desde unos pocos kilovatios hasta varios megavatios.

No obstante, su adopción a gran escala se enfrenta a desafíos significativos, especialmente debido a su elevado coste. Esto se debe en parte a los requisitos específicos de embalaje y a los complejos circuitos internos de protección contra sobrecargas que estas baterías necesitan para operar de manera segura y efectiva en entornos de alta demanda energética.

En la tabla 2.3 se comparan parámetros técnicos de los diferentes tipos de BESS – según tecnología – dichos parámetros están referidos a la capacidad, la densidad de energía, el tiempo de suministro, el tiempo de respuesta y la cantidad de ciclos. La tabla 2.2 compara características económicas entre ellas la eficiencia, la vida útil, sus costos y su madurez tecnológica y comercial:

Tabla 2.2.
Característica económica de los tipos de BESS

	Tecnología	Eficiencia [%]	Vida útil [años]	Costo de inversión [USD\$/kW]	Costo de operación [USD \$/kWh]	Madurez
BESS	Ión-litio	90 - 100	5 - 20	1200 - 4000	600 - 2500	Madura
	Plomo-ácido	85 - 90	5 - 15	300 - 600	200 - 400	Madura
	NaS	75 -90	10 - 15	1000 - 3000	300 - 500	Comercializada
	Flujo VRB	65 -85	10 -20	600 - 1500	150 - 1000	Demostraciones
	PHES	60 - 90	40 - 60	600 -2000	5 - 100	Madura

Fuente: Revista INRENA 2023.

Tabla 2.3.
Característica técnica de las BESS

	Tecnología	Capacidad [MW]	Densidad de energía [kWh/m ³]	Tiempo de suministro	Tiempo de respuesta	Cantidad de ciclos
BESS	Ión-litio	0,1 - 100	200 - 600	min - días	~ ms	1000 - 10000
	Plomo-ácido	0,001 - 50	50 - 80	s -hrs	~ ms	500 - 1200
	NaS	0,05 - 50	150 - 240	s -hrs	~ ms	2000 - 5000
	Flujo VRB	0,005 - 1,5	15 - 33	hrs- meses	~ ms	12000 - 14000
	PHES	100 - 5000	0,5 - 1,5	hrs- meses	~ min	10000 - 30000

Fuente: Revista INRENA 2023.

A partir de la información de las Tablas 2.2 y Tabla 2.3, la investigación considerará como tecnologías de almacenamiento de energía, las Batería Ión-litio, para el desarrollo del modelamiento matemático de los BESS integrados a los parques eólicos y/o fotovoltaicos mediante ecuaciones y restricciones a ser agregadas en el modelo matemático de optimización de despacho económico, debido a que destacan por su desempeño y complemento de atributos técnico-económicos, por ejemplo, la cantidad de ciclos, la vida útil y los costos asociados.

2.1.2 Aplicaciones de un BESS en las Redes Eléctricas

En la Tabla 2.4 se resumen las principales aplicaciones de un BESS, que para nuestro caso de investigación está asociada al segmento de generación, en específico al mercado mayorista:

Tabla 2.4.
Aplicaciones de un BESS en redes eléctricas

Segmento		Aplicación
FTM	Generación 	Arbitraje Integración de renovables y energía firme
	Transmisión 	Descongestión líneas de transmisión Aplazamiento de las inversiones
	Servicios complementarios 	Regulación de frecuencia Regulación de voltaje Arranque en negro
BTM	Clientes libres 	Recorte de punta Respaldo de energía

Sector Generación:

- Arbitraje de energía:** Consiste en la estrategia de almacenar energía a un costo reducido durante períodos de baja demanda, para luego venderla durante momentos de mayor consumo, cuando los precios son más elevados. Esta estrategia permite a las empresas generadoras obtener beneficios económicos y aliviar la presión sobre el sistema eléctrico durante las horas valle (Horas Fuera de Punta). Los Sistemas de Almacenamiento de Energía en Baterías (BESS, por sus siglas en inglés) emergen como una solución viable para esta aplicación. Para que la implementación de un sistema BESS sea rentable, es esencial que la diferencia entre los precios de la energía durante las Horas Punta (HP) y Horas Fuera de Punta (HFP) junto con el ahorro en los cargos por Máxima Demanda (Asociados a los cargos por Peaje de Transmisión), supere las pérdidas inherentes al sistema de baterías y los costos asociados al almacenamiento, incluyendo inversión, operación, mantenimiento y reemplazo. Si estas condiciones se cumplen, la implementación de un sistema BESS resultará factible para el propietario del sistema de almacenamiento.
- Integración de energía renovables y energía firme:** La energía firme de un sistema eléctrico, esta referida a la energía que se encuentra garantizada en todo momento a partir de sus fuentes primarias de energía. En este sentido, las fuentes

de energías renovables variables como la solar y eólica – de naturaleza intermitente y no controlable– se consideran fuentes de energía no firme, debido a que dependen fuertemente de las condiciones climáticas, lo que hace que la generación de electricidad sea más variable y menos predecible. El acoplamiento de una fuente de generación de energía renovable variable específica con un sistema BESS reduce la variabilidad de la potencia de salida en el punto de interconexión a la red, lo que facilita una mejor integración de energías renovables al sistema eléctrico, al brindar oferta de manera instantánea para satisfacer la demanda eléctrica en tiempo real.

- **Servicios Complementarios:** En algunos mercados eléctricos los BESS brindan el servicio de estabilidad y seguridad en la operación del sistema, siendo el servicio más relevante la regulación de frecuencia que implica un ajuste continuo, segundo a segundo, de la energía generada para mantener la frecuencia del sistema en su valor nominal (50 o 60 Hz), lo que asegura la estabilidad de la red eléctrica. En los casos donde la demanda de electricidad supera la oferta, la frecuencia del sistema comienza a caer, lo que podría llevar a apagones parciales o totales. Por otro lado, si las empresas eléctricas generan más energía de la que se necesita, la frecuencia sube, lo que puede dañar los dispositivos eléctricos conectados. Aquí es donde los sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS, por sus siglas en inglés) juegan un papel clave. Estos sistemas pueden entregar potencia reguladora en tiempos de respuesta inferiores a un segundo, lo que los convierte en un recurso sumamente valioso para equilibrar la red en la regulación de frecuencia.

2.1.3 Despacho Económico

El despacho económico es la forma de determinar la producción de energía de cada central de generación en un sistema de potencia con el objetivo de minimizar el costo de producción en la generación de electricidad mientras satisface la demanda eléctrica y las restricciones de igualdad y desigualdad. Ello involucra la asignación óptima de las

diferentes fuentes de generación disponibles considerando sus características técnicas y costos de producción asociados para su generación en el sistema eléctrico.

Ahora bien, cada unidad generadora tiene sus propias características dependiendo de su eficiencia y del tipo de combustible utilizado que determinan la relación entre el costo del combustible y la energía generada. La función que relaciona el costo del combustible y la energía generada normalmente se denomina función de costo.

Cada unidad de generación normalmente tiene su propia función de coste dependiendo de sus características, asimismo, debido a las diferentes funciones de costos entre los generadores, el costo operativo tiende a diferir entre los generadores. Como resultado de los diferentes costos de operación entre los generadores, las técnicas de despacho económico normalmente se aplican para minimizar el costo total de generación cuando se opera con más de una central. Normalmente, la demanda se despacha de manera económica entre las unidades generadoras para reducir el costo del combustible.

En ese sentido, el despacho económico se formula como un problema de optimización que podría ser de tipo lineal, no lineal y/o entera mixta – el tipo de optimización dependerá de la naturaleza de las ecuaciones formuladas – representado mediante un modelo matemático de optimización.

El modelo matemático de optimización en el contexto de despacho económico, se caracteriza por tener función objetivo, variables de decisión, parámetros y restricciones; y en la cual se optimiza la función objetivo (minimizar el costo total de generación eléctrica), para ello tendrá que encontrar los valores óptimos globales de las variables de decisión para obtener la solución óptima factible de la función objetivo, asegurando que se cumplan todas las restricciones del modelo.

Finalmente, la esencia principal del despacho económico se basa en lograr el mismo costo por unidad al costo incremental o marginal, mientras se mantiene la potencia de salida total que se supone debe suministrarse a la carga del sistema.¹⁰

2.1.4 Modelo de Costos de las Unidades Termoeléctricas

En la unidad termoeléctrica, las ecuaciones de costo se obtienen a partir de las características del Consumo Específico (Es la relación entre el consumo horario de calor y la potencia generada por la unidad, expresado en BTU/kWh. combustible gaseoso o kWh/g para un combustible sólido) de la máquina generadora.

Los costos pueden modelarse en funciones lineales, diferenciables y convexas. La potencia generada representa la influencia en el costo del combustible. La generación real individual se eleva aumentando los pares motores primarios, y esto requiere un mayor gasto de combustible. La potencia reactiva no tiene ninguna influencia medible en el costo, ya que están controladas por el control de la corriente de campo

La función de costo de combustible de cada unidad generadora térmica se expresa como una función cuadrática. El costo total de combustible en términos de potencia real de salida se puede expresar como:¹¹

$$C = \sum_{i=1}^N F(P_{ti})$$

$$F(P_{ti}) = a_{ti} + b_{ti}P_{ti} + c_{ti}P_{ti}^2$$

Donde

- N : Número de unidades térmicas
 P_{ti} : Potencia de la ith unidad térmica

¹⁰ Ruta, W. (2018), "Economic Dispatch Considering Emissions using moth flame Optimization and Bat Hybrid Algorithm", URL disponible en: <http://ir.jkuat.ac.ke/bitstream/handle/>

¹¹ Julia, J., (2013), "Comparison of Economic Load Dispatch of Wind Hydrothermal Systems". URL disponible: <https://www.ijert.org/comparison-of-economic-load-dispatch-of-wind-hydrothermal-systems>

a_{ti}, b_{ti}, c_{ti} : Coeficiente de costos de la i^{th} unidad térmica

2.1.5 Coordinación Hidrotérmica

Importante actividad para la industria eléctrica debido a su importancia económica, cuyo objetivo es reducir al mínimo el costo la producción de generación de las unidades térmicas y determinar el despacho de las centrales térmicas e hidráulicas, sujeto a las restricciones técnicas de las térmicas e hidráulicas, de operación del sistema y a la demanda eléctrica. Cabe indicar que, las restricciones térmicas e hidráulicas pueden incluir mínimos y máximos técnicos de operación de las unidades de generación, rampa de subida/parada, tiempo mínimo de funcionamiento/parada, capacidad de almacenamiento de agua producto de los embalses, descarga de agua, descarga natural del embalse, entre otros.

La coordinación hidrotérmica puede tener diferentes etapas/horizontes de planificación, siendo por lo general horizontes de corto o largo plazo. La coordinación a corto plazo, por lo general tienen un horizonte de un día o una semana, siendo su unidad de medida una hora; mientras que la coordinación a largo plazo comprende horizontes mayores, siendo una semana, meses o años.

La coordinación hidrotérmica de corto plazo, ha sido un problema ampliamente estudiado desde 1980, como un solo problema o como dos sub-problemas. Se trata de un problema complejo debido a la variabilidad de los recursos hídricos, las características no lineales de las centrales hidroeléctricas y térmicas, y las restricciones de operación como las rampas de inicio y parada, los límites de generación y el nivel de almacenamiento de agua en los embalses; matemáticamente, este problema es considerado como un problema de gran dimensión, discreto, no lineal y no convexo. La no linealidad es debido a las características de las centrales hidroeléctricas, cuya potencia de salida es una función no lineal, representada por el caudal que atraviesa las turbinas y la altura del agua del embalse correspondiente, esta característica también origina la no convexidad del problema, ya que la curva es no convexa cerca del punto de máxima eficiencia de la

unidad hidroeléctrica; mientras que la parte discreta del problema es causada por la condición de arranque y parada de las unidades.

Para abordar este problema, se emplean modelos matemáticos y herramientas de optimización que consideran variables como la demanda eléctrica, los caudales de agua, la capacidad de generación de las centrales, los costos de combustible y operación, entre otros. Estos modelos pueden ser lineales o no lineales, dependiendo de la complejidad del sistema y la precisión requerida en las soluciones.

2.1.6 Métodos de Programación

2.1.6.1 Programación lineal

La Programación Lineal¹² es un procedimiento o algoritmo matemático que resuelve problemas con ecuaciones y restricciones lineales, optimizando una función objetivo de manera lineal, ya sea minimizando o maximizando. Este procedimiento es esencial en la optimización y se aplica ampliamente en la investigación de operaciones y otros campos como la microeconomía y la administración de empresas. Además, ha generado investigaciones significativas en algoritmos especializados para resolver problemas específicos en sistemas eléctricos de potencia. Históricamente, la programación lineal ha influido en conceptos clave de la teoría de optimización, como la dualidad y la convexidad, siendo una herramienta fundamental en la toma de decisiones empresariales.

2.1.6.2 Programación No Lineal

Un modelo de Programación No Lineal (PNL)¹³ es una rama fundamental de la optimización que aborda problemas donde la función objetivo o las restricciones no son lineales, a diferencia de la Programación Lineal, que se enfoca en maximizar o

¹² Marulanda, A. (2004), "Modelos para la Explotación Óptima de la Generación en Mercados Eléctricos Competitivos". Disponible en <https://idus.us.es/handle/11441/24269>

¹³ Trujillo, S. (2021), "Análisis de la Generación de Potencia Mediante el Modelamiento de Curvas de Eficiencia para Mejorar la Performance en una Central Hidroeléctrica con Turbinas Tipo Pelton". Disponible en <http://cybertesis.uni.edu.pe/>

minimizar una función lineal sujeta a restricciones lineales, la PNL enfrenta desafíos adicionales debido a la no linealidad de las relaciones entre variables; es decir las variables de decisión se expresan como funciones no lineales, ya sea en la función objetivo y/o restricciones de un modelo de optimización.

Cabe indicar, que las funciones no lineales son aquellas en las que las variables no tienen una relación directamente proporcional o constante entre sí. Estas funciones pueden ser cóncavas, convexas o tener puntos de inflexión, lo que agrega complejidad a la optimización.

Si bien, la programación lineal ha demostrado ser una herramienta sumamente poderosa, tanto en la modelización de problemas de la vida real como en la teoría matemática de amplia aplicación; no obstante, muchos problemas interesantes de optimización son No Lineales, implicando una mezcla diversa de álgebra lineal, cálculo multivariado, análisis numérico y técnicas de computación. Por lo que, para abordar problemas de PNL, se emplean diversos métodos, como los algoritmos de gradiente descendente que buscan iterativamente el mínimo de una función ajustando los parámetros en la dirección del gradiente negativo. Otro método común es la programación cuadrática, especialmente útil para problemas de optimización convexa.

Las áreas de aplicación de la programación no lineal son muy amplias, sin embargo, hasta la fecha los investigadores de esta rama del conocimiento no han desarrollado un método sistemático que sea práctico para su estudio. La PNL tiene numerosas aplicaciones en la vida real, como en la economía, la ingeniería, la gestión de recursos, la ciencia de datos y la investigación operativa. Por ejemplo, en la industria manufacturera, la PNL se usa para optimizar la producción minimizando costos y maximizando la eficiencia.

Finalmente, uno de los principales desafíos en la PNL es la posibilidad de convergencia a óptimos locales en lugar del óptimo global debido a la no convexidad de las funciones. Además, la selección adecuada de algoritmos y parámetros es crucial para

obtener resultados precisos y eficientes. Es por ello, que las investigaciones actuales, han desarrollado varios métodos de solución siendo entre ellas:

- **Métodos de Inicialización Múltiple:**

Estos métodos implican la ejecución de algoritmos de optimización múltiples desde diferentes puntos iniciales. Luego se comparan los resultados obtenidos para seleccionar la solución óptima global o una aproximación aceptable. Esto ayuda a mitigar el riesgo de quedar atrapado en óptimos locales.

- **Algoritmos de Búsqueda Global:**

Algunos algoritmos se centran específicamente en encontrar soluciones globales en entornos no convexos. Por ejemplo, el algoritmo de Monte Carlo utiliza muestreo aleatorio para explorar el espacio de búsqueda y encontrar soluciones que podrían no ser detectadas por métodos locales.

- **Metaheurísticas:**

Las metaheurísticas, como el recocido simulado, la optimización por enjambre de partículas (PSO) o los algoritmos genéticos, son enfoques que pueden escapar de óptimos locales al explorar ampliamente el espacio de soluciones y mantener la diversidad de la población de soluciones.

- **Algoritmos Híbridos:**

Se han desarrollado enfoques que combinan técnicas locales con estrategias globales. Por ejemplo, el algoritmo de optimización por enjambre de partículas puede integrarse con métodos de búsqueda local para mejorar la exploración del espacio de soluciones y evitar converger prematuramente en óptimos locales.

- **Optimización Multiobjetivo:**

En lugar de optimizar una única función objetivo, la optimización multiobjetivo considera múltiples objetivos simultáneamente. Esto puede ayudar a encontrar soluciones que equilibren diferentes criterios y a evitar óptimos locales al no enfocarse exclusivamente en minimizar o maximizar una sola función.

- **Técnicas de Reinicio Adaptativas:**

Algunos algoritmos incorporan técnicas de reinicio adaptativas que reinician la búsqueda desde diferentes puntos o ajustan la estrategia de búsqueda según el progreso realizado. Esto puede mejorar las posibilidades de encontrar el óptimo global en problemas no convexos.

Estas soluciones y técnicas de solución se aplican en diferentes contextos según la naturaleza específica del problema de optimización no lineal y las restricciones involucradas. Su uso efectivo depende de una comprensión profunda del problema y la selección adecuada de herramientas y estrategias de optimización.

2.1.6.3 Programación dinámica

La programación dinámica¹⁴ (PD) es una técnica en informática y matemáticas que se centra en la resolución de problemas complejos dividiéndolos en subproblemas más simples. Su objetivo es encontrar la mejor solución para un problema dado, generalmente optimizando alguna métrica como el tiempo, el espacio o cualquier otra función objetivo.

Las combinaciones de unidades dentro de un periodo de tiempo son conocidas como los estados del problema de la programación dinámica. La PD hacia adelante encuentra el horario más barato empezando en la fase inicial que aumenta los costos

¹⁴ Sheble, G. "Unit commitment Literature Synopsis", IEEE Transactions on Power Systems, (1994). Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/document/317549>

totales; mientras que la PD hacia atrás se tiene que la combinación de costos acumulados que empezó en la última fase y acaba en la fase inicial.

Por otra parte, la programación dinámica radica en la idea de dividir un problema en subproblemas más pequeños y resolver cada subproblema de manera independiente. Luego, se combinan las soluciones de los subproblemas para obtener la solución óptima al problema original; esto se conoce como principio de optimalidad de Bellman.

Una característica fundamental de la programación dinámica es el concepto de memorización, que consiste en guardar las soluciones de los subproblemas ya resueltos para evitar recalcularlos en futuras iteraciones. Esto reduce significativamente la complejidad temporal de la solución final; sin embargo, la PD sufre la ‘maldición de la dimensionalidad’, lo que limita el desempeño, como por ejemplo en sistemas con varias centrales de generación.

Finalmente, la PD es una técnica poderosa utilizada para resolver problemas complejos al dividirlos en subproblemas más simples, aplicando el principio de optimalidad de Bellman y utilizando la memorización para mejorar la eficiencia computacional.

2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Sistemas de Almacenamiento con Baterías

Los sistemas de almacenamiento de energía con baterías o también llamadas BESS - por sus siglas en inglés - representan una solución crucial para acumular energía eléctrica de manera química. En la actualidad, las BESS basadas en tecnología de Ion-Litio han transformado el mercado de las baterías debido a su peso reducido, alta densidad de carga, ciclos rápidos de carga/descarga, eficiencia elevada en el rango del 86 al 96%, y la tendencia a la disminución de los costos de inversión, lo que está impulsando su adopción a gran escala. Estas baterías se han convertido en una de las formas más

avanzadas para almacenar energía renovable, tanto en grandes plantas de generación eléctrica como a nivel de consumidores individuales.

2.2.2 Integración de energía renovable

Consiste en la conexión de un Sistema de Almacenamiento de Energía en Baterías (BEES, por sus siglas en inglés) con una fuente de generación de energía renovable variable, como parques eólicos y fotovoltaicos (que representa el trabajo de investigación). Este enfoque busca mitigar la variabilidad en la potencia de salida en el punto de interconexión a la red eléctrica, lo que optimiza la integración de las energías renovables en el sistema eléctrico.

2.2.3 Parques eólicos y fotovoltaicos

Los parques eólicos consisten en instalaciones de aerogeneradores que convierten la energía cinética del viento en energía eléctrica, la cual se integra a la red de suministro eléctrico. Estos pueden ser clasificados en dos categorías: terrestres ("onshore") y marítimos ("offshore"), y;

Los parques fotovoltaicos están compuestos por paneles solares que convierten la radiación solar en energía eléctrica mediante el uso de materiales semiconductores, como las células fotovoltaicas. Estas instalaciones capturan la luz solar y la transforman en electricidad, contribuyendo de manera significativa a la generación de energía limpia y renovable.

Por lo tanto, ambos tipos de parques representan infraestructuras clave en la transición hacia sistemas energéticos sostenibles, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

2.2.4 Mejora en el despacho económico

Consiste en que mediante el uso de las baterías (BESS) integrados a los parques eólicos y fotovoltaicos – *que no forman parte directa de la función objetivo del modelo*

de despacho económico – mejora el aprovechamiento y gestión de los recursos eólicos y solar, al almacenar la energía cuando la producción es alta y utilizarla cuando la producción es baja, las baterías permiten una gestión más eficiente del sistema eléctrico y evitan el uso de fuentes de generación más costosas (como las plantas térmicas).

2.2.5 Energía eólica y solar

La energía eólica es una fuente de energía renovable que se genera a partir de la velocidad del viento (recurso eólico), el cual se origina por las diferencias de temperatura y presión en diversas zonas geográficas, que crean corrientes de aire. La energía cinética del viento se aprovecha mediante aerogeneradores, que la transforman en energía mecánica y luego en electricidad. Este proceso es limpio y sostenible, contribuyendo significativamente a la reducción de las emisiones de carbono y a la diversificación de la matriz energética global.

La energía solar es una fuente de energía renovable que se obtiene al capturar la radiación del sol (recurso solar), las cuales se pueden aprovechar mediante dos tipos de tecnología: i) la energía solar fotovoltaica, que convierte la luz solar directamente en electricidad mediante células fotovoltaicas; y ii) la energía solar térmica, que utiliza la radiación solar para calentar fluidos y generar vapor, el cual puede accionar turbinas para producir electricidad o proporcionar calor directo para diversas aplicaciones. Ambas tecnologías son esenciales para una transición hacia sistemas energéticos sostenibles y de bajas emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

2.2.6 Matriz de electricidad

Es la participación del uso óptimo de las fuentes primarias de energía que se utiliza para la generación de electricidad en la operación del despacho económico para satisfacer la demanda eléctrica.

CAPÍTULO III. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Casos de Análisis

Se modelaron y simularon tres casos de estudio para un sistema eléctrico conformado por 6 barras con 11 líneas de Transmisión, tres centrales termoeléctricas, una central hidroeléctrica con embalse, un parque eólico y fotovoltaico, donde el primer caso denominado “Caso 1” tiene como finalidad – *mediante un modelo de despacho económico* – abastecer de manera óptima la demanda del sistema eléctrico sin considerar sistemas de almacenamiento con batería. Asimismo, sobre este caso se realizará el escenario de considerar los sistemas almacenamiento con baterías (BESS) integrado al parque eólico y/o fotovoltaico.

El segundo caso de estudio “Caso 2” considera como base el “Caso 1” pero considerando dentro de las fuentes de generación como única fuente de Energía Renovable Variable (ERV) la producción de 100% de uso de recurso eólico.

El tercer caso de estudio “Caso 3” considera como base las características del “Caso 1” pero considerando dentro de las fuentes de generación como única fuente de Energía Renovable Variable (ERV) la producción de 100% de uso de recurso solar.

El proceso de las simulaciones se inicia con el modelamiento de los parámetros de entrada que son: i) parámetros técnicos del parque generador, ii) demanda eléctrica en resolución horaria de 24 horas, iii) generación de ERV en resolución horaria de 24 horas, iv) datos técnicos del embalse de la central hidroeléctrica y de los sistemas de almacenamiento con baterías integradas a los parques de generación renovable. A partir, de los datos ingresados se resuelve el problema matemático de optimización de despacho económico.

A continuación, en la Tabla 3.1 se muestra el resumen de los casos de estudio a analizar:

Tabla 3.1.
Casos de Estudios

Caso 1	Caso 2	Caso 3
<ul style="list-style-type: none"> •Modelo Multinodal •Demanda horaria •Red de Transmisión: (06) barras y 11 líneas de Transmisión •Oferta: (03) centrales térmicas + (01) central hidroeléctrica con Embalse + Parques eólicos y Fotovoltaicos •Recurso: 30% solar + 70% eólica •Participación de la Generación Renovable Variable (ERV): 6,500 MWh. • Escenario: SIN y CON sistemas de almacenamiento con Batería integrado al parque eólico y fotovoltaico. 	<ul style="list-style-type: none"> •Modelo Multinodal •Demanda horaria •Red de Transmisión: (06) barras y 11 líneas de Transmisión •Oferta: (03) centrales térmicas + (01) central hidroeléctrica con Embalse •Recurso: 100% eólica •Participación de la Generación Renovable Variable (ERV): 6,500 MWh. •Escenario: SIN y CON sistemas de almacenamiento con Batería integrado al parque eólico. 	<ul style="list-style-type: none"> •Modelo Multinodal •Demanda horaria •Red de Transmisión: (06) barras y 11 líneas de Transmisión •Oferta: (03) centrales térmicas + (01) central hidroeléctrica con Embalse •Recurso: 100% solar •Participación de la Generación Renovable Variable (ERV): 6,500 MWh. •Escenario: SIN y CON sistemas de almacenamiento con Batería integrado al parque fotovoltaico.

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Parámetros y características de los datos de entrada para el Modelamiento

Los datos utilizados para la caracterización de los parámetros de entrada tales como la demanda eléctrica, producción de parques eólicos y fotovoltaicos, consideraron información histórica de cierre al año 2023 del mercado eléctrico peruano; mientras que los datos de características y restricciones técnicas de los BESS y plantas de generación hidroeléctrica con embalse y termoeléctrica, se tomaron valores referenciales de publicaciones indexadas.

Cabe destacar que la presente investigación ha implementado un modelo flexible en cuanto a los datos de entrada, es decir, el investigador podría modelar e introducir otros datos dependiendo de las condiciones de oferta, demanda y/o restricciones técnicas de las centrales de generación. Asimismo, a partir del modelamiento presentado se podrían hacer variaciones y adecuaciones en cuanto a considerar restricciones en las redes de transmisión entre otros, según el sistema eléctrico que necesite analizar.

3.2.1 Demanda Eléctrica Horaria

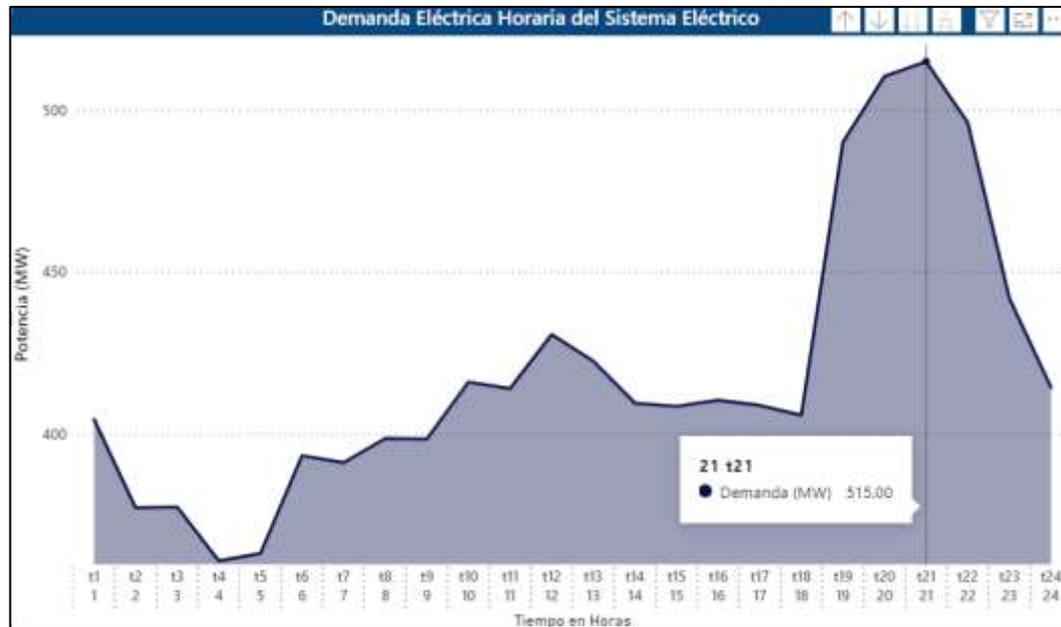
La demanda eléctrica será en resolución horaria (horas) y se modelará en tres barras del sistema eléctrico (Barra 4, Barra 5 y Barra 6) – que en teoría representa el porcentaje de demanda eléctrica en el norte, centro y sur de nuestro país – para fines de modelamientos y simulaciones se ha considerado una caracterización de carga donde la máxima demanda se encontrará en Horas Punta. Los valores y gráfica se muestran en la Tabla 3.2 y Figura 3.1:

Tabla 3.2.
Demanda Eléctrica horaria – Potencia

Tiempo	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6	Total
t1	0	0	0	71	236	98	404
t2	0	0	0	66	220	92	377
t3	0	0	0	66	220	92	377
t4	0	0	0	63	210	88	361
t5	0	0	0	63	211	88	363
t6	0	0	0	69	229	95	393
t7	0	0	0	68	228	95	391
t8	0	0	0	70	232	97	399
t9	0	0	0	70	232	97	398
t10	0	0	0	73	242	101	416
t11	0	0	0	72	241	100	414
t12	0	0	0	75	251	105	431
t13	0	0	0	74	246	103	422
t14	0	0	0	72	239	99	409
t15	0	0	0	71	238	99	409
t16	0	0	0	72	239	100	410
t17	0	0	0	71	238	99	409
t18	0	0	0	71	236	98	406
t19	0	0	0	86	285	119	490
t20	0	0	0	89	297	124	510
t21	0	0	0	90	300	125	515
t22	0	0	0	87	289	120	496
t23	0	0	0	77	257	107	442
t24	0	0	0	72	241	101	414

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.1.
Demanda Eléctrica Horaria



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3.2 podemos observar que las máximas demandas de potencia horaria – en el rango de t19 a t22 – en la Barra 4, Barra 5 y Barra 6, se registran valores de 90 MW, 300 y 125 MW. Asimismo, en la Figura 3.1, podemos observar que la máxima demanda coincidente con el sistema eléctrico de 515 MW en el horario t21.

3.2.2 Parque Generador

En las siguientes tablas, se muestran las características técnicas del parque generador:

Tabla 3.3.
Parámetros de entrada de la función de costos de las Centrales Termoeléctricas

Centrales Térmicas					
CT	A	B	C	Pmax	Pmin
CT 1	213	11.7	0.0053	70.0	0.0
CT 2	200	10.3	0.0089	120.0	0.0
CT 3	240	10.8	0.0074	150.0	0.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4.
Parámetros de Entrada de la Centrales Hidroeléctricas

Centrales Hidroeléctricas							
	Q(m ³ /s)	Vinic (MMm ³)	Vfin (MMm ³)	Vmeta (MMm ³)	ε (m ³ /MW)	Smax (m ³)	Smin (m ³)
CH 1	35	250	450	125	3.8	10	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.5.
Parámetros de Entrada y Producción horaria del Parque eólico

Parque Eólico				
	Potencia Efectiva (MW)	Potencia Instalada (MW)	Factor de Planta (%)	Energía (MWh/día)
P.E.	505	765	54	6,500

Producción del Parque Eólico en MW						
Tiempo	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
t1	0	0	0	0	204	0
t2	0	0	0	0	189	0
t3	0	0	0	0	168	0
t4	0	0	0	0	165	0
t5	0	0	0	0	177	0
t6	0	0	0	0	191	0
t7	0	0	0	0	189	0
t8	0	0	0	0	194	0
t9	0	0	0	0	178	0
t10	0	0	0	0	161	0
t11	0	0	0	0	157	0
t12	0	0	0	0	185	0
t13	0	0	0	0	234	0
t14	0	0	0	0	310	0
t15	0	0	0	0	390	0
t16	0	0	0	0	435	0
t17	0	0	0	0	460	0
t18	0	0	0	0	470	0
t19	0	0	0	0	467	0
t20	0	0	0	0	431	0
t21	0	0	0	0	370	0
t22	0	0	0	0	307	0
t23	0	0	0	0	262	0
t24	0	0	0	0	206	0

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2.
Producción del Parque Eólico Horario



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.6.
Parámetros de Entrada y Producción horaria del Parque Fotovoltaico

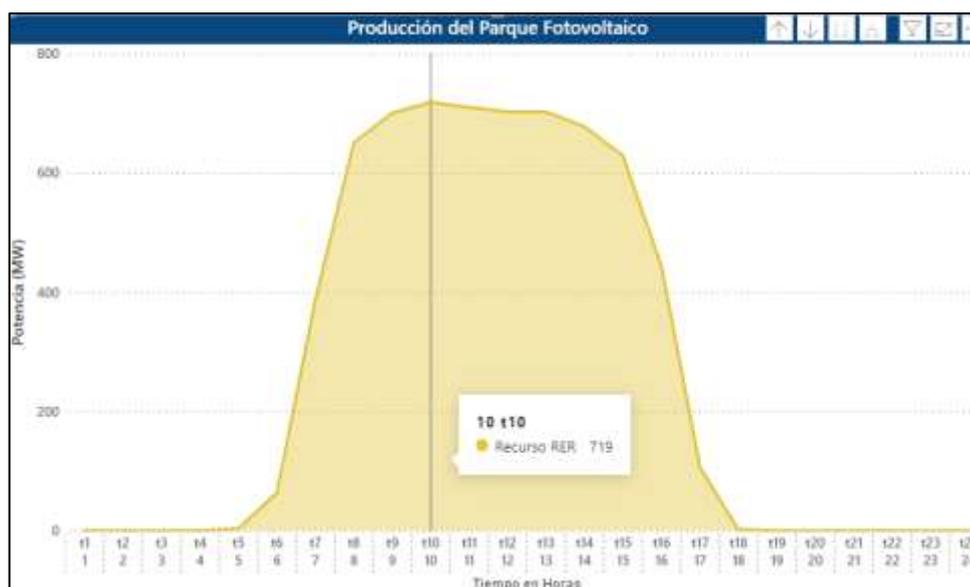
Parque Fotovoltaico				
	Potencia Efectiva (MW)	Potencia Instalada (MW)	Factor de Planta (%)	Energía (MWh/día)
P.S.F	754	943	36	6,500

Producción del Parque Fotovoltaico en MW						
Tiempo	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
t1	0	0	0	0	0	0
t2	0	0	0	0	0	0
t3	0	0	0	0	0	0
t4	0	0	0	0	0	0
t5	0	0	0	0	4	0
t6	0	0	0	0	63	0
t7	0	0	0	0	387	0
t8	0	0	0	0	652	0
t9	0	0	0	0	701	0
t10	0	0	0	0	719	0
t11	0	0	0	0	711	0
t12	0	0	0	0	703	0
t13	0	0	0	0	703	0
t14	0	0	0	0	678	0

Producción del Parque Fotovoltaico en MW						
t15	0	0	0	0	629	0
t16	0	0	0	0	443	0
t17	0	0	0	0	106	0
t18	0	0	0	0	2	0
t19	0	0	0	0	0	0
t20	0	0	0	0	0	0
t21	0	0	0	0	0	0
t22	0	0	0	0	0	0
t23	0	0	0	0	0	0
t24	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3.
Producción del Parque Fotovoltaico Horario



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3.5, se puede observar la como la máxima producción del parque eólico se registra un valor de 470 MW en el rango de t16 a t19; mientras que en la Tabla 3.6 la máxima producción del parque fotovoltaico registra un valor de 719 MW en el rango de t9 a t13. Asimismo, en las Figuras 3.2 y 3.3, se observan que la máxima producción del parque eólico y fotovoltaico se registra en el tiempo t18 y t10, respectivamente. Cabe indicar que, la característica del factor de planta, proporción de la

Potencia Instalada/Potencia Efectiva y perfil de la curva horaria, partieron del análisis de los datos históricos¹⁵ del año 2023 del parque Eólico Wayra y del parque Fotovoltaico Rubí.

En la Tabla 3.7 se muestra los valores de los datos técnicos considerados como parámetros de entrada para el modelamiento de los sistemas de almacenamiento con Baterías (BESS):

Tabla 3.7.
Parámetros de entrada para el modelamiento –BESS

Sistema de Almacenamiento con Baterías							
Datos	SOCini (MW)	SOCmáx (MW)	SOCmin (MW)	Pch_max (MW)	Pdis_max (MW)	nch (%)	ndis (%)
BESS	200	500 - 2500	200	100 - 500	250 -1,250	95	90

Fuente: Características requeridas en base a la producción generada por los parques eólicos y fotovoltaicos. Elaboración propia.

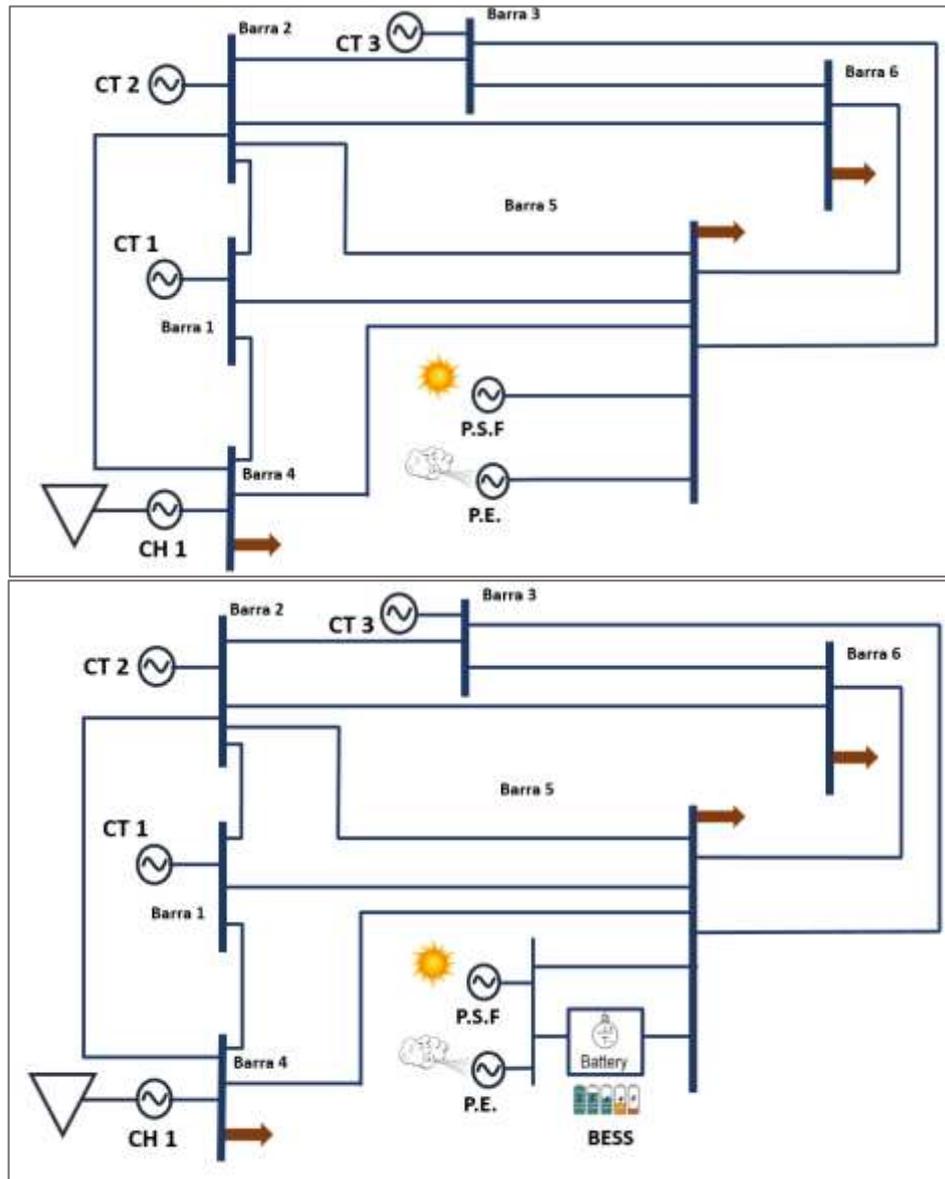
En la Tabla 3.7, cabe indicar que para el SOCmáx de 2500 MW que está asociado a la capacidad del almacenamiento con baterías (BESS) se modelará dicho valor solo para el caso 3, debido que dicho almacenamiento está asociado con la capacidad de potencia del parque fotovoltaico para un óptimo desempeño en el uso del recurso solar.

3.3 Configuración de los sistemas eléctricos en el Modelamiento

Los sistemas eléctricos a modelarse para los casos de estudio en análisis se muestran en las Figuras 3.4, 3.5 y 3.6 para los casos 1,2 y 3; respectivamente:

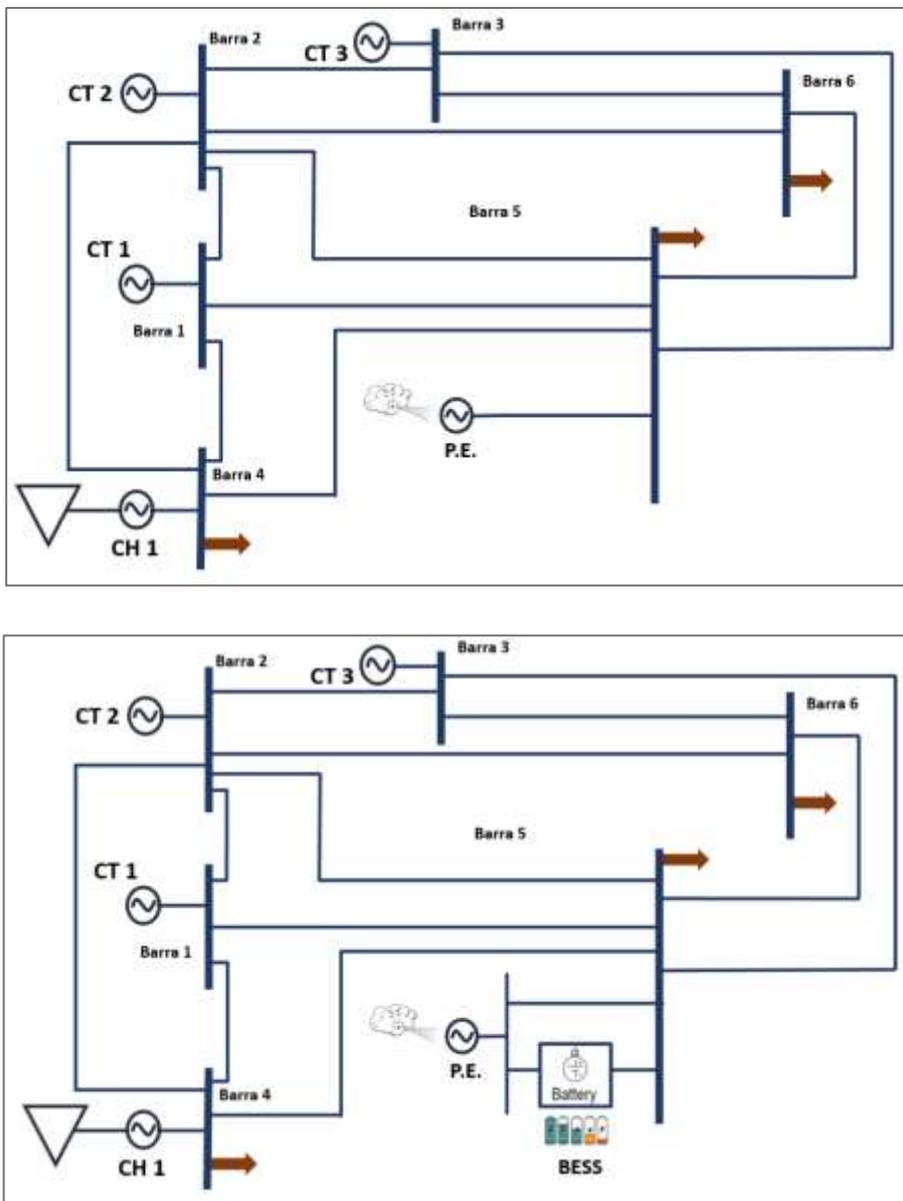
¹⁵ Información PRIE-SIOSEIN: Portal de Remisión de Información del sector eléctrico peruano-Operación del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional. [SEIN](#)

Figura 3.4.
Caso 1: sin BESS y con BESS



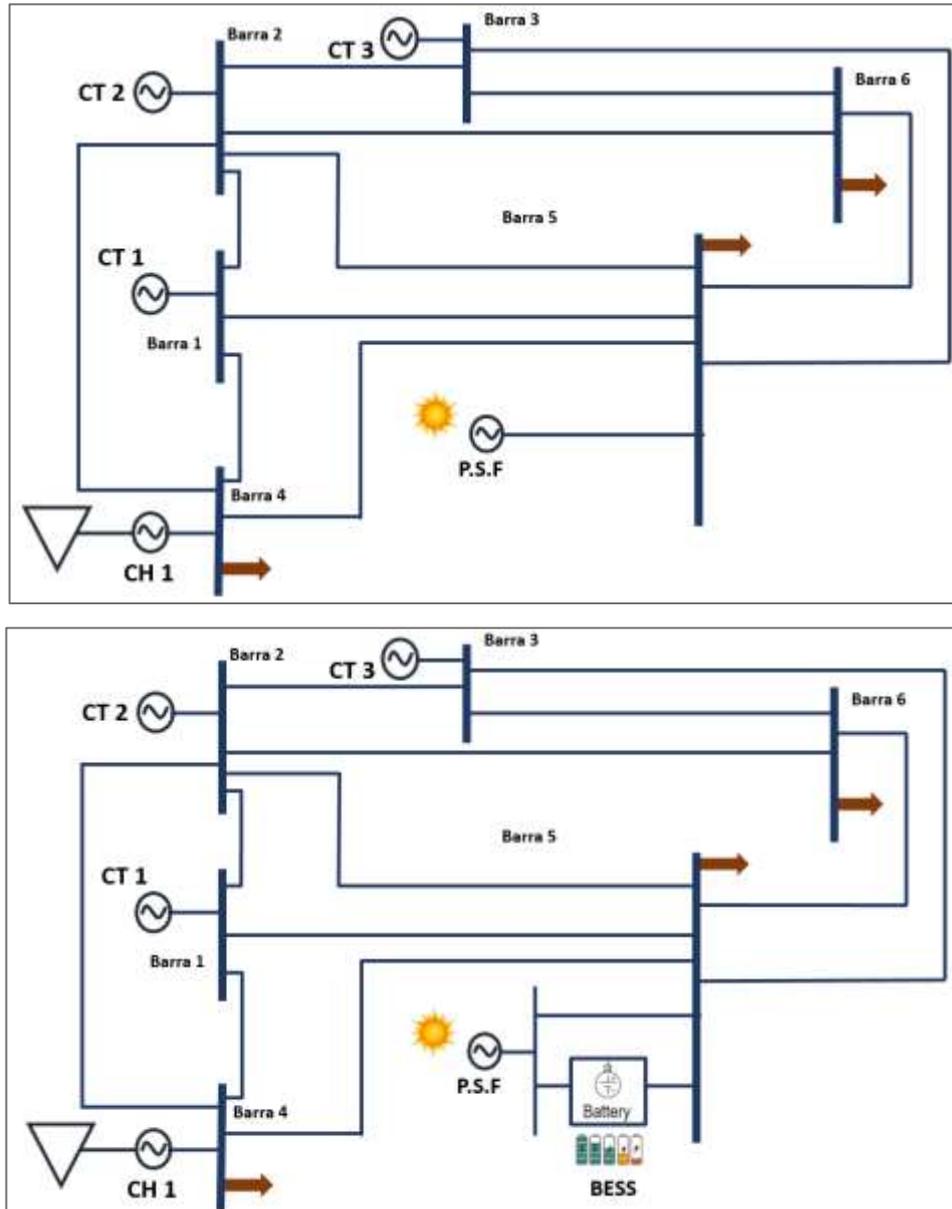
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.5.
Caso 2: sin BESS y con BESS



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.6.
Caso 3: sin BESS y con BESS



Fuente: Elaboración propia.

3.4 Formulación de las ecuaciones y restricciones de los sistemas de almacenamiento con baterías y su integración con los parques eólicos y fotovoltaicos

Actualmente, en el modelo de despacho económico de corto plazo (“Modelo Yupana”) utilizado por el COES, no se modela los sistemas de almacenamiento con baterías integrados a los parques eólico y fotovoltaicos, debido a que no existe normativa ni marco legal en donde las BESS se utilicen como parte de los activos de generación para el despacho económico.

La formulación matemática propuesta está relacionada a resolver un problema cuadrático de optimización, cuyo resultado mediante el solver CONOPT que contiene el software GAMS, optimizará la función objetivo (minimización del costo de operación) y determinará los valores óptimos globales de las potencias del despacho económico del parque de generación y procesos de carga y descarga de los sistemas de almacenamiento integrados a los parques eólico y fotovoltaicos, y su relación: i) directa en el aprovechamiento y gestión del uso eficiente de los recursos renovables variables (eólico y solar) en un rango de 24 horas, e ii) indirecta en la reducción del costo operativo del sistema.

Cabe indicar que el modelo de despacho económico se sustenta en teorías y principios de optimización y economías aplicados al sector energético, que han sido ampliamente documentados en textos académicos de ingeniería eléctrica, control de sistemas eléctricos y teorías de la optimización, siendo algunas fuentes académicas: “Power System Optimization” de Jizhoong Zu, “Modern Power System Analysis” de I. J. Nagrath y D. P. Kothari, y “Power Generation, Operation, and Control” de Allen J. Wood y Bruce F. Wollenberg.

La presente investigación incorpora ERV y nuevas tecnologías como los BESS con la finalidad de cuantificar y analizar el impacto como parte de la evolución de los modelos de despacho económico.

A continuación, se formularán las ecuaciones y restricciones que reflejan el modelamiento de los sistemas de almacenamiento con baterías para mejorar el despacho económico y el uso eficiente de los recursos eólicos y fotovoltaicos:

3.4.1 Ecuación del Estado de Carga de una BESS

La ecuación modela el valor horario del estado de carga de un sistema de almacenamiento con Batería. El Estado de Carga o conocida por su terminología en inglés como “State of Charge (SOC)”, es necesario para la integración de las energías renovables y además es necesario para no afectar la vida útil de las baterías, cuya formulación matemática es la siguiente:

$$SOC_{t+1} = SOC_t + [P_{ch_t} \cdot n_{ch} - \frac{P_{dis_t}}{n_{dis}}] \dots \dots (3.1)$$

Donde:

SOC_t : Estado de Carga en el periodo t

P_{ch_t} : Potencia de Carga de la BESS

P_{dis_t} : Potencia de Descarga de la BESS

n_{ch} : Eficiencia de la BESS en la etapa de Carga

n_{dis} : Eficiencia de la BESS en la etapa de Descarga

3.4.2 Restricciones asociadas a la Potencia de Carga y Descarga de las BESS

La gestión del estado de carga es una parte importante del control de la integración de energías renovables mediante baterías. En el método convencional, cuando el SOC se acerca al valor límite, la potencia de inyectada en la red es constante. En el caso del límite superior de SOC, la potencia inyectada se establece por encima de la salida del generador renovable para que el sistema de almacenamiento se descargue. En caso de límite inferior de SOC, la potencia objetivo constante se establece por debajo de la salida de los generadores con energía renovable para que sistema de almacenamiento se cargue. Por lo tanto, el SOC se gestiona mediante la carga/descarga del BESS, bajo este contexto la

ecuación (11) en conjunto con las siguientes restricciones garantizan la gestión del estado de carga.

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{m\acute{a}x} \dots \dots (3.2)$$

$$0 \leq P_{ch(BESS,t)} \leq 0,2 \cdot SOC_{m\acute{a}x} \dots \dots (3.3)$$

$$0 \leq P_{dis(BESS,t)} \leq 0,5 \cdot SOC_{m\acute{a}x} \dots \dots (3.4)$$

Donde:

SOC_t : Estado de Carga en el periodo t

SOC_{min} : Estado de Carga mínimo

SOC_{max} : Estado de Carga máximo

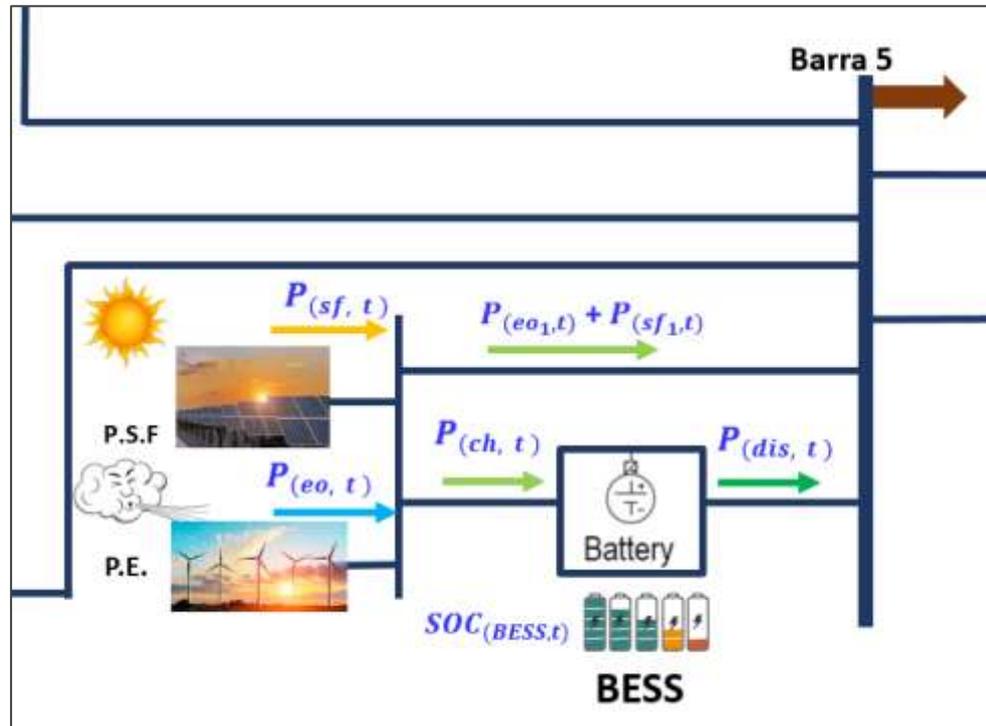
$P_{ch(BESS,t)}$: Potencia de Carga en la BESS en el tiempo t

$P_{dis(BESS,t)}$: Potencia de Descarga de la BESS en el tiempo t

3.4.3 Ecuación que integra la BESS con los parques eólicos y fotovoltaicos

En la presenta investigación tiene como uno de los objetivos específicos integrar los sistemas de almacenamiento con baterías a los parques eólicos y fotovoltaicos. Para ello, se debe modelar la configuración que logre el objetivo específico y su correspondiente formulación matemática, siendo la configuración y formulación matemática las que se muestran en la siguiente Figura y Ecuación:

Figura 3.7.
Configuración del Sistema de Almacenamiento con Batería integrados al parque eólico y/o fotovoltaico



Fuente: Elaboración propia.

Modelamiento matemático:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T BAL_RER_{(N,t)} = \sum_{t=1}^T (P_{(sf,t)} + P_{(eo,t)})$$

$$= \sum_{t=1}^T (P_{(eo1,t)} + P_{(sf1,t)} + P_{(ch,t)}) \dots \dots (3.4)$$

Donde:

$BAL_RER_{(N,t)}$: Balance de la Potencia producida por la generación renovable en el tiempo t y en el Nodo N

$P_{(sf,t)}$: Potencia producida por el parque fotovoltaico en el tiempo t

$P_{(eo,t)}$: Potencia producida por el parque eólico en el tiempo t

P_{ch_t} : Potencia de Carga que se utilizará para almacenarse en la BESS

P_{dis_t} : Potencia de Descarga que entrega la BESS al sistema.

$P_{(eo_1,t)} + P_{(sf_1,t)}$: Potencia óptima de las fuentes RER que no se almacena en la BESS y que inyecta directamente al sistema

Cabe precisar que las BESS solo almacenarán la Potencia de Carga que resulte de la optimización en el modelo de despacho económico, no está modelado para que la BESS tome cargue de la Barra del Sistema para su almacenamiento.

3.5 Implementación del modelamiento de las Bess en el modelo de despacho económico

Antes de presentar la implementación, describiremos las ecuaciones y restricciones que se han modelado:

3.5.1 Ecuación de la Función Objetivo

Esta función minimiza el costo de operación del sistema eléctrico, que, para nuestro caso de investigación, ha integrado los sistemas de almacenamiento con baterías para mejorar el despacho económico y el uso eficiente de los recursos eólicos y solares:

$$\begin{aligned}
 FO &= \text{Min}(Cop_{g,t}) \\
 &= \sum_{U_{CT}=1}^{CT} \sum_{t=1}^T A + B \cdot P_{(U_{CT},t)} + C \cdot P_{(U_{CT},t)}^2 + P_{rac} \cdot \text{Precio}_{Rac} \\
 &\quad + P_{RER_NO_Apr} \cdot \text{Precio}_{LCOS}^{16} \dots \dots (3.5)
 \end{aligned}$$

Donde:

$\text{Min}(Cop_{g,t})$: Minimizar el Costo de Operación del Sistema Eléctrico para el periodo T

U_{CT} : Unidades de Centrales Térmicas

CT : Número de Centrales Térmicas

T : Periodo de tiempo de análisis

A, B, C: Coeficientes de la Función cuadrática de costos de cada Central Térmica

$P_{(U_{CT},t)}$: Potencia activa entregada por las unidades de las centrales térmicas

P_{rac} : Potencia activa de Racionamiento

¹⁶ Cabe indicar que dicho escenario no es parte del análisis ni cuantificación de la tesis; sin embargo, se modela dicho escenario incorporando la componente " $P_{RER_NO_Apr} \cdot \text{Precio}_{LCOS}$ " en la ecuación 3.5 para futuras investigaciones.

$Precio_{Rac}$: Precio de Racionamiento en USD/MWh

$P_{RER_NO_Apr}$: Potencia activa no aprovechable del uso del Recurso eólico y/o solar

$Precio_{LCOS}$: Precio Nivelado de Energía de un BESS en USD/MWh.

Como se puede observar la ecuación matemática de la FO corresponde a función cuadrática de costos que es dada por las centrales termoeléctrica; además se incorpora las penalizaciones de los costos de la energía de racionamiento – en caso no haya suficiente generación para atender a la demanda – y los costos de no aprovechar el Recursos Renovable de manera óptima por falta de almacenamiento en el Sistema Eléctrico – ello corresponde a un escenario futuro en donde las políticas energéticas consideren que el vertimiento de los recursos RER tenga una penalización - por falta de eficiencia en el uso del Recurso y poner en riesgo al sistema por problemas de estabilidad, todo ello por no contar con un BESS integrado al parque eólico y/o fotovoltaico.

3.5.2 Ecuaciones y Restricciones de los límites asociados al parque generador

Para un modelamiento más preciso, se debe considerar las restricciones operativas del parque de generación y de las líneas de transmisión, puesto que estas restricciones en el momento de la operación del sistema influyen en el despacho económico del sistema eléctrico.

Para nuestra investigación se modelaron las siguientes restricciones en el parque de generación y líneas de transmisión:

$$P_{UCT_{min}} \leq P_{UCT} \leq P_{UCT_{max}} \dots \dots \dots (3.6)$$

$$P_{CH_{min}} \leq P_{CH} \leq P_{CH_{max}} \dots (3.7)$$

$$L_{min} \leq L \leq L_{max} \dots (3.8)$$

Donde:

$P_{UCT_{min}}, P_{UCT_{max}}$: Potencia activa mínima y máxima de operación de las centrales térmicas

$P_{CH_{min}}, P_{CH_{max}}$: Potencia activa mínima y máxima de operación de las centrales hidroeléctricas

L_{min}, L_{max} : Capacidad mínima y máxima de operación de las Líneas de Transmisión

Asimismo, se modelaron centrales hidroeléctricas con embalse con la finalidad de que dichas centrales puedan regular de manera eficiente el recurso hídrico durante el despacho económico. A continuación, se muestra la ecuación de continuidad del embalse:

$$V_{t+1} = V_t + 3,6. \left(Q - \frac{P_h}{e} - S \right) \dots \dots (3.9)$$

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \dots \dots (3.10)$$

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max} \dots \dots (3.11)$$

Donde:

V_t : Volumen del embalse en el tiempo t

Q : Caudal de entrada al Embalse

P_h : Potencia activa de la central hidroeléctrica

e : Coeficiente de Rendimiento de la central hidroeléctrica (MW/m³)

S : Vertimiento

3.5.3 Ecuación de Balance Nodal

Representa el balance entre la generación óptima producto del despacho económico para satisfacer la demanda eléctrica en cada barra e instante de tiempo t.

A continuación, se muestra la formulación matemática mediante la siguiente ecuación: }

$$\sum_{i=1}^N P_{rac} + \sum_{j=1}^{CT} P_{CT_i} + \sum_{k=1}^{CH} P_{CH_j} + \left[\sum_{m=1}^{RER} P_{RER_j} + \sum_{n=1}^{BESS} P_{dis_n} \right] = D + \sum_{k=1}^{L_k} L_k + \text{pérdidas} \dots \dots (3.12)$$

Donde:

$\sum_{i=1}^N P_{rac}$: Suma de Potencia Activa de Racionamiento en cada Nodo

$\sum_{j=1}^{CT} P_{CT_i}$: Suma de la Potencia Activa de la generación térmica

$\sum_{k=1}^{CH} P_{CH_j}$: Suma de la Potencia Activa de la generación hidroeléctrica

$\sum_{m=1}^{RER} P_{RER_j}$: Suma de la Potencia Activa RER que inyecta directo a la barra del sistema

$\sum_{n=1}^{BESS} P_{dis_n}$: Suma de la Potencia Activa que descarga el almacenamiento (BESS)

Como se puede observar en la ecuación 3.12, la componente que se encuentra en corchetes, representa la formulación matemática de la optimización del uso del recurso RER (eólico y/o solar) mediante el uso de los sistemas de almacenamiento con baterías, el cual está compuesto por la optimización de la entrega de Potencia activa de la RER al sistema y de la Potencia de descarga de la BESS al sistema con la finalidad de minimizar la función objetivo.

3.5.4 Diagrama de Flujo

En el Anexo 2, se muestra el flujograma donde se describe el proceso de optimización del despacho económico considerando la integración de las BESS a los parques eólicos y fotovoltaicos.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Con la finalidad de verificar el modelamiento de los sistemas de almacenamiento con baterías integradas a los parques eólicos y fotovoltaicos, que optimiza el despacho económico de un sistema eléctrico y el uso eficiente de los recursos eólico y solar en la matriz de electricidad, se han realizado comparaciones de los Costos de Operación del sistema eléctrico y la potencia óptima del uso de los recursos renovables variable (ERV) con y sin la integración de los sistemas de almacenamiento con baterías; que serán resultados de la solución del problema de optimización mediante el solver CONOPT que utiliza el software GAMS.

4.1 Análisis de resultados de la investigación

A continuación, se analizarán los resultados de minimizar el costo de operación del sistema eléctrico mediante la optimización de los recursos energéticos para la generación eléctrica y el proceso de carga/descarga de los sistemas de almacenamiento con Baterías, para los tres casos en análisis. Los resultados se han obtenido a partir del modelamiento matemático y simulación con el software GAMS, el cual mediante el solver CONOPT dará como resultado el vector solución del modelo de despacho económico que minimizará el costo de operación del sistema eléctrico.

4.1.1 Caso 1

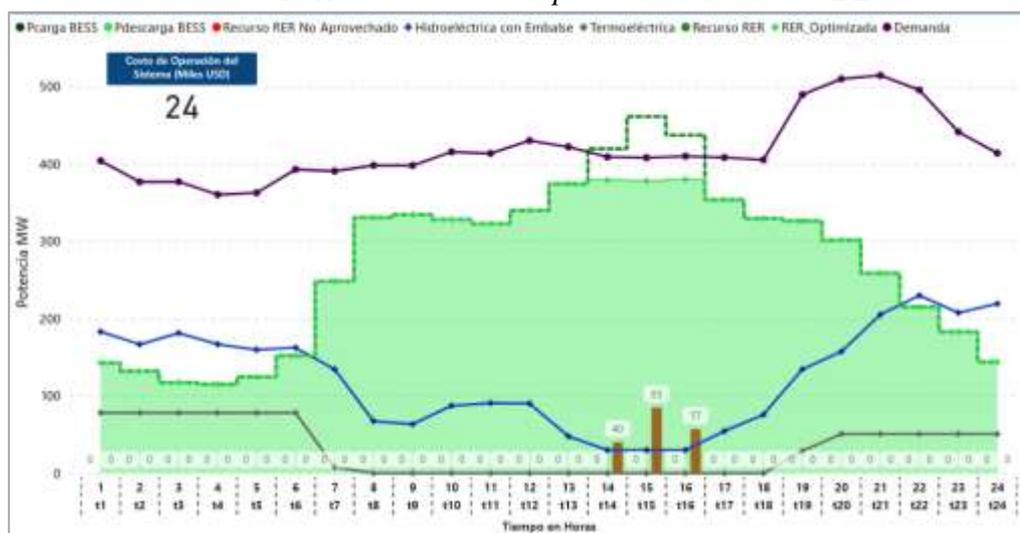
a) SIN integración de las BESS al parque eólico y fotovoltaico.

En la figura 4.1, se muestran los resultados de la simulación del modelamiento del sistema eléctrico SIN considerar los sistemas de almacenamiento con Baterías (BESS) – integradas al parque eólico y fotovoltaico – los cuales, han resultado en un costo de operación del sistema eléctrico de 24 Mil USD y 182 MWh de recurso eólico y solar no aprovechable para el sistema – *cuando el “Recurso RER” (oferta) es mayor que la demanda eléctrica* – originado vertimiento en el rango de tiempo [t14 al t16] que

representa un 2,8% de la producción total aprovechable del recurso RER generado por el parque eólico y solar.

Figura 4.1.

Caso 1: Resultados del despacho económico sin BESS



Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, de la Figura 4.1 podemos observar como la generación termoeléctrica participa en el despacho económico en el rango de tiempo [t19 a t 24] – *dentro de las horas de máxima demanda eléctrica (Horas Punta)* – debido a que no es suficiente la generación hidroeléctrica y RER para satisfacer la demanda eléctrica.

Por otra parte, en el rango de [t14 a t16], hay parte del “Recurso RER” que no es aprovechado por el parque eólico y fotovoltaico ni por el sistema, originando vertimiento – *y ello ocurre debido a que en dicho rango la central hidroeléctrica debe operar dentro de su mínimo técnico de generación (30 MW) por 3 horas* – equivalente a un total de 90 MWh (49%) de los 182 MWh del “Recurso RER no aprovechable”.

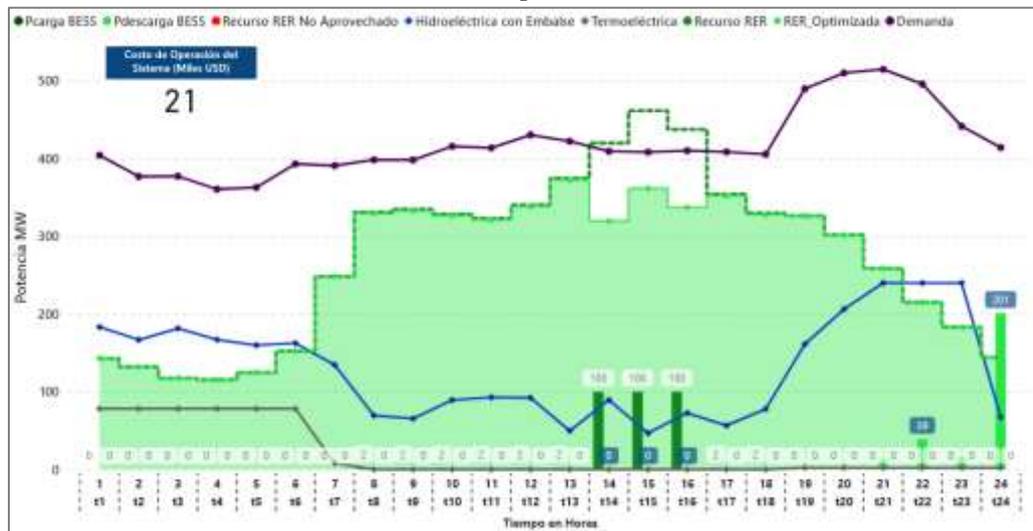
b) CON integración de las BESS al parque eólico y fotovoltaico.

En la figura 4.2, se muestran los resultados de simulación del modelamiento del sistema eléctrico considerando los sistemas de almacenamiento con Baterías (BESS) – integradas al parque eólico y fotovoltaico – los cuales, han resultado en un costo de operación del sistema eléctrico de 21 Mil USD y 316 MWh de óptimo aprovechamiento

del recurso eólico y solar que se almacena en el BESS en el rango de tiempo [t8 al t18], representando un 4,9% de la producción total aprovechable del “Recurso RER” que genera el parque eólico y fotovoltaico. Es decir, dicho recurso RER aprovechado, se almacena en el BESS como “Potencia de Carga” para su posterior gestión óptima en las horas de máxima demanda del sistema eléctrico, mediante la “Potencia de Descarga” permitiendo disminuir el costo de operación del sistema al reducir la participación de la generación termoeléctrica en el despacho económico. En ese sentido, en el rango [t21 al t24] que se encuentra dentro de las horas de máxima demanda, se observa que la BESS descarga 270 MWh de energía almacenada en una gestión óptima de 4 horas, quedando en la BESS un valor en energía de 46 MWh de “Recurso RER” aprovechado, que podrán ser utilizados de manera óptima y eficiente en la siguiente etapa de tiempo, mejorando de esta manera el despacho económico.

Cabe precisar que, en este caso el recurso aprovechado RER para el almacenamiento de la BESS es mayor a los 182 MWh del “Recurso RER no aprovechado” en el escenario SIN BESS, y ello ocurre debido a que en el despacho económico, la generación hidroeléctrica inyecta mayor potencia en el rango de tiempo [t14 y t16] con la finalidad de que la BESS almacene a su máxima capacidad el recurso RER aprovechable (“Potencia de Carga”) para que posteriormente descargue la potencia requerida (“Potencia de Descarga”) de manera óptima y eficiente en los rangos de máxima demanda, permitiendo reducir el costo de operación del sistema. Tal es así que, en las horas de máxima demanda, la energía de descarga de la BESS es de 270 MWh gestionados de manera óptima y eficiente en un rango de 4 horas.

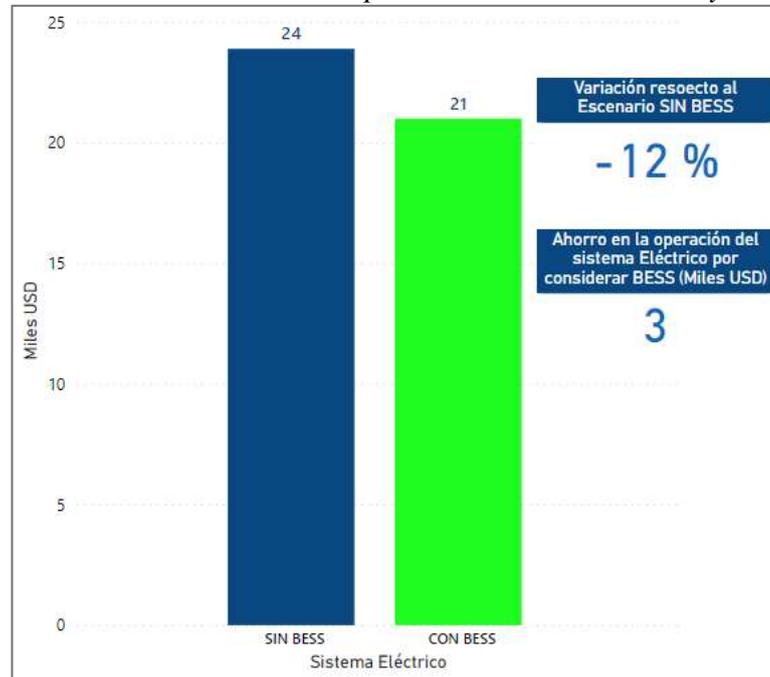
Figura 4.2.
Caso 1: Resultados del despacho económico con BESS



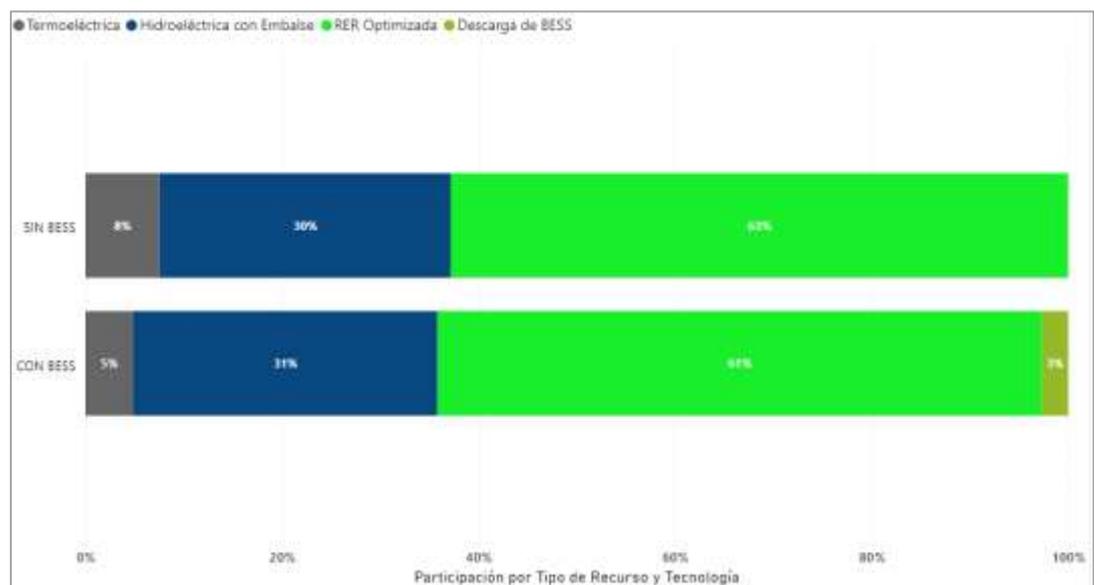
Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, de la Figura 4.2. podemos observar como la generación termoeléctrica ha disminuido considerablemente su participación en el despacho económico en el rango de tiempo [t19 a t 24] – *rango de máxima demanda eléctrica (Horas Punta)* – con respecto al escenario SIN BESS, ello debido a que en dicho rango la BESS descarga “Potencia de Descarga” la energía almacenada para minimizar el costo de operación del sistema.

En consecuencia, se obtuvo una reducción de -12% y un beneficio (ahorro) de 3 Mil USD con respecto al costo de operación del sistema, ello bajo el escenario CON BESS integrado a los parques eólicos y fotovoltaicos en el modelo de despacho económico frente al escenario SIN BESS, tal como, se muestra en la figura 4.3:

Figura 4.3.*Caso 1: Resultados del Costo de Operación del Sistema: SIN y CON BESS**Fuente:* Elaboración propia.

Además, con la integración de la BESS, se logra una mayor participación del recurso renovable en la matriz de electricidad, disminuyendo la participación de la generación termoeléctrica; tal como se observa en la figura 4.4:

Figura 4.4.*Caso 1: Matriz de Electricidad**Fuente:* Elaboración propia.

En consecuencia, en la figura 4.4 podemos observar como la participación en el despacho de las centrales térmicas en la matriz de electricidad disminuyó en 3% respecto al caso “SIN BESS”, ello debido a la participación de las BESS para mejorar el despacho económico en el uso eficiente del recurso eólico y solar.

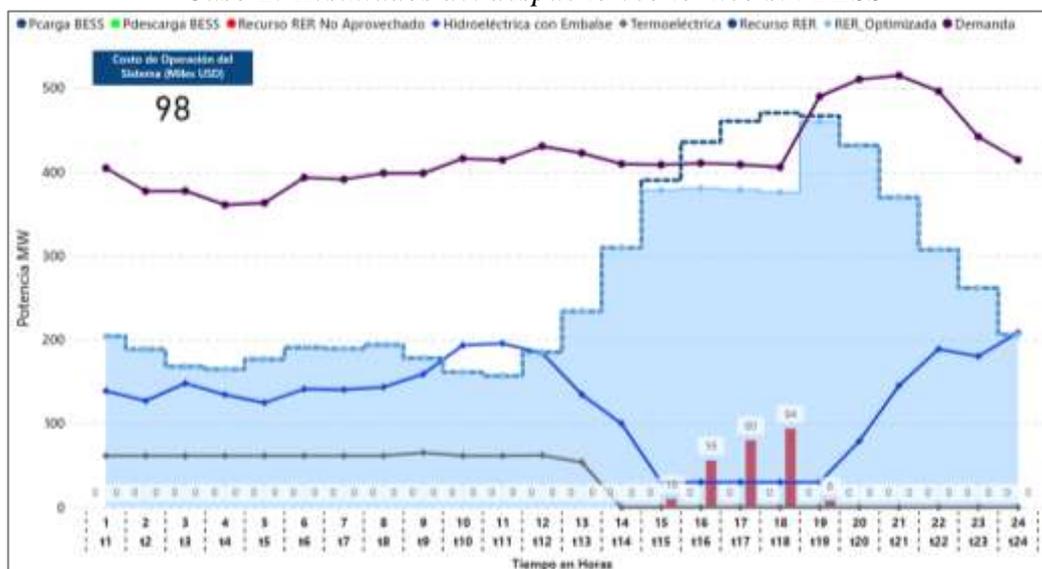
4.1.2 Caso 2

c) SIN integración de las BESS al parque eólico.

En la figura 4.5, se muestran los resultados de la simulación del modelamiento del sistema eléctrico SIN considerar los sistemas de almacenamiento con Baterías (BESS) – integrados al parque eólico – los cuales, han resultado en un costo de operación del sistema eléctrico de 24 Mil USD y 248 MWh de recurso eólico no aprovechable para el sistema – cuando el “Recurso RER” (oferta) es mayor que la demanda eléctrica – originado vertimiento en el rango de tiempo [t15 al t18] que representa un 3,8% de la producción total aprovechable del recurso RER generado por el parque eólico.

Figura 4.5.

Caso 2: Resultados del despacho económico sin BESS



Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, de la Figura 4.5 podemos observar que no hay participación de la generación termoeléctrica en el despacho económico en el rango de tiempo [t14 a t 24] –

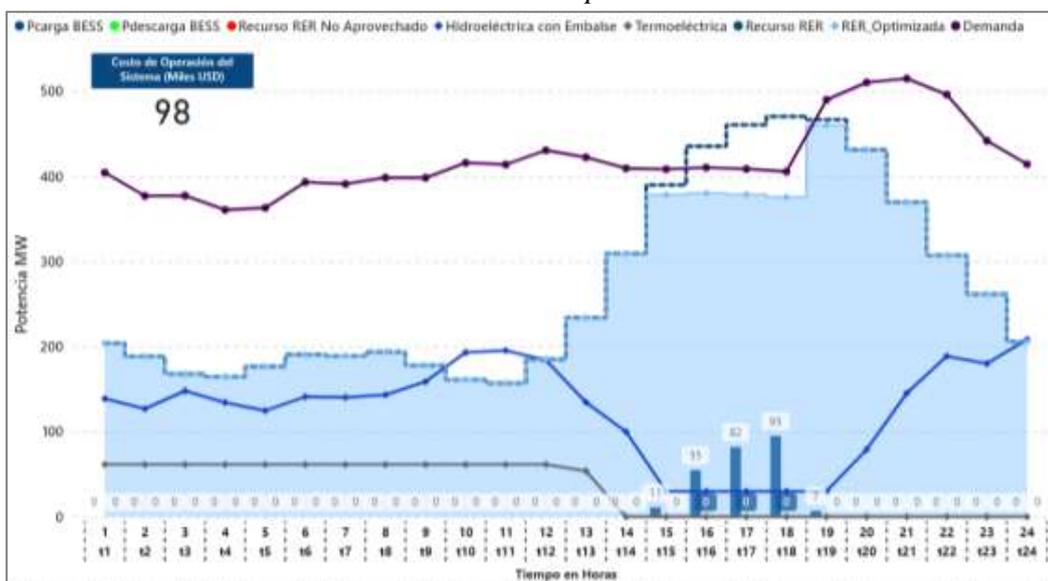
dentro de las horas de máxima demanda eléctrica (Horas Punta) – debido a que hay suficiente generación hidroeléctrica y RER (ambos de costo variable total cero) para satisfacer la demanda eléctrica.

Por otra parte, en el rango de [t15 a t19], hay parte del “Recurso RER” que no es aprovechado por el parque eólico ni por el sistema, originando vertimiento – *y ello ocurre debido a que en dicho rango la central hidroeléctrica debe operar dentro de su mínimo técnico de generación (30 MW) por 3 horas – equivalente a un total de 150 MWh (60%) de los 248 MWh del “Recurso RER no aprovechable”.*

d) CON integración de las BESS al parque eólico.

En la figura 4.6, se muestran los resultados de la simulación del modelamiento del sistema eléctrico considerando los sistemas de almacenamiento con Baterías (BESS) – integrados al parque eólico – los cuales, han determinado en un costo de operación del sistema eléctrico de 21 Mil USD y 250 MWh de óptimo de aprovechamiento del recurso eólico que se almacena en el BESS en el rango de tiempo [t15 al t19], representando un 3,8% de la producción total aprovechable del “Recurso RER” que genera el parque eólico. Es decir, dicho recurso RER aprovechado, se almacena en el BESS como “Potencia de Carga” para su posterior gestión óptima, en las horas de máxima demanda del sistema eléctrico, en donde permita disminuir el costo de operación del sistema al reducir la participación de la generación termoeléctrica en el despacho económico. En ese sentido, se observa que la BESS no descarga la energía almacenada en ningún rango del tiempo, quedando almacenados en la BESS los 250 MWh del “Recurso RER” aprovechado, que podrán ser utilizados de manera óptima y eficiente en la siguiente etapa de tiempo.

Figura 4.6.
Caso 2: Resultados del despacho económico con BESS



Fuente: Elaboración propia.

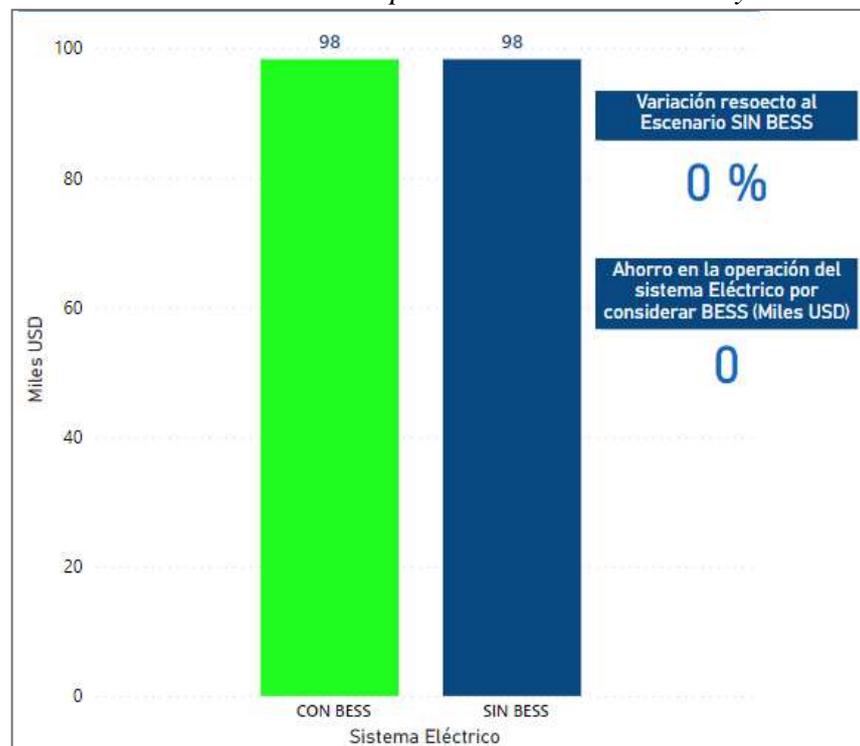
Cabe precisar que, en este caso el recurso aprovechado RER para el almacenamiento de la BESS es ligeramente mayor a los 248 MWh en el escenario SIN BESS, y ello ocurre debido a que en el despacho económico, en el rango de tiempo [t15 a t19] existe excedente de “Recurso RER” (eólico) y la central hidroeléctrica debe operar a su mínimo técnico (30 MW), por lo que es óptimo aprovechar todo el recurso eólico (variable) para la generación de parque eólico con la finalidad de que el agua del embalse de la central hidroeléctrica se utilice en otras horas de mayor demanda, y que el excedente de “Recurso RER” eólico en dicho rango, se almacene en la BESS mediante “Potencia de Carga” para que posteriormente se descargue como “Potencia de descarga” en los rangos de horas de máxima demanda, permitiendo disminuir el costo de operación del sistema. No obstante, en este escenario no hay la necesidad de que la BESS inyecte energía en un rango de tiempo; puesto que hay suficiente generación hidroeléctrica y eólica para atender la demanda eléctrica en las 24 horas, no siendo necesario suministrar “Potencia de Descarga” en el sistema eléctrico.

Asimismo, de la Figura 4.7. podemos observar que el despacho de generación hidroeléctrica y termoeléctrica no ha variado en el rango de [t1 al t24], no obstante, al mejorar el despacho económico, la BESS aprovecha en almacenar la potencia del recurso

eólico en el rango de tiempo [t15 a t19] para ser utilizado en una posterior etapa en donde la demanda eléctrica y las condiciones del sistema requiera, mejorando de esta manera el despacho económico.

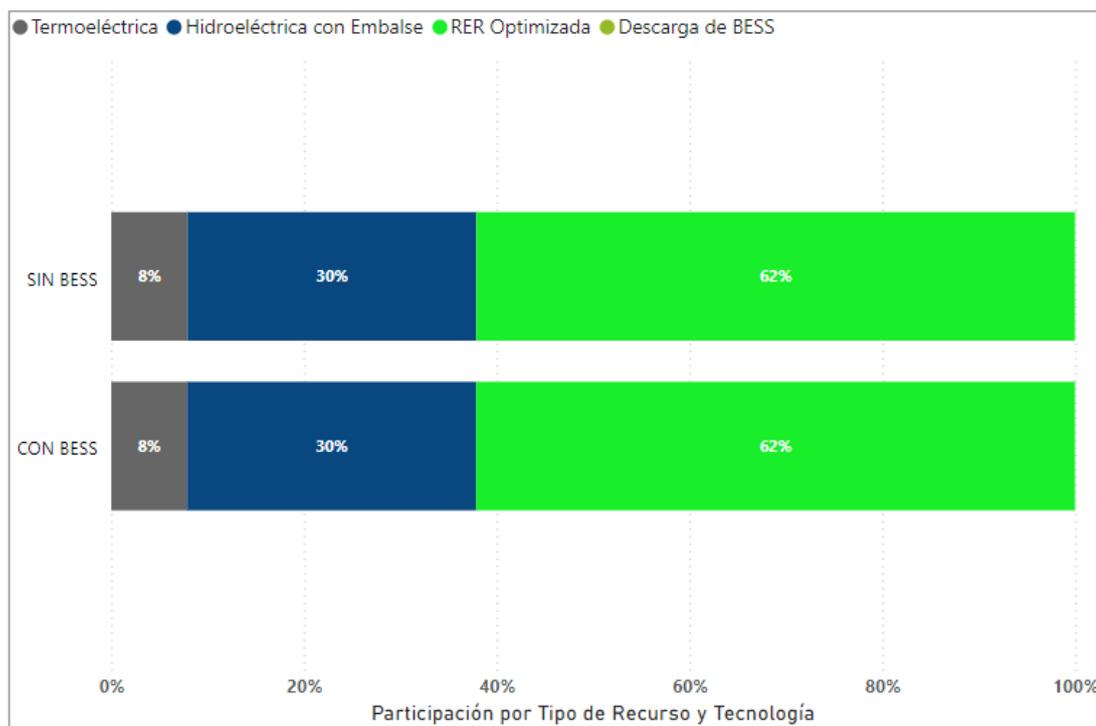
En consecuencia, no se obtuvo una reducción ni tampoco un beneficio (ahorro) con respecto al costo de operación del sistema SIN BESS.

Figura 4.7.
Caso 2: Resultados del Costo de Operación del Sistema: SIN y CON BESS



Fuente: Elaboración propia.

Para este caso, con la integración de la BESS, no se observa ninguna variación en la participación del recurso renovable en la matriz de electricidad, con respecto a la matriz de electricidad del escenario SIN BESS; tal como se observa en la figura 4.8:

Figura 4.8.*Caso 2: Matriz de Electricidad*

Fuente: Elaboración propia.

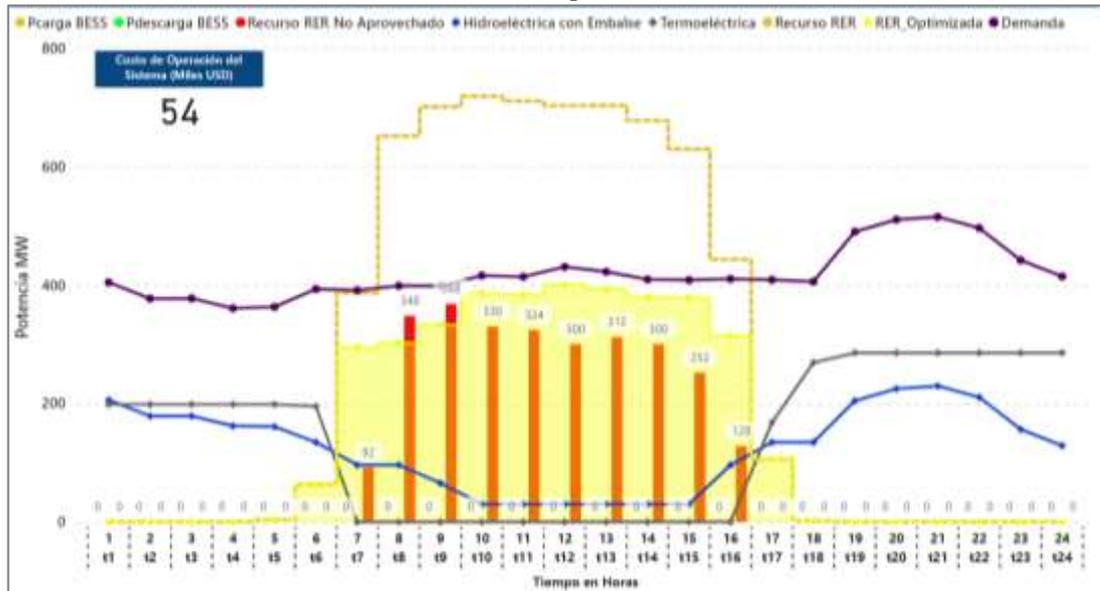
En la figura 4.8 podemos observar como la matriz de electricidad no ha tenido variación respecto al caso “SIN BESS”.

4.1.3 Caso 3

e) SIN integración de las BESS al parque fotovoltaico.

En la figura 4.9, se muestran los resultados de la simulación del modelamiento del sistema eléctrico SIN considerar los sistemas de almacenamiento con Baterías (BESS) – integrados al parque fotovoltaico – los cuales, han resultado en un costo de operación del sistema eléctrico de 54 Mil USD y 2,754 MWh de recurso solar no aprovechable para el sistema – cuando el “Recurso RER” (oferta) es mayor que la demanda eléctrica – originado vertimiento en el rango de tiempo [t7 al t16] que representa un 42% de producción total aprovechable del “Recurso RER” generado por el parque fotovoltaico.

Figura 4.9.
Caso 3: Resultados del despacho económico sin BESS



Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, de la Figura 4.9 podemos observar como la generación termoeléctrica participa en el despacho económico en el rango de tiempo [t17 a t 24] – *dentro de las horas de máxima demanda eléctrica (Horas Punta)* – debido a que no es suficiente la generación hidroeléctrica y fotovoltaica, complicándose la situación a partir del t18 por la inexistencia del recurso solar para la generación del parque fotovoltaico para satisfacer la demanda eléctrica, teniendo que cubrir con generación hidroeléctrica de embalse que optimizará al máximo su recurso para evitar racionamientos en el sistema y a la vez permita un mínimo costo de operación del sistema.

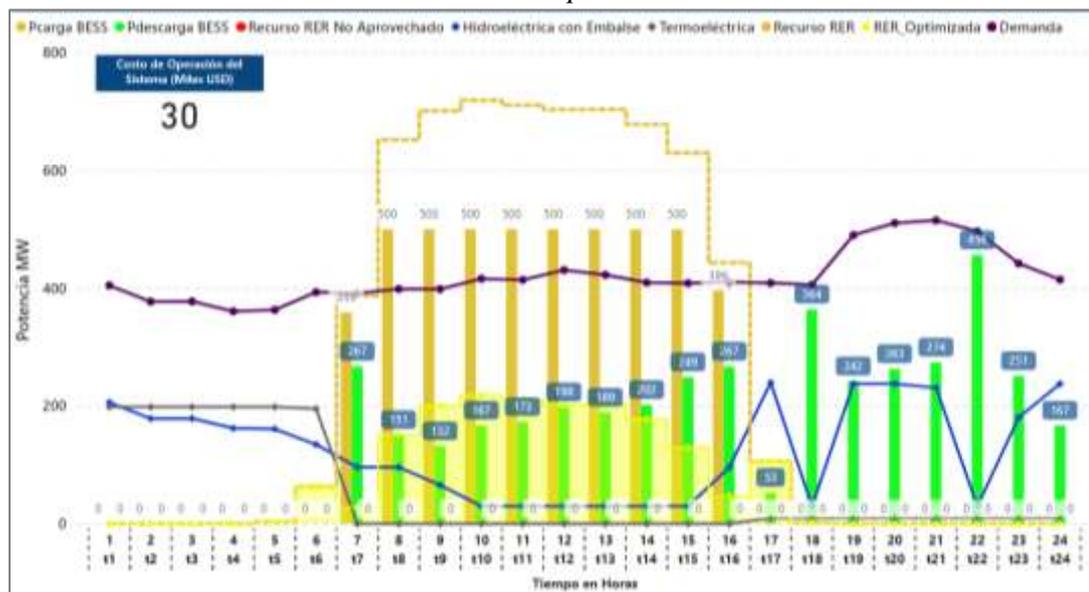
f) CON integración de las BESS al parque fotovoltaico.

En la figura 4.10, se muestran los resultados de la simulación del modelamiento del sistema eléctrico considerando los sistemas de almacenamiento con Baterías (BESS) – integrados al parque fotovoltaico – los cuales, han resultado en un costo de operación del sistema eléctrico de 30 Mil USD y 4,755 MWh de óptimo de aprovechamiento del recurso solar que se almacena en el BESS en el rango de tiempo [t7 al t16], representando un 73% de la producción total aprovechable del “Recurso RER” que genera el parque fotovoltaico. Es decir, dicho recurso RER aprovechado, se almacena en la BESS como

“Potencia de Carga” para su posterior gestión óptima cuando así lo requiera el sistema eléctrico mediante la “Potencia de Descarga” en las horas en las horas de máxima demanda del sistema eléctrico, mediante la “Potencia de Descarga” permitiendo disminuir el costo de operación del sistema al reducir la participación de la generación termoeléctrica en el despacho económico. En ese sentido, en el rango [t7 al t24] que se encuentra dentro de las horas de máxima demanda, se observa que la BESS descarga 4,065 MWh de energía almacenada en una gestión óptima de 18 horas, quedando en la BESS un valor en energía de 690 MWh de “Recurso RER” aprovechado, que podrán ser utilizados de manera óptima y eficiente en la siguiente etapa de tiempo, mejorando de esta manera el despacho económico.

Figura 4.10.

Caso 3: Resultados del despacho económico con BESS



Fuente: Elaboración propia.

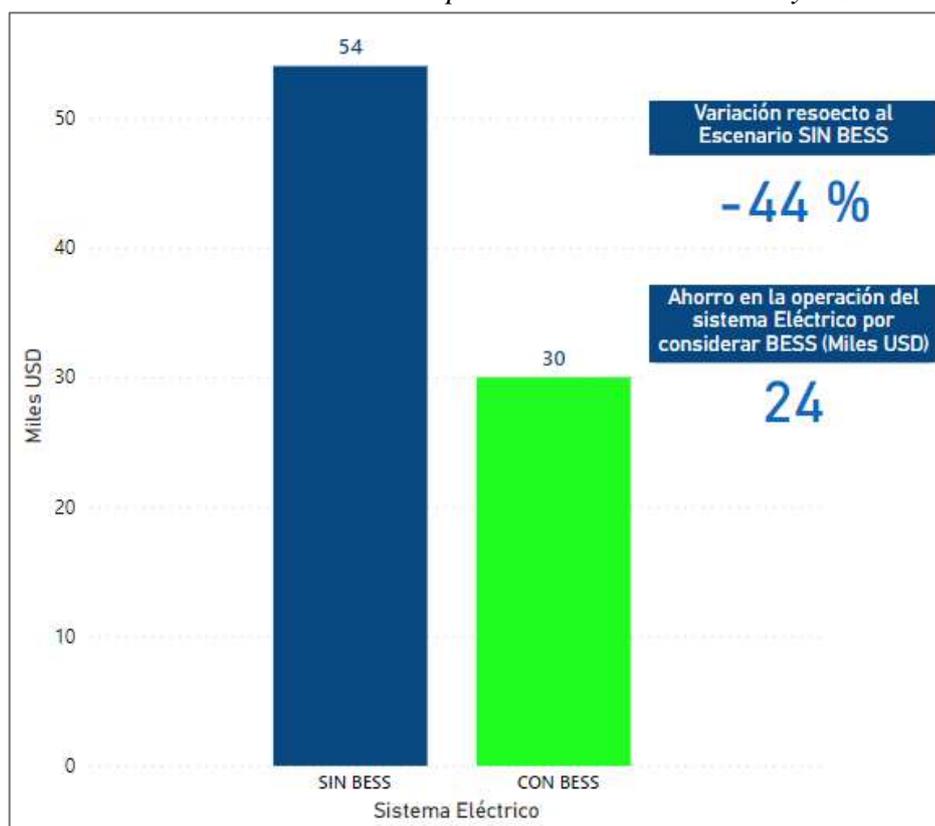
Asimismo, de la Figura 4.10. podemos observar como la generación termoeléctrica no participa en el despacho económico en el rango de tiempo [t16 al t24] – rango de máxima demanda eléctrica (Horas Punta) – con respecto al escenario SIN BESS con respecto al escenario SIN BESS, ello debido a que el modelo de los sistemas de almacenamiento con baterías optimiza el proceso de carga y descarga de la BESS con la finalidad de mejorar el despacho económico y la minimización del costo de operación del sistema. En ese sentido, podemos observar que en las etapas de [t7 a t16] la BESS

carga y descarga a la vez, con la finalidad de almacenar mayor energía RER (aprovechando el gran recurso solar excedente en el rango donde la oferta es mayor que la demanda); y a partir de la etapa [t17 a t24], la BESS empieza a gestionar de manera óptima y eficiente la energía almacenada en el rango de tiempo [t7 a t16].

En consecuencia, se obtuvo una reducción de -44% y un beneficio (ahorro) de 24 Mil USD con respecto al costo de operación del sistema, ello bajo el escenario CON BESS integrado al parque fotovoltaico en el modelo de despacho económico frente al escenario SIN BESS, tal como, se muestra en la figura 4.11:

Figura 4.11.

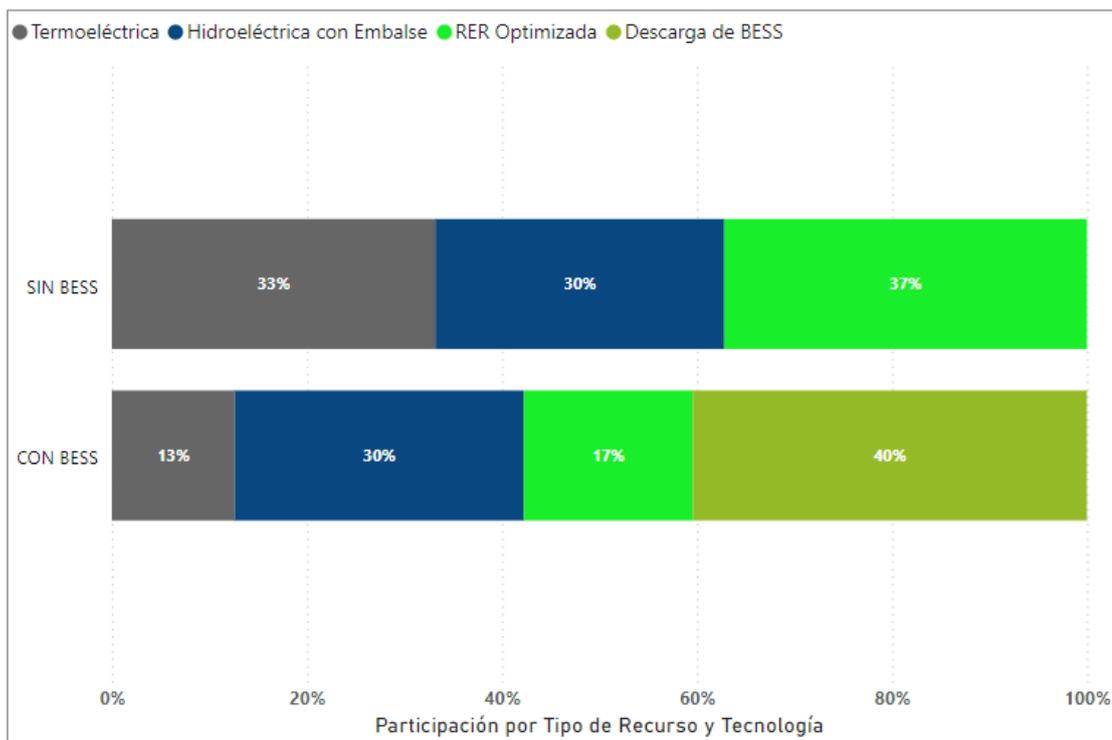
Caso 3: Resultados del Costo de Operación del Sistema: SIN y CON BESS



Fuente: Elaboración propia.

Además, con la integración de la BESS, se logra una mayor participación del recurso renovable en la matriz de electricidad, disminuyendo la participación de la generación termoeléctrica; tal como se observa en la figura 4.12:

Figura 4.12.
Caso 3: Matriz de Electricidad



Fuente: Elaboración propia.

En consecuencia, en la figura 4.12 podemos observar como la participación en el despacho de las centrales térmicas en la matriz de electricidad disminuyó en 20% respecto al caso “SIN BESS”, ello debido a la participación de las BESS para mejorar el despacho económico en el uso eficiente del recurso solar.

4.2 Discusión de resultados

Con los resultados obtenidos en el numeral 4.4, se puede verificar que los sistemas de almacenamiento con Baterías (BESS) tienen un impacto y beneficio para la operación y gestión del uso eficiente de los recursos eólico y solar.

El beneficio de integrar el uso de las BESS en los parques eólicos y fotovoltaicos, se hace más notorio en un escenario de alta inserción de renovable y con altos excedentes de producción en horas donde la oferta (parque de generación eólico y/o solar) es mayor que la demanda eléctrica, como en el Caso 3, en donde el recurso no aprovechable supera

el 50% de la producción total del parque fotovoltaico, impactando en una reducción del costo de la operación del sistema en -44% respecto a un escenario sin BESS.

Asimismo, un beneficio adicional de incorporar los BESS, se evidencia en una mayor participación del recurso eólico y solar en la matriz de electricidad, puesto que al mejorar el despacho económico modelando los sistemas de almacenamiento con baterías integrado a los parques eólicos y fotovoltaicos, permite que la energía almacenada en la BESS se descargue de manera eficiente en las horas donde minimice el costo de operación del sistema eléctrico. En consecuencia, la potencia de descarga que inyecta la BESS en las horas de mayor costo de operación para el sistema, hará que la generación termoeléctrica se reduzca en el despacho, teniendo como resultado un menor costo de operación en el sistema, una mayor participación de los recursos renovables (eólico y solar), un mejor uso y gestión de los recursos energéticos utilizados para la generación de electricidad; disminuyendo la generación con altos costos de generación por el uso de recursos diésel o Gas Natural, y las cuales están asociadas a un alto impacto de emisiones de CO₂.

Finalmente, cabe mencionar que el impacto en el costo de operación del sistema sería mayor, si en un futuro se establecieran políticas energéticas o cambios normativos, en donde se penalice la cantidad de energía del recurso no aprovechable (ineficiencia del uso del recurso) y que por ende ocasione inestabilidad al sistema por falta de un BESS integradas a los parques eólicos y fotovoltaicos. Dicha penalización estaría asociado al precio equivalente estimado del costo nivelado de un BESS, para garantizar como mínimo su CAPEX y OPEX.

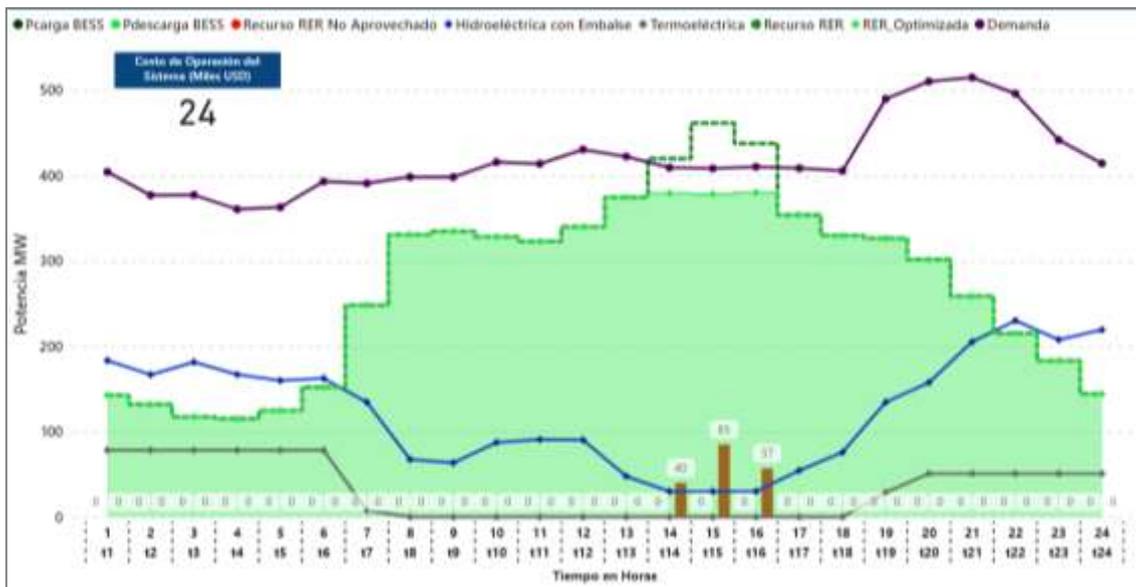
4.3 Contrastación de las hipótesis formuladas

Para contrastar la primera hipótesis específica (H1) y segunda hipótesis específica (H2), que plantean: “*La determinación de la energía de carga en los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos mejora el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar*” y “*La determinación de la energía de descarga en los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos*

y fotovoltaicos mejora el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar.”, respectivamente; se ha realizado simulaciones obteniendo resultados que se verifican al comparar las figuras 4.13 al 4.18, que corresponden al despacho del parque generador, la potencia de carga y descarga de las BESS para los tres casos analizados en los escenarios SIN y CON BESS, y que se analizan en el numeral 4.4:

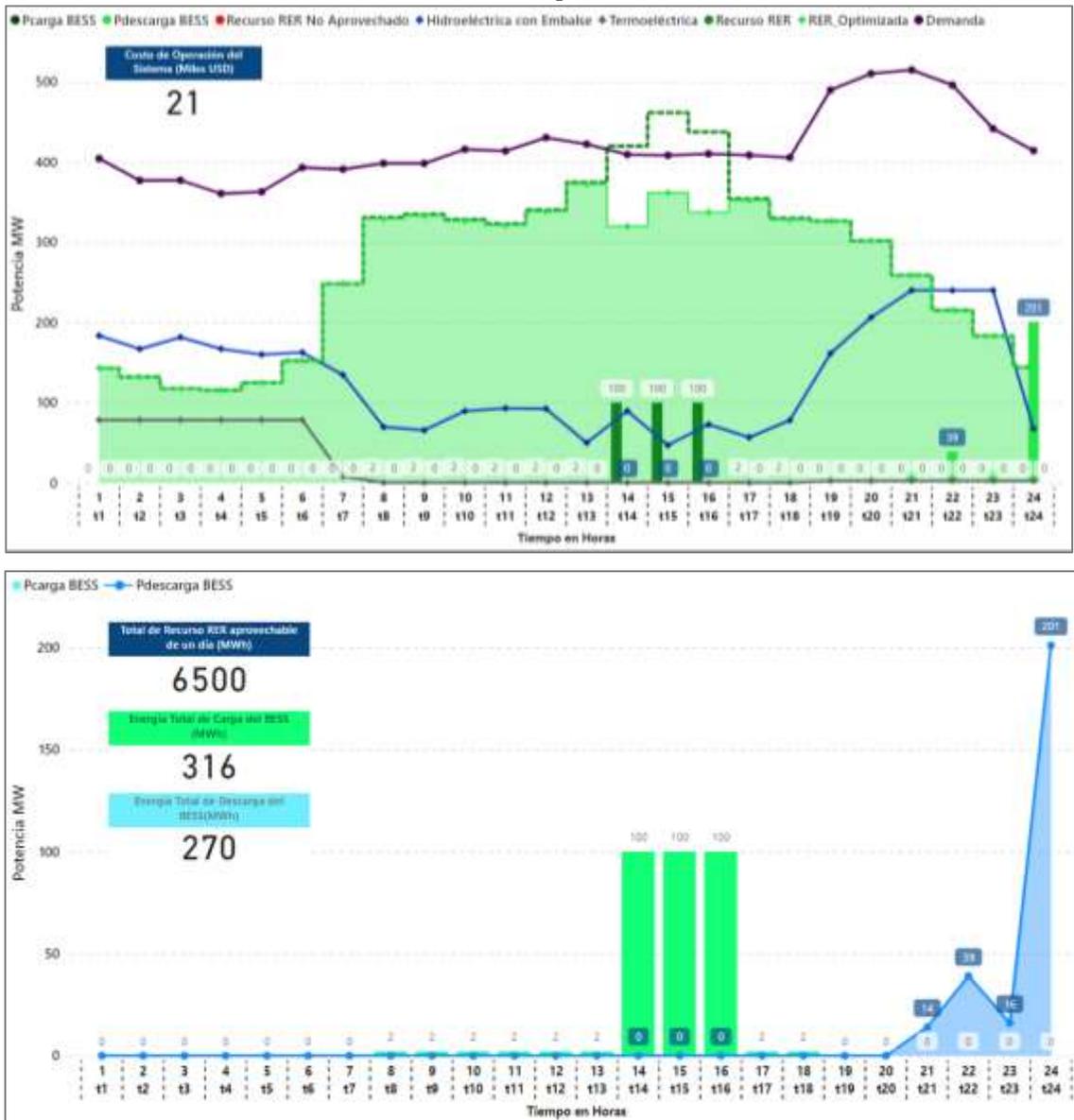
Figura 4.13.

Caso 1: Resultados del despacho económico sin BESS



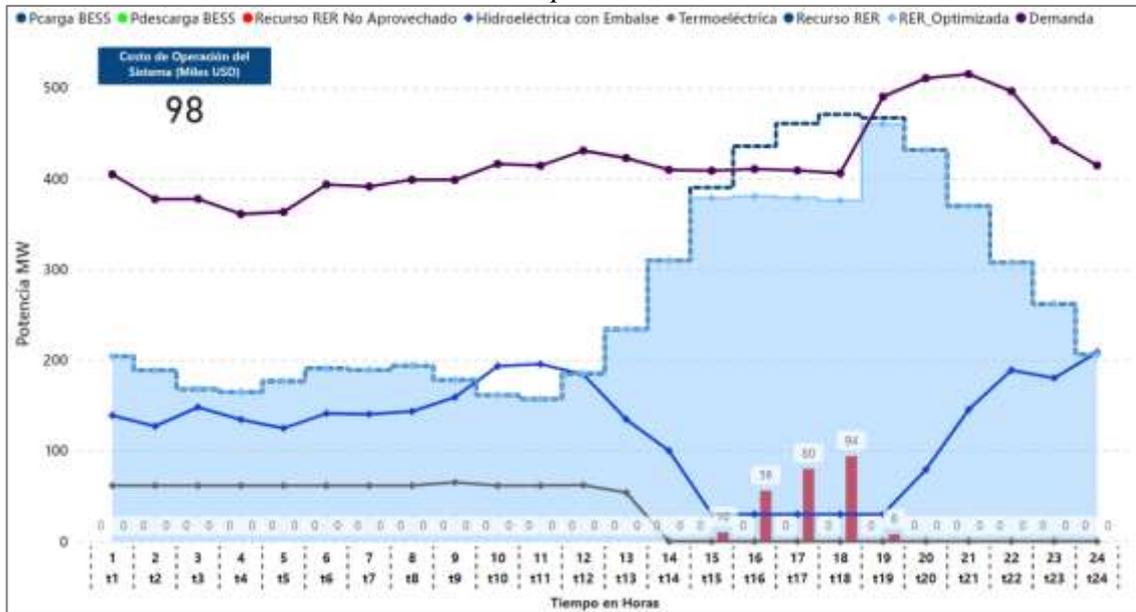
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.14.
Caso 1: Resultados del despacho económico con BESS



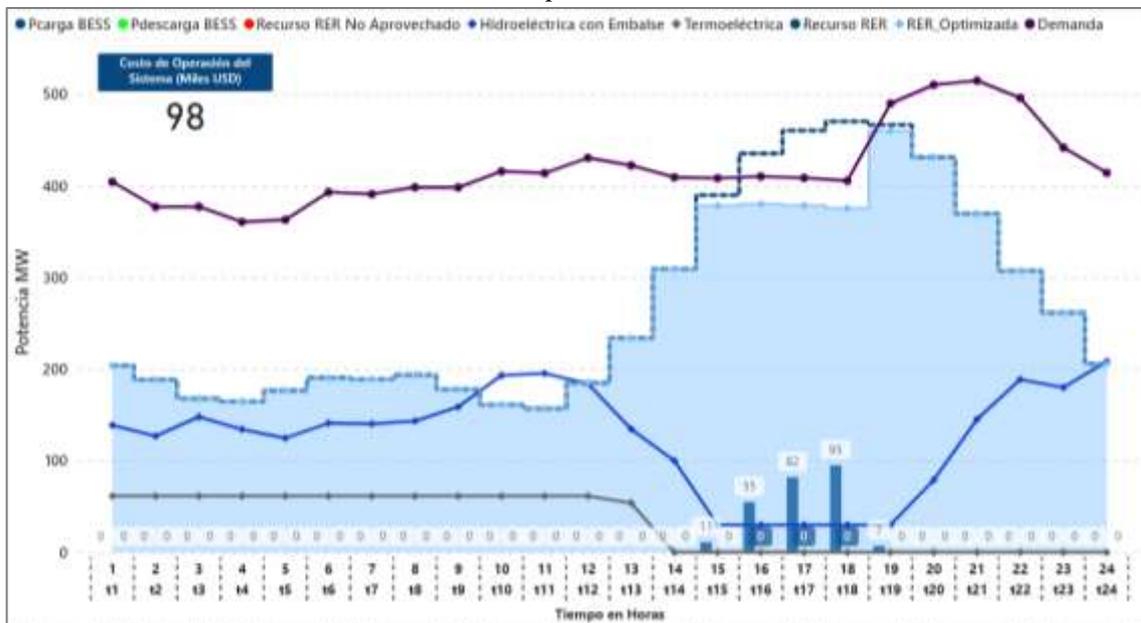
Fuente: Elaboración propia.

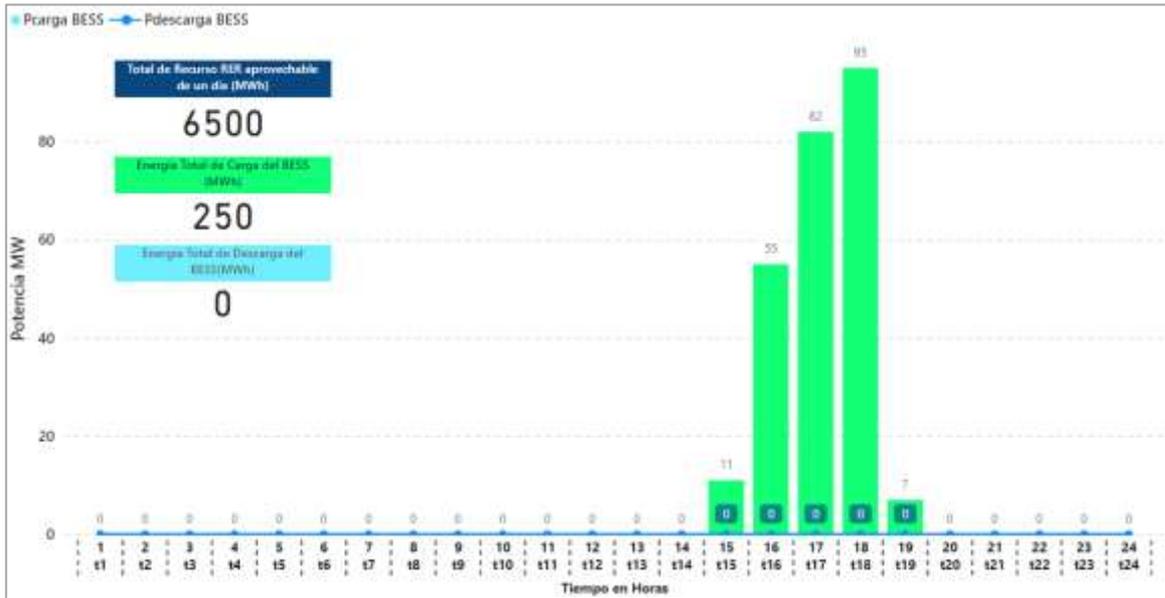
Figura 4.15.
Caso 2: Resultados del despacho económico sin BESS



Fuente: Elaboración propia.

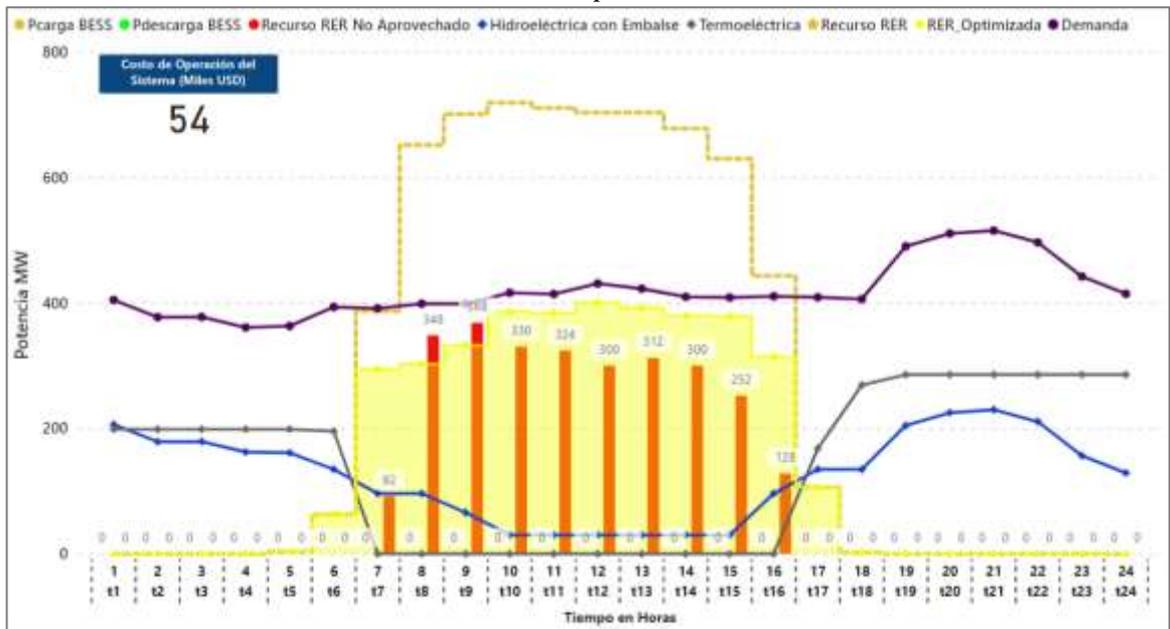
Figura 4.16.
Caso 2: Resultados del despacho económico con BESS





Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.17.
Caso3: Resultados del despacho económico sin BESS



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.18.

Caso 3: Resultados del despacho económico con BESS



Fuente: Elaboración propia.

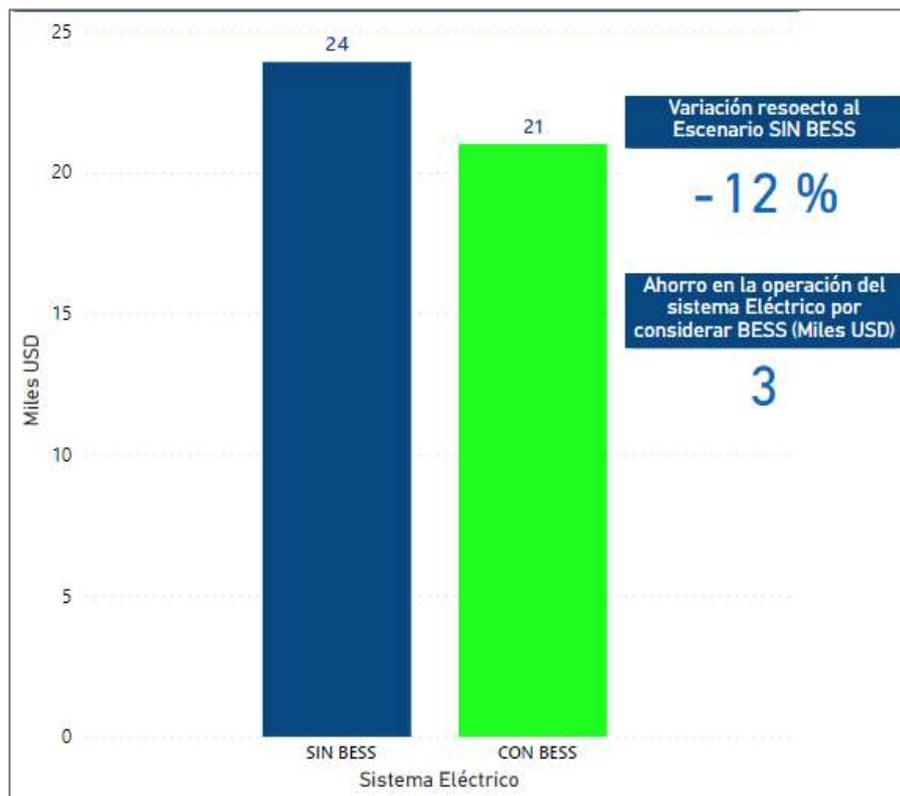
En ese sentido, a partir de los resultados, podemos concluir que las hipótesis (H1) y (H2), son ciertas.

La tercera hipótesis específica que plantea: “La determinación del resultado del despacho económico CON y SIN sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos permite medir el impacto en escenarios de alta generación eólica

y solar”, se verifica al realizar la comparación de los impactos que se han sido cuantificado como un beneficio (ahorro monetario) mediante las figuras 4.19 y 4.20, para los casos 1 y 3, en los escenarios SIN y CON BESS, y que se analiza en el numeral 4.4:

Figura 4.19.

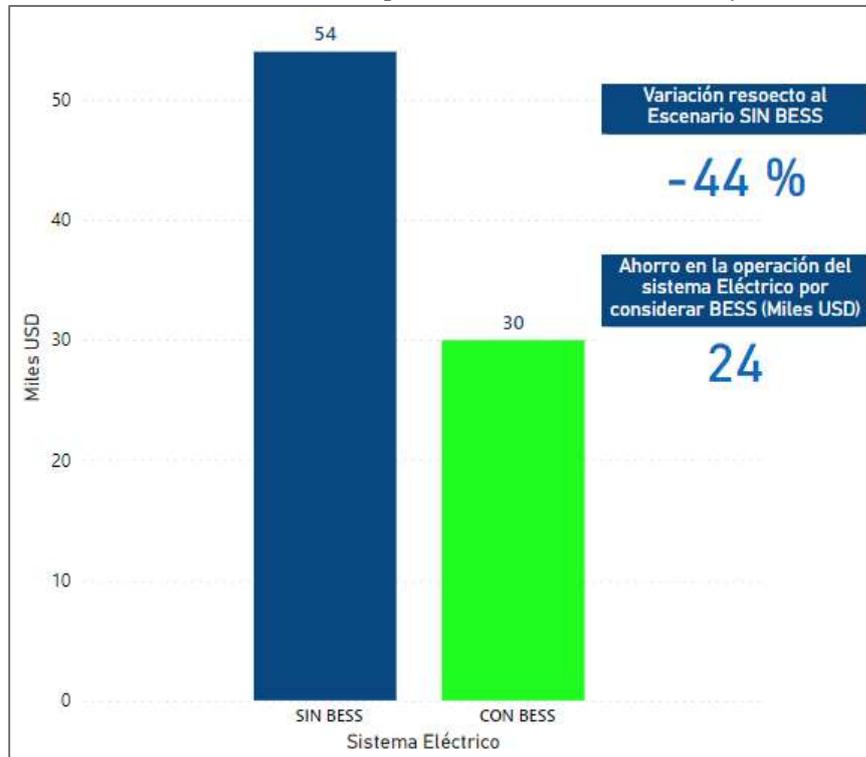
Caso 1: Resultados del Costo de Operación del Sistema: SIN y CON BESS



Fuente: Elaboración propia.

Figura4.20.

Caso 3: Resultados del Costo de Operación del Sistema: SIN y CON BESS



Fuente: Elaboración propia.

En ese sentido, a partir de los resultados, podemos concluir que la hipótesis específica (H3), **es cierta.**

La cuarta hipótesis específica que plantea: “*La determinación del resultado de la matriz de electricidad de un sistema eléctrico CON y SIN sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos permite medir el impacto en escenarios de alta generación eólica y solar*”, se verifica al realizar la comparación de las figuras 4.21 al 4.23 de la matriz de electricidad para los tres casos analizados en los escenarios SIN y CON BESS, y que se analizan en el numeral 4.4:

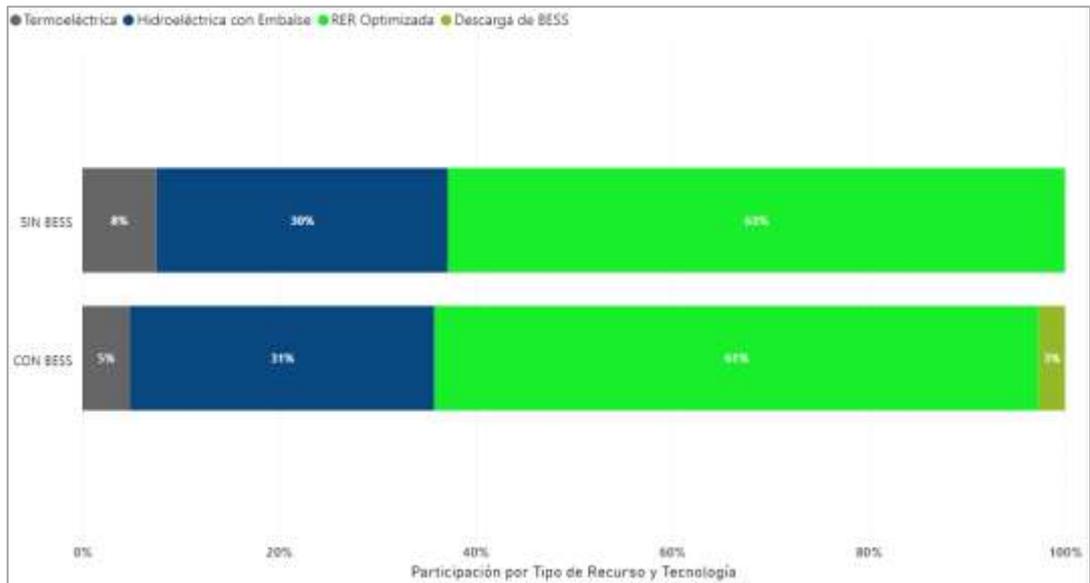
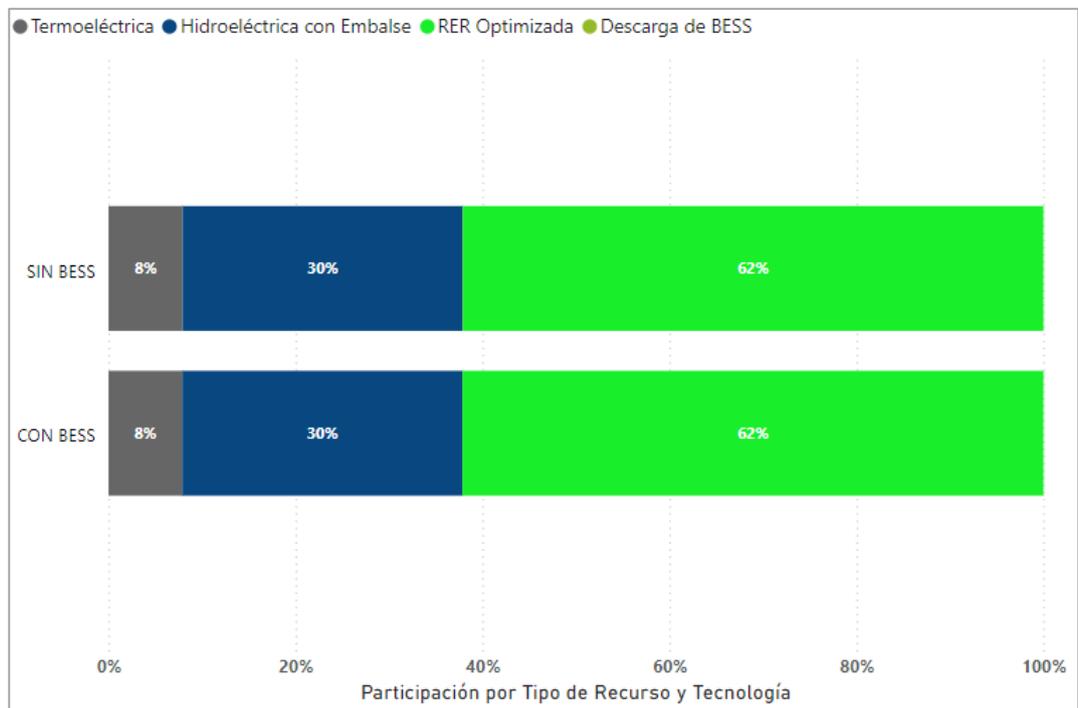
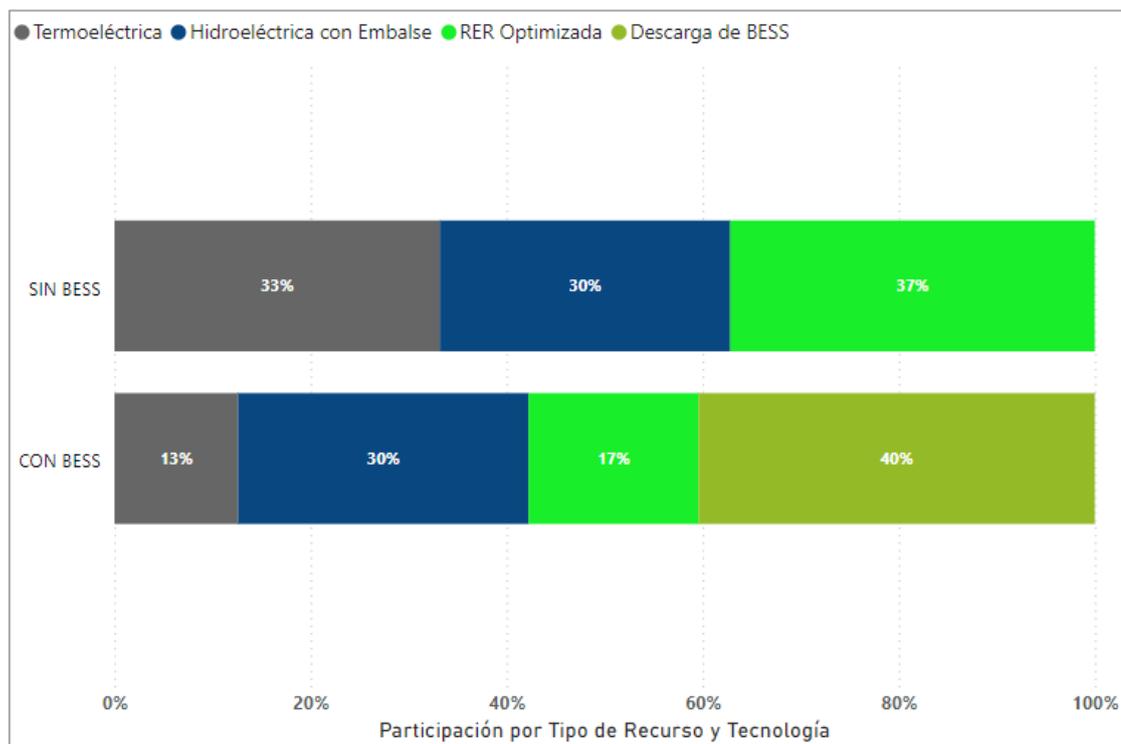
Figura 4.21.*Caso 1: Matriz de Electricidad**Fuente:* Elaboración propia.**Figura 4.22.***Caso 2: Matriz de Electricidad**Fuente:* Elaboración propia.

Figura 4.23.
Caso 3: Matriz de Electricidad



Fuente: Elaboración propia.

En ese sentido, a partir de los resultados, podemos concluir que la hipótesis específica (H4), **es cierta**.

Finalmente, después de contrastar las cuatro hipótesis específicas en las que se sustenta la hipótesis principal que establece: "*La integración de sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos, permite mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar.*", para la cual se desarrolló la formulación de las ecuaciones y restricciones de los sistemas de almacenamiento con baterías y su integración con los parques eólicos y fotovoltaicos que se desarrolla en el numeral 3.4 con la finalidad de incorporarlo en el desarrollo de un modelo de despacho económico que se implementó en lenguaje GAMS, tal como se muestra en el Anexo 3, se llega a la conclusión de que dicha hipótesis principal ha sido confirmada.

CONCLUSIONES

De la presente investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. El modelamiento de los sistemas de almacenamiento con Baterías (BESS) integradas a los parques eólicos y fotovoltaicos para fines de la operación económica del sistema eléctrico, han permitido mejorar de manera satisfactoria el modelo de despacho económico y el uso del recurso renovable variable (eólico y solar), teniendo un mayor impacto y beneficio en un escenario de alta inserción de renovables y con un mayor número de horas en donde el perfil de producción de los parques eólicos y/o fotovoltaicos (oferta) sea mayor que la demanda eléctrica, como por ejemplo el caso 3. Esta investigación será de utilidad para inversionistas, desarrolladores de proyectos renovables, operador del sistema, organismos reguladores y normativos del sector eléctrico.
2. La aplicación del modelamiento de las BESS permite mejorar el despacho económico en cuanto a gestión óptima de los recursos primarios, en donde se puede verificar y cuantificar el proceso de carga y descarga de un sistema BESS integrado a un parque eólico y/o fotovoltaico, permitiendo almacenar y gestionar el potencial renovable no aprovechable – evitando los vertimientos de energía primaria solar y eólica – frente a un sistema eléctrico SIN BESS en un escenario de alta inserción de generación renovable variable (eólica y solar).
3. La aplicación del modelamiento de las BESS para mejorar el despacho económico, permite analizar, cuantificar y observar el proceso de gestión de carga y descarga que realiza la BESS durante el despacho económico– en donde almacena el potencial RER no aprovechable teniendo un mayor beneficio en un escenario SIN BESS – para un periodo de análisis.
4. La aplicación del modelamiento de las BESS para mejorar el despacho económico, permite disminuir la participación de la generación de las centrales térmicas u otras tecnologías de mayor costo variable para el sistema, las cuales

utilizan combustibles fósiles para su operación, siendo más notorio en los escenarios del caso 1 y caso 3, resultando tener una matriz de electricidad con mayor participación de energía renovable (eólica y solar) gestionable por las BESS, brindando de esta manera mayor flexibilidad al sistema eléctrico, evitando el vertimiento de energía solar y eólica e impulsando el cambio hacia la transición energética al aumentar mayor inserción de energías renovables para la generación de electricidad y disminuir los Gases de Efecto Invernadero (GEI) causante principal del cambio climático y calentamiento global. Cabe precisar que para la presente investigación el BESS es parte del parque fotovoltaico y/o eólico (integrado) no considerándose un costo variable total para el despacho.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que, a partir del modelamiento de las BESS para mejorar el despacho económico – desarrollado en la presente investigación – se pueda analizar y cuantificar los impactos para los sistemas eléctricos con diferentes características y disponibilidad de recursos primarios; variando los perfiles de demanda, mínimos técnicos de operación de las centrales de generación, mayor número de generadores y configuración topológica de las redes de transmisión, permitiendo evaluar nuevos casos según la realidad de cada sistema eléctrico que se quiera analizar.
2. Se recomienda evaluar y analizar escenarios de simulación, considerando limitar la capacidad de transporte de las líneas de transmisión o algún retraso de infraestructura de la red de Transmisión, con la finalidad de cuantificar el impacto en el costo de operación del sistema considerando escenarios CON y SIN, BESS.
3. Se recomienda realizar tres escenarios de evaluación económica en donde se verifique si existe beneficio neto para cubrir los costos de inversión y costos de operación y mantenimiento (COyM) de un sistema de almacenamiento con baterías (BESS), considerando: i) solamente el ahorro en el costo de operación del sistema eléctrico que entrega BESS durante el despacho económico, ii) solamente el ingreso por Bono de Carbono y iii) los puntos (i) y (ii) como ingresos en la evaluación económica.
4. Se recomienda realizar un modelo de determinación de capacidad óptima de un BESS, que permita optimizar la potencia instalada y la energía firme de un parque eólico y/o fotovoltaico, y evaluar su rentabilidad considerando el supuesto que las BESS perciban remuneración por potencia firme.

5. Se recomienda evaluar, identificar y analizar; que cambios normativos y/o mecanismos de remuneración son necesarios en el Perú para impulsar los sistemas de almacenamiento con Baterías integradas a los parques eólicos y fotovoltaicos como parte del desarrollo de promover la generación renovable, puesto que permite: i) reducir el costo de operación del sistema, ii) aprovechar mejor el recurso eólico y solar con mayor participación de energías renovables en la matriz de electricidad, y iii) mantener la estabilidad del sistema.

6. Se recomienda que, para trabajos de investigación futuros, evaluar y cuantificar bajo que problemas particulares identificadas, es rentable instalar sistemas de almacenamiento con Baterías (BESS) frente a diferentes activos tradicionales de transmisión para la planificación en la transmisión.

REFERENCIAS

- A.Castillejo, Cardemil J.M., Escobar R. (2023). “Techno-economic assessment of photovoltaic plants considering high temporal resolution and non-linear dynamics of battery storage.” (Artículo Científico)
- Siyuan Ch., Zheng L., Weiqui L. (2021). Integrating high share of renewable energy into power system using customer-sited energy storage. (Artículo Científico)
- González, F. H., (2016). “Optimal Take-Or-Pay LNG Supply for Hydrothermal Electricity Systems”, Tesis de Maestría: Magister en Ciencias de la Ingeniería. Universidad de Chile (Chile).
- Polamarasetty P. Kumar, Rajeshwer P. (2020). “Optimization of an off-grid integrated hybrid renewable energy system with different battery technologies for rural electrification in India”. (Artículo Científico).
- Fabián Orlando Navarro. (2019), “Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica aplicadas en generación con fuentes renovables, una revisión sistemática de literatura”. (Tesis de Maestría). Universidad de Chile.
- Jorge David Araya R.. (2022), “Integración de un sistema de almacenamiento de energía en un parque eólico, estudio de caso”. (Programa de investigación). Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Brayan Andres (2019), “Evaluación de la integración de sistemas de baterías en los sistemas de potencia utilizando el software Powerworld”. (Tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali.
- Ruta, W. (2018), “Economic Dispatch Considering Emissions using moth flame Optimization and Bat Hybrid Algorithm”.
- Julia, J., (2013), “Comparison of Economic Load Dispatch of Wind Hydrothermal Systems”.

- Marulanda, A. (2004), “Modelos para la Explotación Óptima de la Generación en Mercados Eléctricos Competitivos”. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla (España).
- Trujillo, S. (2021), “*Análisis de la Generación de Potencia Mediante el Modelamiento de Curvas de Eficiencia para Mejorar la Performance en una Central Hidroeléctrica con Turbinas Tipo Pelton*”. Tesis de Maestría: Maestría en Ciencias con mención en Mantenimiento. Universidad Nacional de Ingeniería (Perú).
- Sheble, G. “*Unit commitment Literature Synopsis*”, IEEE Transactions on Power Systems, (1994).

ANEXOS

ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA	1
ANEXO 2: FLUJOGRAMA DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN	3
ANEXO 3: MODELAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CON BATERÍAS EN EL COMPILADOR DEL SOFTWARE GAMS	4
ANEXO 4: RESULTADOS DE SIMULACIONES DE LOS CASOS ANALIZADOS	14

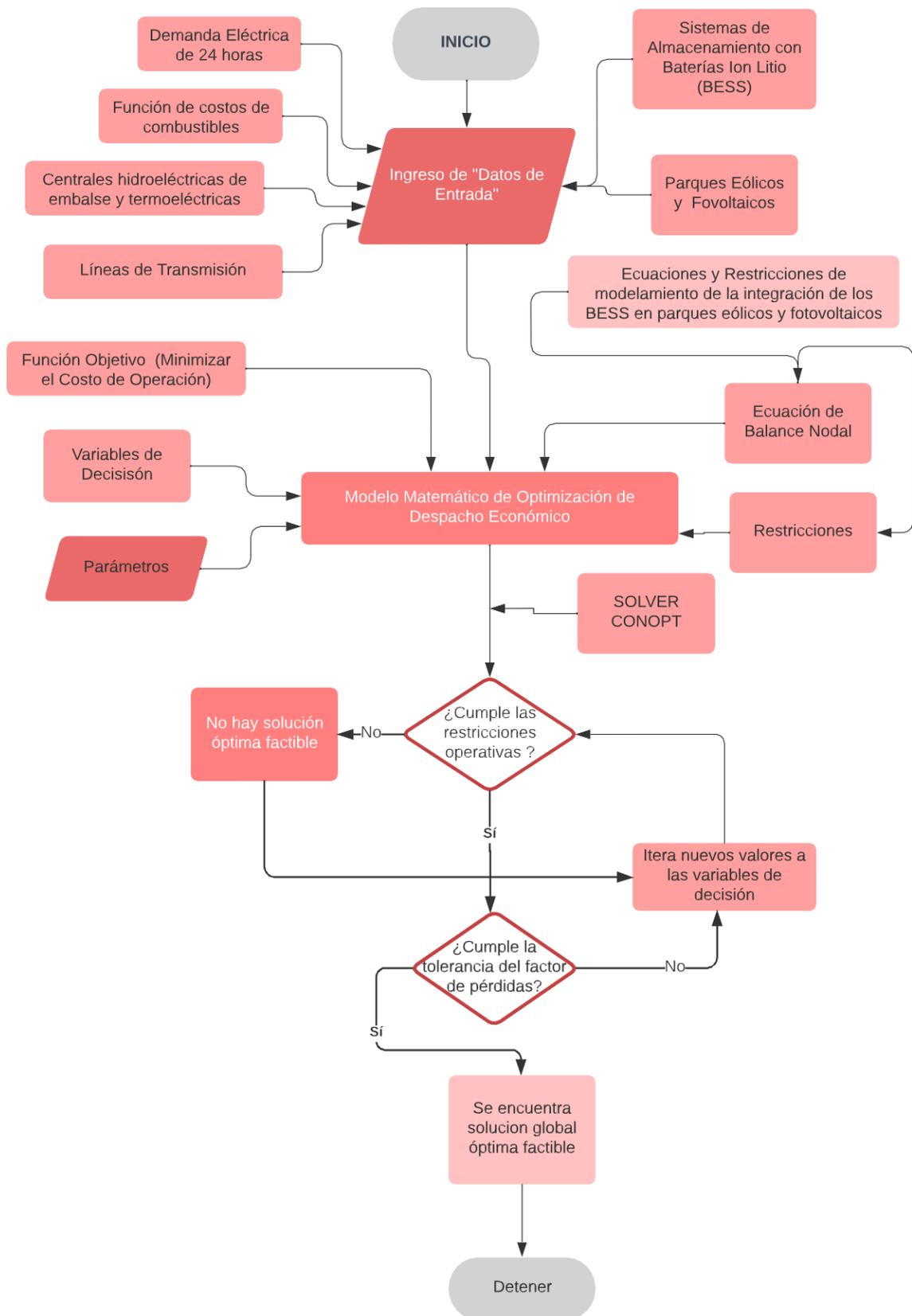
ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

INTEGRACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CON BATERÍAS EN PARQUES EÓLICOS Y FOTOVOLTAICOS PARA MEJORAR EL DESPACHO ECONÓMICO EN ESCENARIOS DE ALTA GENERACIÓN EÓLICA Y SOLAR						
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p><u>Problema principal</u></p> <p>¿En qué medida la integración de sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos permitirá mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar?</p>	<p><u>Objetivo general</u></p> <p>Mejorar el despacho económico mediante la integración de sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos en escenarios de alta generación eólica y solar</p>	<p><u>Hipótesis general</u></p> <p>La integración de sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos, permite mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar</p>	<p>Independiente (X)</p> <p>X1: Integración de Sistemas de Almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaico.</p>	<p>Potencia Tiempo</p>	<p>El valor de "potencia de carga" que se almacena los sistemas de almacenamiento con Baterías, en resolución horaria (24 horas)</p> <p>El valor de "potencia de descarga", que inyecta de los sistemas de almacenamiento con Baterías al sistema eléctrico, en resolución horaria (24 horas)</p>	<p>Tipo de Investigación: Aplicada</p> <p>Nivel de Investigación: Descriptiva y Explicativa</p> <p>Métodos: Cuantitativo</p> <p>Diseño: Cuantitativo y Experimental</p>
<p><u>Problema Secundario</u></p> <p>1. ¿En qué medida la energía de carga en los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos permitirá mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar?</p>	<p><u>Objetivo Específico</u></p> <p>1. Determinar la energía de carga en los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos para mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar</p>	<p><u>Hipótesis Específica</u></p> <p>1. La determinación de la energía de carga en los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos mejora el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar.</p>	<p>Dependiente (Y)</p> <p>Y1: Mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación renovable eólica y solar</p>	<p>Valor monetario</p>	<p>Valor del Costo de Operación del Sistema</p>	<p><u>Población y Muestra:</u> Sistema Eléctrico Multinodal de 11 barras, con grupos térmicos, central hidráulica con embalse, parque eólico y/o solar integrado con sistemas de almacenamiento con baterías.</p>

INTEGRACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CON BATERÍAS EN PARQUES EÓLICOS Y FOTOVOLTAICOS PARA MEJORAR EL DESPACHO ECONÓMICO EN ESCENARIOS DE ALTA GENERACIÓN EÓLICA Y SOLAR

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
2. ¿En qué medida la energía de descarga en los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos permitirá mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar?	2. Determinar la energía de descarga en los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos para mejorar el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar	2. La determinación de la energía de descarga en los sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos mejora el despacho económico en escenarios de alta generación eólica y solar			Porcentaje de participación de potencia Solar y/o Eólica que se inyecta al Sistema eléctrico SIN almacenarse en la batería	<u>Técnicas y Recolección de Datos:</u> Fuentes abiertas
3. ¿En qué medida se verá afectado el despacho económico de un sistema eléctrico CON y SIN sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos en escenarios de alta generación eólica y solar?	3. Determinar el resultado del despacho económico, CON y SIN sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos para medir el impacto en escenarios de alta generación eólica y solar	3. La determinación del resultado del despacho económico CON y SIN sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos permite medir el impacto en escenarios de alta generación eólica y solar.		Potencia óptima despachada del uso del recurso eólico y solar y su participación en la matriz de electricidad.	Porcentaje de participación de potencia de Descarga de los sistemas de almacenamiento CON Baterías que inyecta al sistema	- <u>Técnicas e instrumentos de análisis y procesamiento de datos:</u> Software GAMS
4. ¿ En qué medida se verá afectado la matriz de electricidad de un sistema eléctrico CON y SIN sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos en escenarios de alta generación eólica y solar?	4. Determinar el resultado de la matriz de electricidad de un sistema eléctrico CON y SIN sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos para medir el impacto en escenarios de alta generación eólica y solar	4. La determinación del resultado de la matriz de electricidad de un sistema eléctrico CON y SIN sistemas de almacenamiento con baterías en parques eólicos y fotovoltaicos permite medir el impacto en escenarios de alta generación eólica y solar				

ANEXO 2: FLUJOGRAMA DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO 3: MODELAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CON BATERÍAS EN EL COMPILADOR
DEL SOFTWARE GAMS**

```
                                CÓDIGO EN GAMS - MODELO DE DESPACHO INTEGRANDO BESS / CASO 3
$title Despacho Hidrotermico considerando la red de transmision

SETS
** Un dia modelado por horas
  t horizonte de tiempo      /1*24/
** Se considera un embalse
  Emb Embalse                / 1*1/
** Se considera una central hidro
  Uh Centrales Hidro         / 1*1/
** Se consideran 3 unidades térmicas
  Ut Centrales térmicas      / 1*3/
** Se consideran 9 barras
  N Número de barras modeladas / 1*6/
** Se modelan 9 líneas
  L Número de líneas modeladas /1*11/

** Unidad Solar
  Us Unidad solar + Unidad eólica /1*1/
** Unidad BESS
  Bess Unidad Bess /1*1/

*****

MAPH(N,Uh)  Asocia generadores hidro a barra  /4.1/
```

CÓDIGO EN GAMS - MODELO DE DESPACHO INTEGRANDO BESS / CASO 3

MAPHQ(Emb,Uh) Asocia generadores hidro a Embalses /1.1/

MAPT(N,Ut) Asocia generadores térmicos a barras /1.1,

2.2,

3.3/

MAPUS(N,Us) Asocia Us a Barra /5.1/

MAPBESS(N,Bess) Asocia Bess con Barra /5.1/

MAPUB(Us,Bess) Asocia Us con Bess /1.1/

;

** El conjunto de nudos N se duplica para hacer referencia

** a distintos elementos del mismo dentro de la misma restricción.

ALIAS(N,NP);

Parameter

pTERMICAS(Ut,*)

PmaxT(t,Ut)

PminT(t,Ut)

activa(t,N)

PmaxH(t,Uh)

PminH(t,Uh)

Linea(L,*)

Psv(t,N)

;

\$onecho > gdxrw.txt

par=pTERMICAS rng=DTerm!a1

par=PmaxT rng=PmaxT!a1

par=PminT rng=PminT!a1

CÓDIGO EN GAMS - MODELO DE DESPACHO INTEGRANDO BESS / CASO 3

```
par=activa  rng=activa!a1
par=PmaxH   rng=PmaxH!a1
par=PminH   rng=PminH!a1
par=Linea   rng=Linea!a1
par=Psv     rng=Psv!a1
$offecho

$call 'gdxxrw.exe DataHT.xlsx o=DataHT.gdx trace=0 @gdxxrw.txt'
$gdxin DataHT.gdx
$load pTERMICAS PmaxT PminT activa PmaxH PminH Linea Psv

SET MAPLIN(L,N,N) Enlace Línea-Barra-Barra

/  1. 1.2
   2. 1.4
   3. 1.5
   4. 2.3
   5. 2.4
   6. 2.5
   7. 2.6
   8. 3.5
   9. 3.6
  10. 4.5
  11. 5.6/
;

TABLE LINE(N,N,*) datos de entrada de las líneas
      YY      PHI
*      (PU )    (Rad)
1.2    4.4721   1.107
```

CÓDIGO EN GAMS - MODELO DE DESPACHO INTEGRANDO BESS / CASO 3

1.4	4.8507	1.326
1.5	3.2207	1.310
2.3	3.9223	1.373
2.4	8.9442	1.107
2.5	3.1622	1.249
2.6	4.7192	1.234
3.5	3.4921	1.138
3.6	9.8058	1.373
4.5	2.2360	1.107
5.6	3.1622	1.249

;

****Datos numéricos generales**

SCALAR

PI /3.1416/
Pbase /100 /
Rac /6000 /

;

PARAMETER

**** Parámetros de las centrales hídricas**

Q(Emb)	Caudal de entrada al embalse	/1 35 /
Vini(Emb)	Volumen inicial del embalse	/1 250 /
Vmax(Emb)	Volumen máximo del embalse	/1 450 /
Vmin(Emb)	Volumen mínimo del embalse	/1 50 /
Vmeta(Emb)	Volumen meta fijo del embalse	/1 125 /
K(Uh)	Coefficiente de producción de la hidro	/1 3.846/
spxmax(Uh)	Vertimiento máximo	/1 10 /
spxmin(Uh)	Vertimiento mínimo	/1 0 /

CÓDIGO EN GAMS - MODELO DE DESPACHO INTEGRANDO BESS / CASO 3

Kh Constante de conversión energética /3.6 /

** Para almacenar las pérdidas

perdidas(t,N) Parámetro para almacenar las pérdidas globales

LineasPer(L,t) Parámetro para almacenar las pérdidas por líneas

SumaPrevia Parámetro para almacenar las pérdidas de la iteración anterior

iter Contador para las iteraciones de las pérdidas

limite Límite de iteraciones en el cálculo de las pérdidas

Error Gap para las iteraciones de las pérdidas

CasoPrevio(L,t) Caso antes del despacho

ErrorL(L,t) Matriz de errores de las líneas

** Modelamiento de la Bess asocoado al SOC "State of Charge"

SOCini(Bess) Estado de Carga inicial de la BESS /1 0/

SOCmax(Bess) Estado de Carga máximo de la BESS /1 0/

SOCmin(Bess) Estado de Carga mínimo de la BESS /1 0/

Ed(Bess) Eficiencia de Descarga de Batería /1 0.90/

Ec(Bess) Eficiencia de Carga de la BESS /1 0.95/

;

** Inicialmente las pérdidas son cero

perdidas(t,N)=0;

iter =0;

limite =8;

VARIABLES

CÓDIGO EN GAMS - MODELO DE DESPACHO INTEGRANDO BESS / CASO 3

Costo Costo global de operación
d(N,t) ángulo de la tensión en el nudo N

;

** No son necesarias pero es útil para limitar el espacio de solución

d.lo(N,t)=-PI;

d.up(N,t)=PI;

POSITIVE VARIABLES

Pt(Ut,t) potencias térmicas

Ph(Uh,t) Potencias hidráulicas

V(Emb,t) volúmenes de embalses

s(Uh,t) vertimiento

pr(N,t) potencia de racionamiento en el nudo N

Ps(Us,t) Potencia que entrega de la Us

Pch(Bess,t) Potencia que se carga en la BESS

Pdis(Bess,t) Potencia que se descarga en la BESS

SOC(Bess,t) Estado de Carga de la BESS

;

*-----

* Limites de las variables

*-----

V.lo(Emb,t) = Vmin(Emb);

V.up(Emb,t) = Vmax(Emb);

s.lo(Uh,t) = spmin(Uh);

s.up(Uh,t) = spmax(Uh);

SOC.lo(Bess,t)=SOCmin(Bess);

CÓDIGO EN GAMS - MODELO DE DESPACHO INTEGRANDO BESS / CASO 3

```
SOC.up(Bess,t)=SOCmax(Bess);  
Pch.up(Bess,t)= 0.2*SOCmax(Bess);  
Pdis.up(Bess,t)= 0.5*SOCmax(Bess);
```

```
** Las matrices de datos Z y PHI se definen simetricas mediante  
** la condicion $(ORD(N) GT ORD(NP)) sobre los conjuntos N y NP.  
LINE(N,NP,'YY')$(ORD(N) GT ORD(NP))=LINE(NP,N,'YY');  
LINE(N,NP,'PHI')$(ORD(N) GT ORD(NP))=LINE(NP,N,'PHI');
```

EQUATIONS

```
TotalCost      Funcion objetivo  
LimHMax(Uh,t)   Potencia Máxima hidro  
LimHMin(Uh,t)   Potencia Mínima hidro  
LimTerMax(Ut,t) Potencia Máxima térmica  
LimTerMin(Ut,t) Potencia Mínima térmica  
PBAL(N,t)       restricciones de balance de potencia activa  
CapLin1(L,t)    Limite de cap de transporte  
CapLin2(L,t)    Limite de cap de transporte  
Presa(Emb,t)    Balance Hidráulico  
PresaFin(Emb,t) Balance Hidráulico t = 0  
Presalncio(Emb,t) Volumen inicial  
  
BAT(Bess,t)     Balance en la BESS  
BATinicio(Bess,t) Carga de la BESS al inicio  
BalPsf(N,t)     Balance de la Generación solar
```

```
;
```

CÓDIGO EN GAMS - MODELO DE DESPACHO INTEGRANDO BESS / CASO 3

```

** Función Objetivo SUMA del COSTO TOTAL Incluido Racionamiento
TotalCost.. Costo =e= SUM((Ut,t), pTERMICAS(Ut,'A')+pTERMICAS(Ut,'B')*Pt(Ut,t)+pTERMICAS(Ut,'C')*Pt(Ut,t)*Pt(Ut,t))+ SUM((N,t),
Rac*pr(N,t));

** Ecuación de Balance de Nodal
PBAL(N,t).. SUM(Uh$MAPH(N,Uh),Ph(Uh,t))+
SUM(Ut$MAPT(N,Ut),Pt(Ut,t))+
pr(N,t)+ SUM(Bess$MAPBESS(N,Bess),Pdis(Bess,t)) + SUM(Us$MAPUS(N,Us),Ps(Us,t))
=e= activa(t,N)+perdidas(t,N)+ Pbase*SUM(NP,LINE(N,NP,'YY')*(d(N,t)-d(NP,t)));
* SUM(Us$MAPUS(N,Us),Ps(Us,t))

** Ecuaciones de capacidades de líneas
CapLin1(L,t).. Pbase*SUM((N,NP)$MAPLIN(L,N,NP),LINE(N,NP,'YY')*(d(N,t)-d(NP,t)))=l=Linea(L,'cap') ;
CapLin2(L,t).. Pbase*SUM((N,NP)$MAPLIN(L,N,NP),LINE(N,NP,'YY')*(d(N,t)-d(NP,t)))=g=-Linea(L,'cap');

** Límites de las potencias térmicas e hidráulicas También se puede poner como limites en los bounds
LimTerMax(Ut,t).. Pt(Ut,t) =l= PmaxT(t,Ut);
LimTerMin(Ut,t).. Pt(Ut,t) =g= PminT(t,Ut);
LimHMax(Uh,t).. Ph(Uh,t) =l= PmaxH(t,Uh);
LimHMin(Uh,t).. Ph(Uh,t) =g= PminH(t,Uh);

** Ecuación de volumen iniciar en el embalse de la central hidroeléctrica
Presalncio(Emb,t)$ord(t) = 1).. V(Emb,t) =e= SUM(Uh$MAPHQ(Emb,Uh),Vini(Emb)+Kh*(Q(Emb)-Ph(Uh,t)/K(Uh)-s(Uh,t)));

** Ecuación de balance hídrico hasta antes de las 24 horas
Presa(Emb,t)$ord(t) gt 1).. V(Emb,t) =e= SUM(Uh$MAPHQ(Emb,Uh),V(Emb,t-1)+Kh*(Q(Emb)-Ph(Uh,t)/K(Uh)-s(Uh,t))) ;

** Ecuación de balance hídrico para las 24 horas Para hacer la excepción que el volumen final igual al inicial
PresaFin(Emb,t)$ord(t) = 24).. V(Emb,t) =e= Vmeta(Emb);

```

CÓDIGO EN GAMS - MODELO DE DESPACHO INTEGRANDO BESS / CASO 3

** Ecuacion de Balance de Carga

BATinicio(Bess,t)\$ (ord(t)=1).. SOC(Bess,t)=e= SUM(Us\$MAPUB(Us,Bess),SOCini(Bess) + Pch(Bess,t)*Ec(Bess) - Pdis(Bess,t)/ Ed(Bess));

BAT(Bess,t) \$ (ord(t) gt 1).. SOC(Bess,t)=e= SUM(Us\$MAPUB(Us,Bess), SOC(Bess,t-1) + Pch(Bess,t)*Ec(Bess) - Pdis(Bess,t)/Ed(Bess));

* BalPvs(N,t).. SUM(Bess\$MAPBESS(N,Bess),Pch(Bess,t)/Ec(Bess))+ SUM(Us\$MAPUS(N,Us),Ps(Us,t))=l= Psv(t,N);

BalPsf(N,t).. SUM(Us\$MAPUS(N,Us),Ps(Us,t))=e= Psv(t,N) - SUM(Bess\$MAPBESS(N,Bess),Pch(Bess,t));

*PotCarg(Bess,t)\$ (ord(t) gt 1 and ord(t) ge 17).. Pch(Bess,t) =l=SUM(Us\$MAPUB(Us,Bess), Pdis(Bess,t-1));

* BalCarg(N,t) .. SUM(Bess\$MAPBESS(N,Bess),Pch(Bess,t))=L=SUM(Bess\$MAPBESS(N,Bess),Pdis(Bess,t));

** Se plantea el problema de optimización indicando todas las restricciones a usar. La Función Objetivo también se considera una restricción.

MODEL PROBLEMA

/all/;

* MODEL PROBLEMA /all/;

*option limrow = 1000;

** Nodo Slack, estrictamente no es necesario Incluido solo si se necesita poner un nodo de referencia

d.fx("4",t)=0;

*Error = 500;

*SumaPrevia = 0;

*SOLVE PROBLEMA MINIMIZING Costo using nlp;

*LineasPer(L,t)=abs(2*Pbase*SUM((N,NP)\$MAPLIN(L,N,NP),-LINE(N,NP,'YY')*COS(-LINE(N,NP,'PHI'))*(1-COS(d.l(N,t)-d.l(NP,t)))));

CÓDIGO EN GAMS - MODELO DE DESPACHO INTEGRANDO BESS / CASO 3

```
Error = 500;  
perdidas(t,N)=0;
```

```
** Se inicia el proceso iterativo
```

```
While (Error gt 0.0001 and iter lt limite,
```

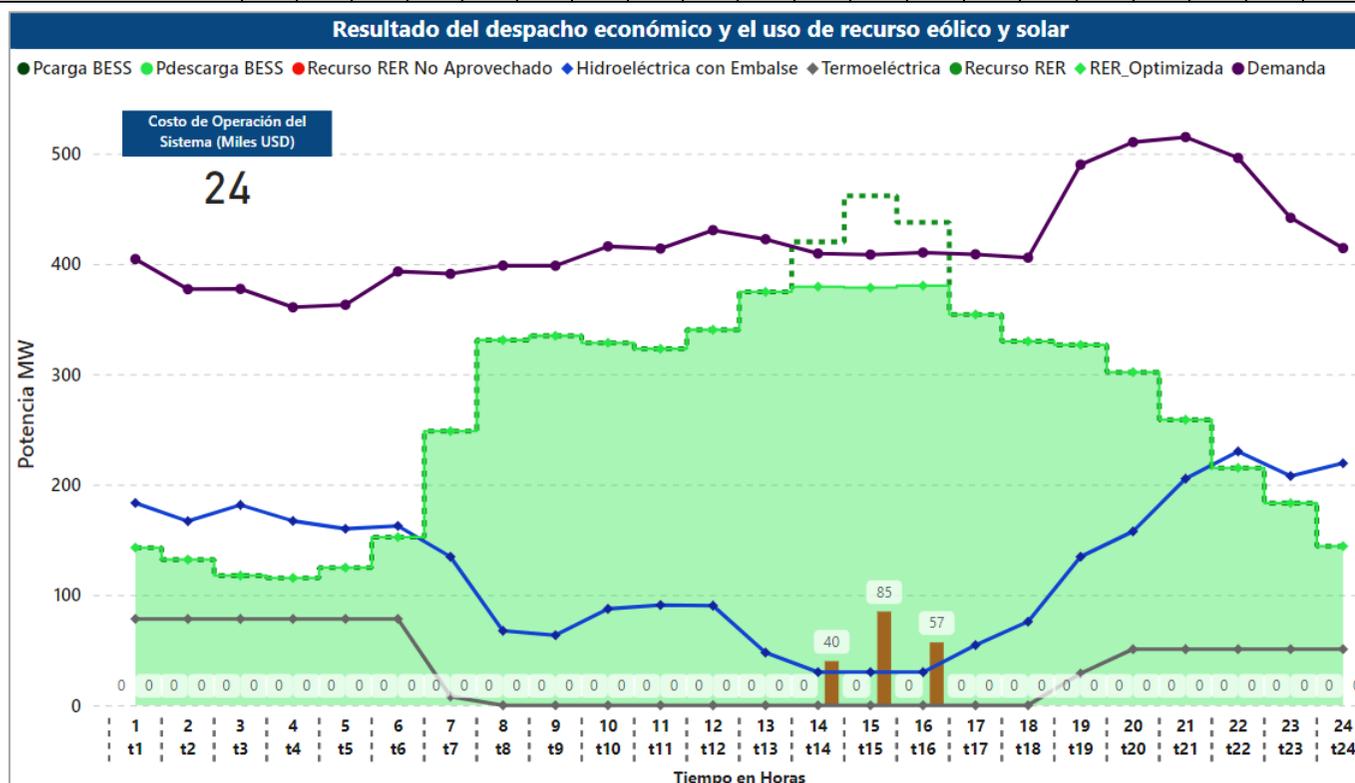
```
    LineasPer(L,t)=2*Pbase*SUM((N,NP)$MAPLIN(L,N,NP),-LINE(N,NP,'YY')*COS(-LINE(N,NP,'PHI'))*(1-COS(d.l(N,t)-d.l(NP,t))));  
    CasoPrevio(L,t) = LineasPer(L,t);
```

```
** Se procede a optimizar el problema
```

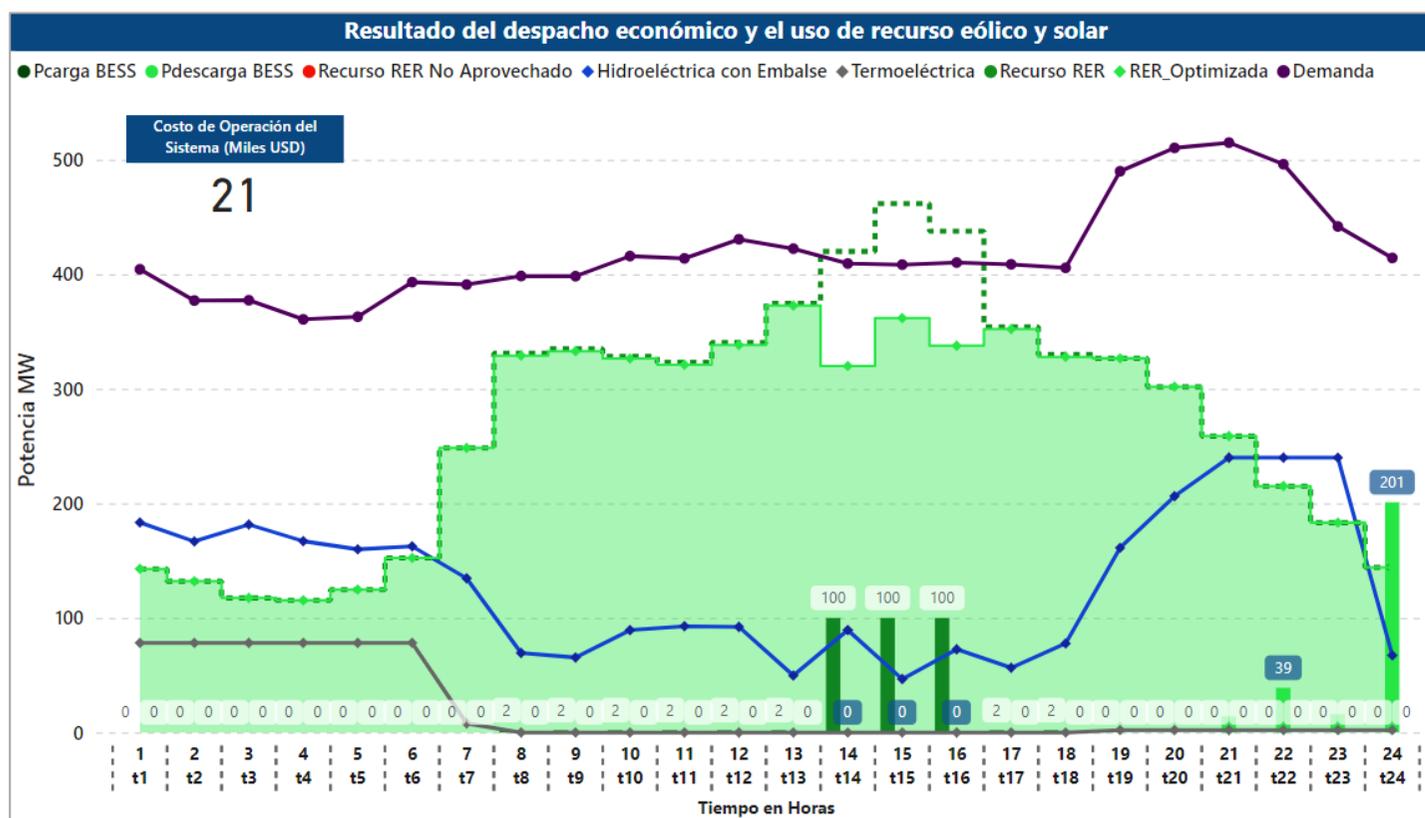
```
SOLVE PROBLEMA MINIMIZING Costo using nlp;
```

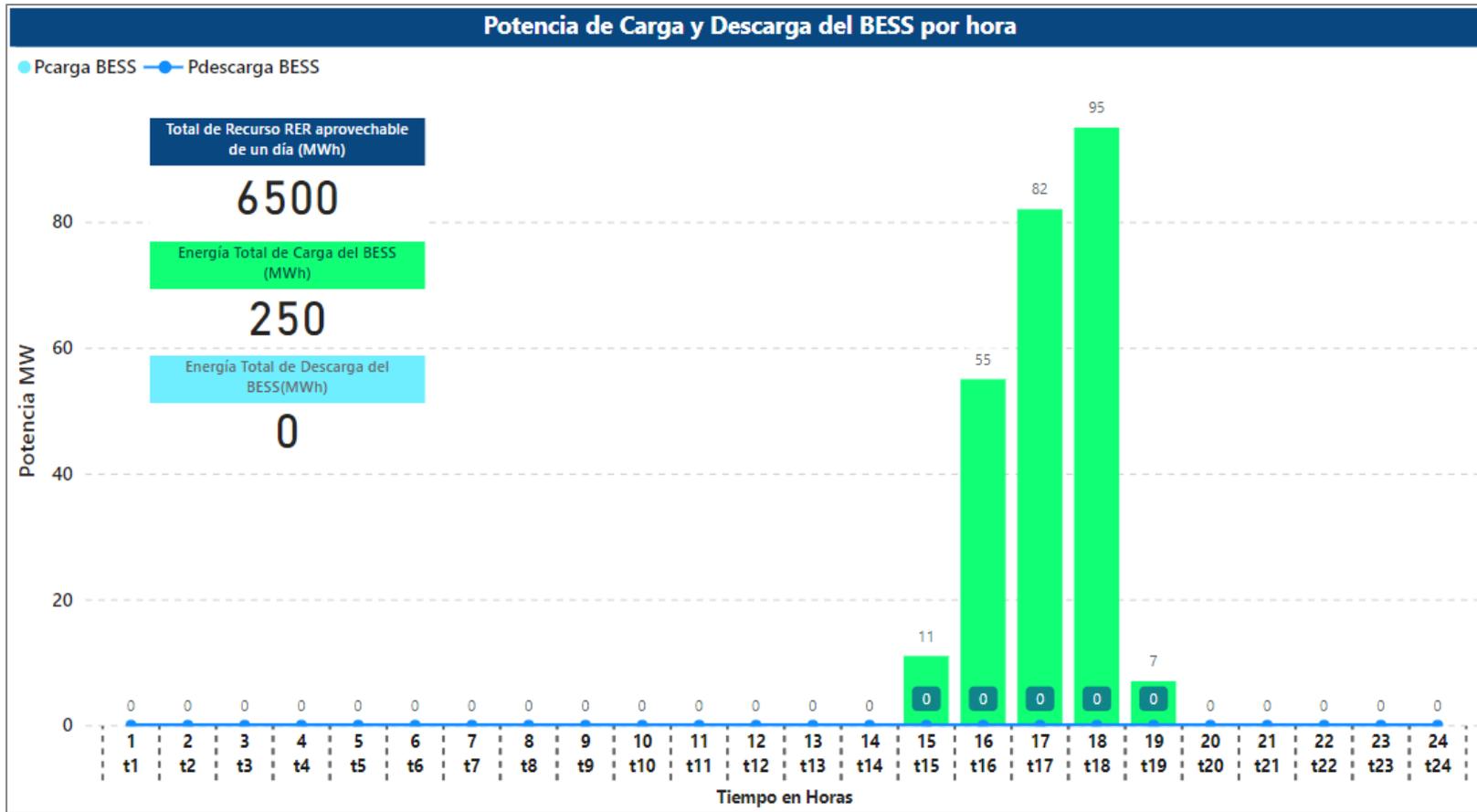
ANEXO 4: RESULTADOS DE SIMULACIONES DE LOS CASOS ANALIZADOS

Caso 1: SIN BESS	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h
	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
Hidroeléctrica con Embalse	183	167	182	167	160	163	135	68	64	87	91	90	48	30	30	30	55	76	135	158	205	230	208	219
Central Termoeléctrica	78	78	78	78	78	78	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	51	51	51	51	51
RER_Optimizada	143	132	118	115	125	152	248	331	335	329	323	340	375	379	378	380	354	330	327	302	259	215	183	144
Pcarga BESS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pdescarga BESS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Demanda (MW)	404	377	377	361	363	393	391	399	398	416	414	431	422	409	408	410	409	406	490	510	515	496	442	414
Recurso RER (MW)	143	132	118	115	125	152	248	331	335	329	323	340	375	420	462	438	354	330	327	302	259	215	183	144
Potencial RER No Aprovechado (Vertimiento)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	85	57	0	0	0	0	0	0	0	0



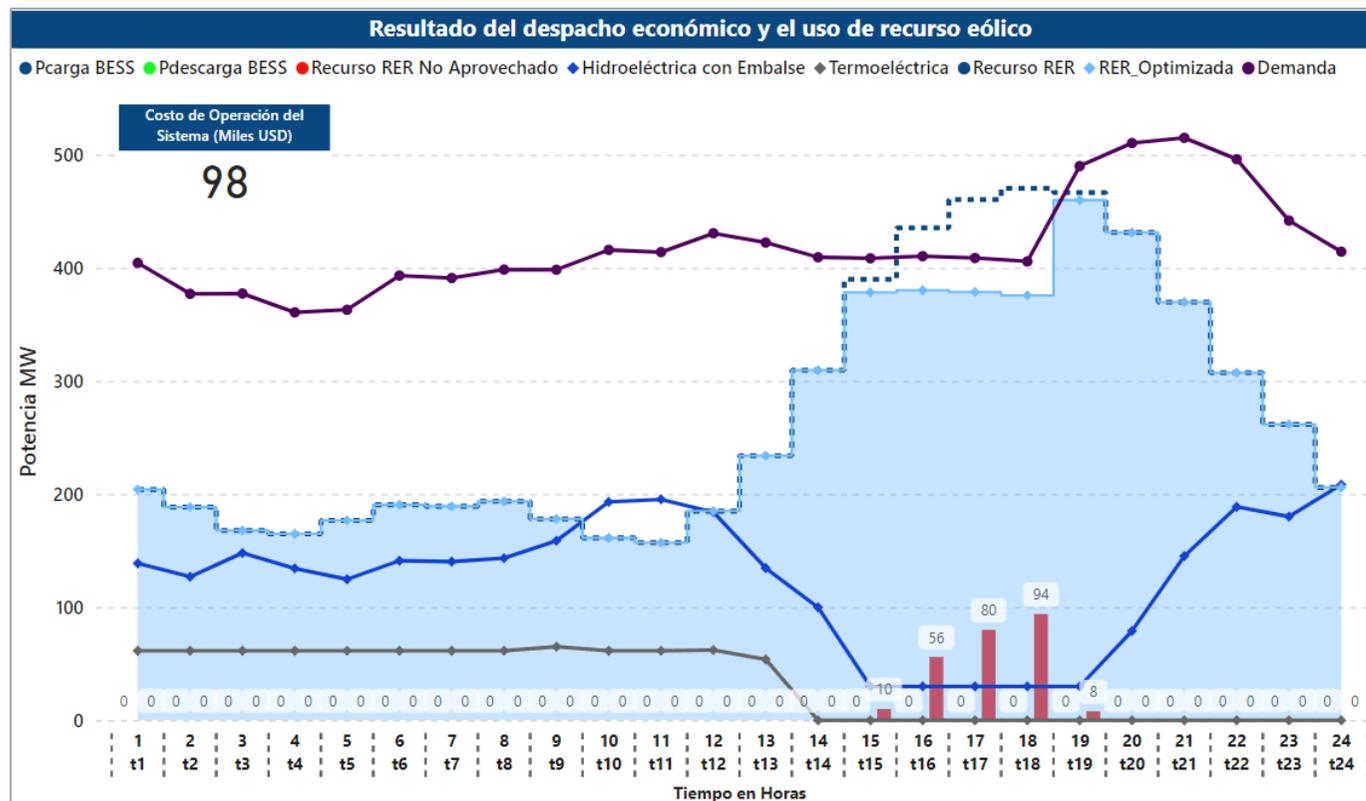
Caso 1: CON BESS	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h
	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
Hidroeléctrica con Embalse	183	167	182	167	160	163	135	69	65	89	93	92	50	89	47	73	57	78	161	206	240	240	240	67
Central Termoeléctrica	78	78	78	78	78	78	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2
RER_Optimizada	143	132	118	115	125	152	248	329	333	327	321	338	373	320	362	338	352	328	327	302	259	215	183	144
Pcarga BESS	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	100	100	100	2	2	0	0	0	0	0	0
Pdescarga BESS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	39	16	201
Demanda (MW)	404	377	377	361	363	393	391	399	398	416	414	431	422	409	408	410	409	406	490	510	515	496	442	414
Recurso RER (MW)	143	132	118	115	125	152	248	331	335	329	323	340	375	420	462	438	354	330	327	302	259	215	183	144
Potencial RER No Aprovechado (Vertimiento)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

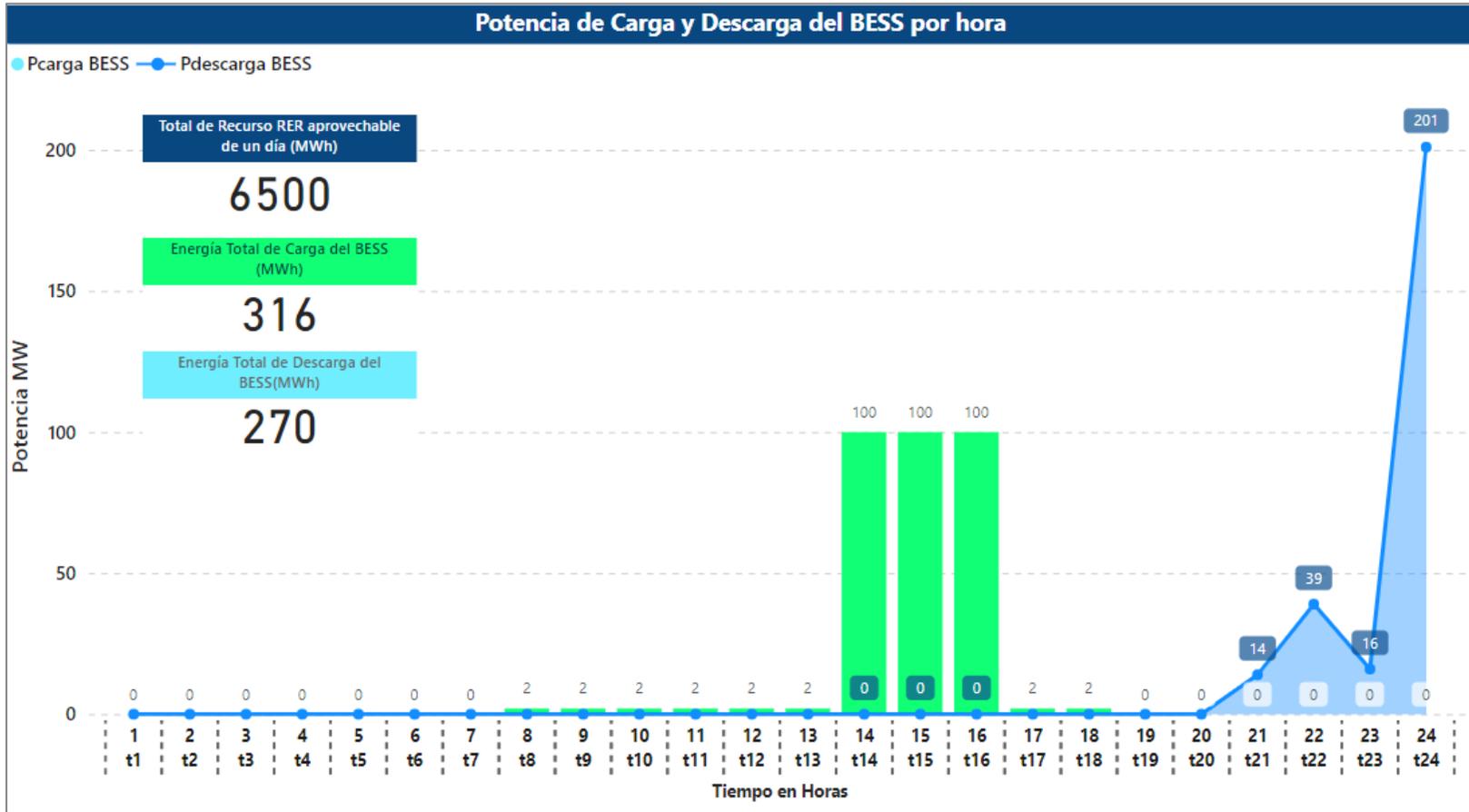




Fuente: Elaboración propia.

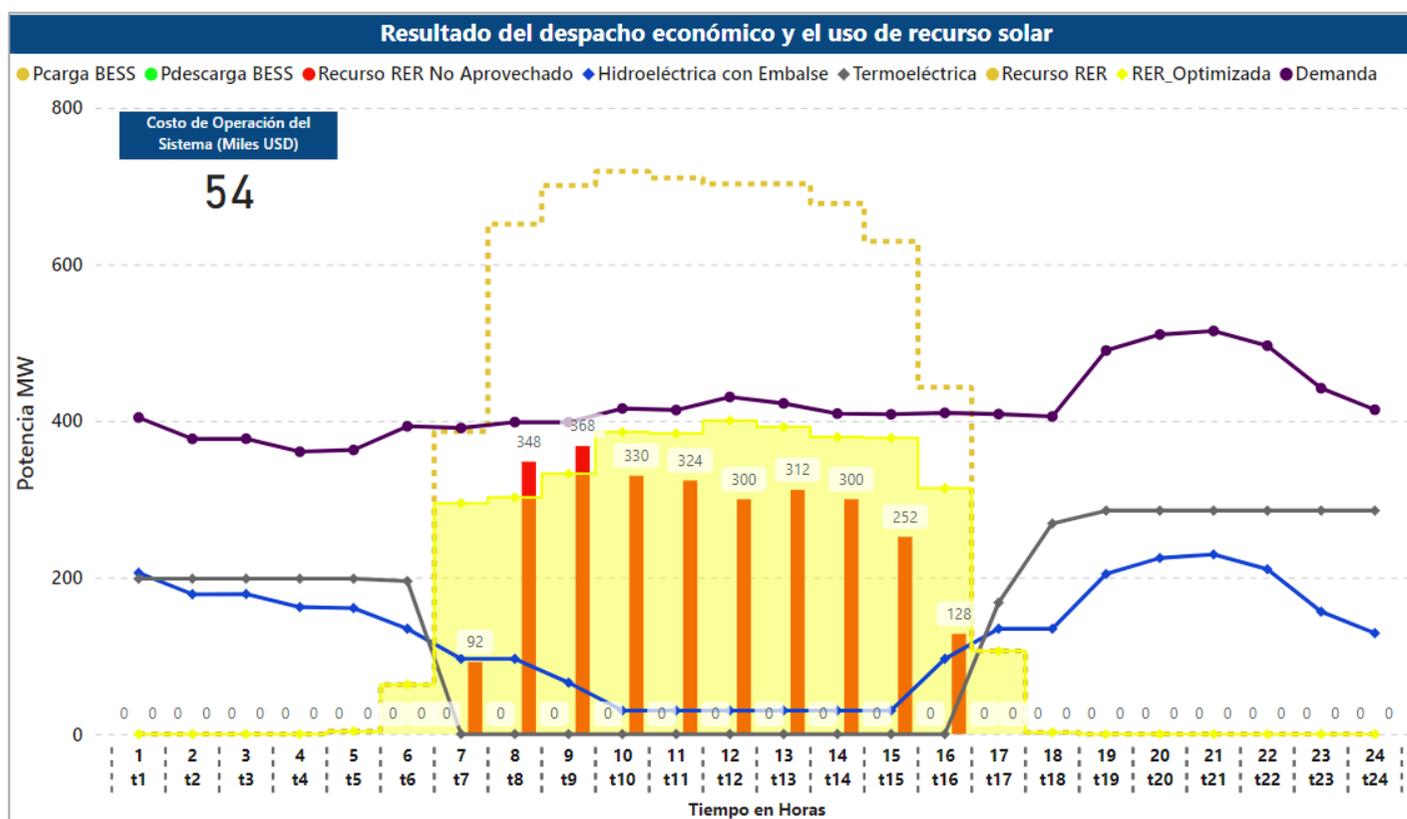
Caso 2: SIN BESS	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h
	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
Hidroeléctrica con Embalse	139	127	148	134	125	141	140	143	159	193	195	184	135	100	30	30	30	30	30	79	145	189	180	208
Central Termoeléctrica	62	62	62	62	62	62	62	62	65	62	62	62	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RER_Optimizada	204	189	168	165	177	191	189	194	178	161	157	185	234	310	378	380	379	376	460	431	370	307	262	206
Pcarga BESS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pdescarga BESS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Demanda (MW)	404	377	377	361	363	393	391	399	398	416	414	431	422	409	408	410	409	406	490	510	515	496	442	414
Recurso RER (MW)	204	189	168	165	177	191	189	194	178	161	157	185	234	310	390	435	460	470	467	431	370	307	262	206
Potencial RER No Aprovechado (Vertimiento)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	56	80	94	8	0	0	0	0	0



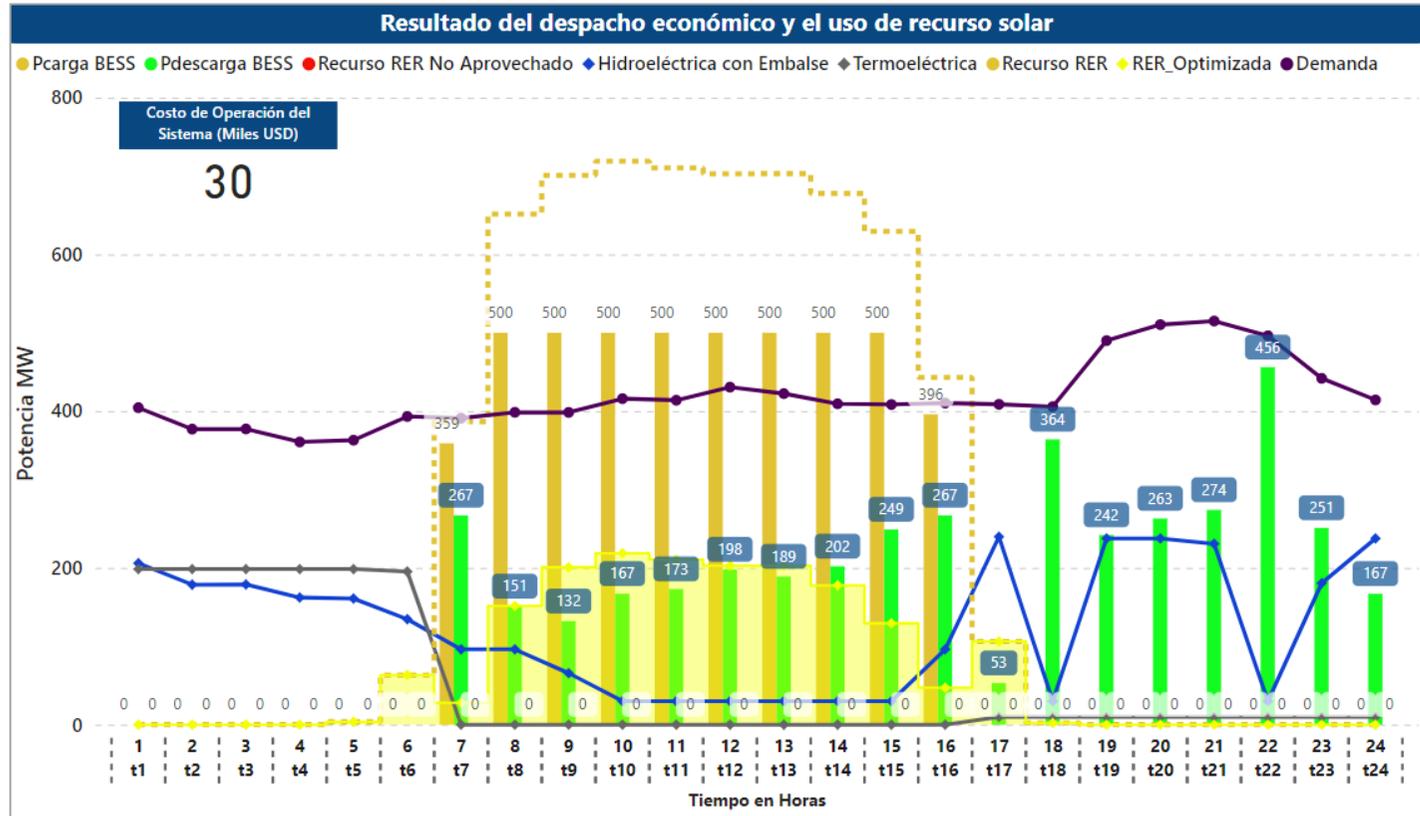


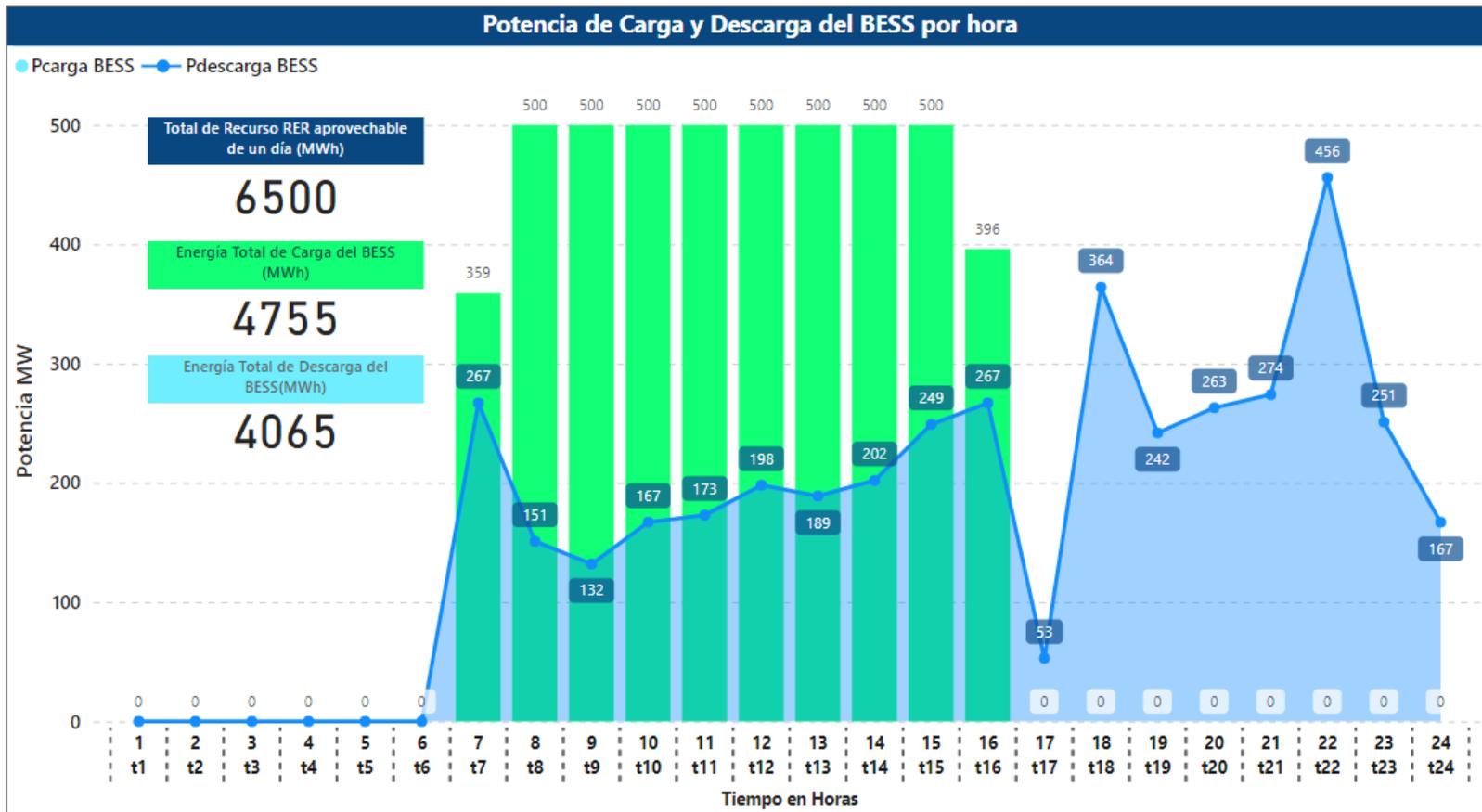
Fuente: Elaboración propia.

Caso 3: SIN BESS	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h
	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
Hidroeléctrica con Embalse	206	179	179	162	161	135	96	96	66	30	30	30	30	30	30	96	135	135	205	225	229	211	156	129
Central Termoeléctrica	198	198	198	198	198	195	0	0	0	0	0	0	0	0	0	168	269	286	286	286	286	286	286	286
RER_Optimizada	0	0	0	0	4	63	295	302	333	386	384	401	392	379	378	314	106	2	0	0	0	0	0	0
Pcarga BESS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pdescarga BESS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Demanda (MW)	404	377	377	361	363	393	391	399	398	416	414	431	422	409	408	410	409	406	490	510	515	496	442	414
Recurso RER (MW)	0	0	0	0	4	63	387	652	701	719	711	703	703	678	629	443	106	2	0	0	0	0	0	0
Potencial RER No Aprovechado (Vertimiento)	0	0	0	0	0	0	92	348	368	330	324	300	312	300	252	128	0	0	0	0	0	0	0	0

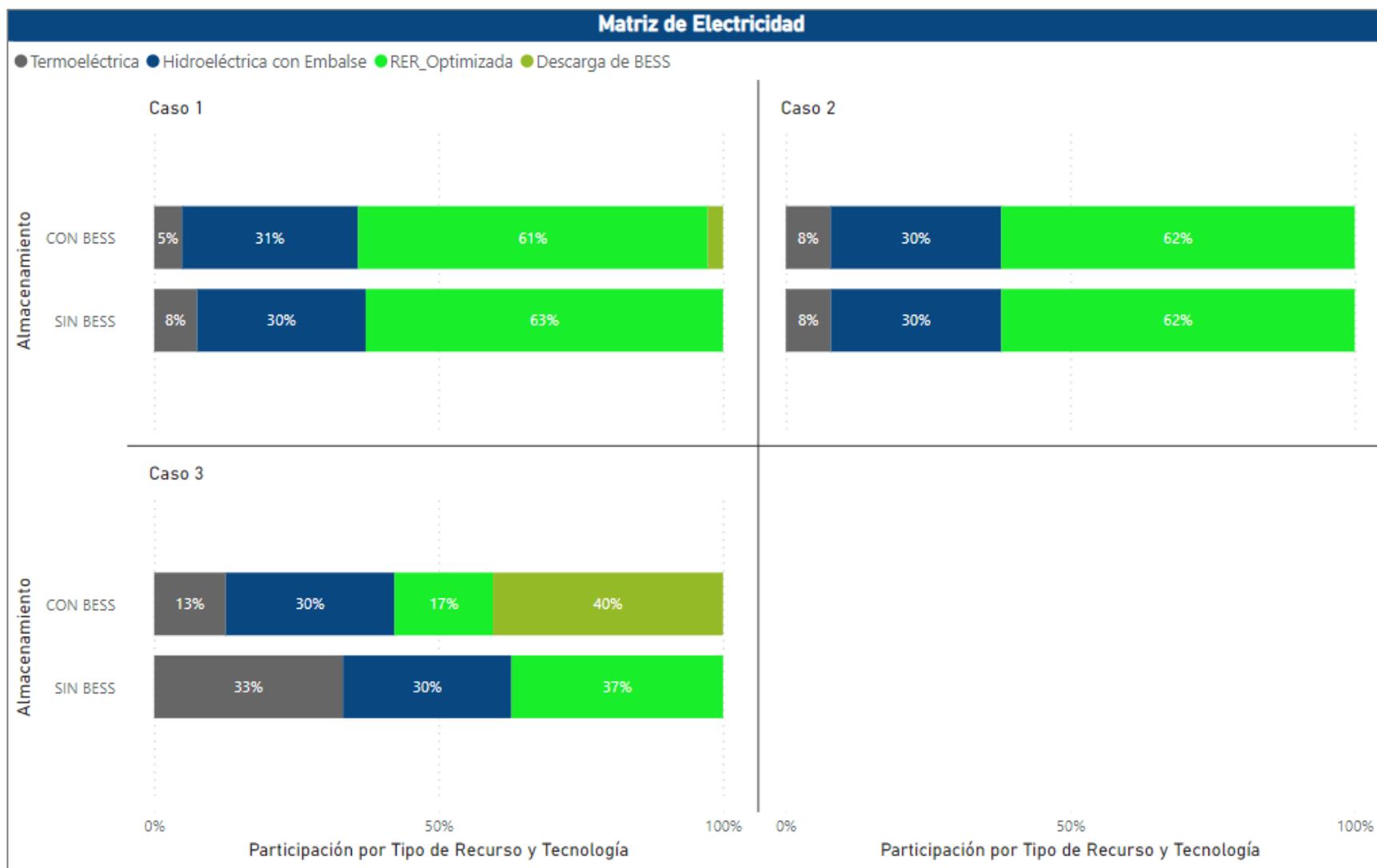


Caso 3: CON BESS	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h
	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
Hidroeléctrica con Embalse	206	179	179	162	161	135	96	96	66	30	30	30	30	30	30	96	240	30	238	238	231	30	181	238
Central Termoeléctrica	198	198	198	198	198	195	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10
RER_Optimizada	0	0	0	0	4	63	28	152	201	219	211	203	203	178	129	47	106	2	0	0	0	0	0	0
Pcarga BESS	0	0	0	0	0	0	359	500	500	500	500	500	500	500	500	396	0	0	0	0	0	0	0	0
Pdescarga BESS	0	0	0	0	0	0	267	151	132	167	173	198	189	202	249	267	53	364	242	263	274	456	251	167
Demanda (MW)	404	377	377	361	363	393	391	399	398	416	414	431	422	409	408	410	409	406	490	510	515	496	442	414
Recurso RER (MW)	0	0	0	0	4	63	387	652	701	719	711	703	703	678	629	443	106	2	0	0	0	0	0	0
Potencial RER No Aprovechado (Vertimiento)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0





Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.