



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DESPACHO ECONÓMICO DE GENERACIÓN
CONSIDERANDO PRONÓSTICO DE LA DEMANDA,
FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES Y
ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

TESIS

Que para obtener el grado de:

Maestro en ciencias en ingeniería eléctrica

Presenta:

Ing. Jorge Luis Solano Gallegos

Directora de Tesis:

Dra. Elisa Espinosa Juárez



Morelia, Michoacán, agosto 2020



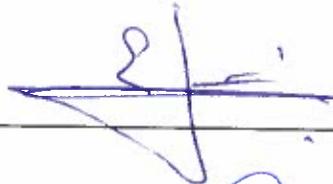
**DESPACHO ECONÓMICO DE GENERACIÓN CONSIDERANDO
PRONÓSTICO DE LA DEMANDA, FUENTES DE ENERGÍA
RENOVABLES Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA**

Los Miembros del Jurado de Examen de Grado aprueban la **Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica** de **Jorge Luis Solano Gallegos**.

Dr. Antonio Ramos Paz
Presidente del Jurado



Dra. Elisa Espinosa Juárez
Director de Tesis



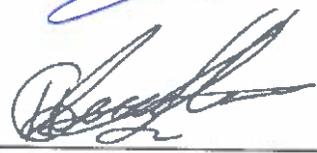
Dr. Fernando Ornelas Téllez
Vocal



Dr. J. Aurelio Medina Ríos
Vocal



M.C. José Luis Sánchez García
Revisor Externo (CENACE)



Dr. Roberto Tapia Sánchez
*Jefe de la División de Estudios de Posgrado
de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. UMSNH.
(Por reconocimiento de firmas)*



A mis seres queridos

Agradecimientos

A mis padres, hermanos y a mi novia por todo el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de este camino para lograr una meta más en mi vida profesional.

Un agradecimiento especial a mi asesora de tesis la Dra. Elisa Espinosa Juárez, por todo su apoyo y por su valiosa dirección que me sirvió para llegar a la conclusión de la misma.

Agradezco a todo mis amigos de maestría Luisa, Yeraldin, Carlitos, Juanma, Ángel y Marco, por haberme brindado su amistad y apoyo incondicional.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, institución que me abrió las puertas para mejorar mi preparación académica y profesional.

A los profesores de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por las enseñanzas y motivación.

Agradezco ampliamente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su apoyo económico que hizo posible la realización de este proyecto de investigación.

Resumen

La participación de las unidades de generación no convencionales esta aumentando debido a la necesidad de generar energía limpia, a bajo costo, para incidir en la reducción de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO_2) que se produce en la generación de energía en centrales térmicas. La penetración en gran escala de fuentes de energía renovable, como la fotovoltaica y la eólica en los sistemas eléctricos puede poner en riesgo la seguridad y confiabilidad del sistema, esto debido a las intermitencias o fluctuaciones de potencia ocasionadas por la naturaleza estocástica de los recursos renovables, por lo que se requieren distintos análisis para afrontar los retos operativos que esto implica.

En esta tesis se presenta una metodología para solución del despacho económico multiobjetivo para un período de tiempo determinado. En la formulación se consideran tanto unidades de generación convencionales como unidades no convencionales, en particular generación fotovoltaicas y eólicas, así como sistemas de almacenamiento de energía. La metodología considera además el pronóstico de la potencia demandada, la potencia de las unidades fotovoltaicas y eólicas para cada intervalo de tiempo analizado.

Se presentan casos de estudio en los que se analiza la precisión del modelo de pronóstico implementado, también se analizan diferentes niveles de penetración de renovables en los que se consideran los costos asociados a las unidades convencionales, unidades no convencionales y a los dispositivos de almacenamiento de energía, además se analiza la solución del problema del despacho económico multiobjetivo.

Palabras Claves: Sistemas eléctricos, Energías limpias, Emisiones contaminantes, Optimización multiobjetivo, Nivel de penetración de fuentes renovables.

Abstract

The participation of unconventional generation units is increasing due to the need to generate clean energy, at low cost, to influence the reduction of greenhouse gases, such as carbon dioxide (CO_2) that is produced in the power generation in thermal power plants. The large-scale penetration of renewable energy sources, such as photovoltaics and wind, into electrical systems can put the safety and reliability of the system at risk, due to intermittencies or power fluctuations caused by the stochastic nature of renewable resources. Therefore, different analyzes are required to face the operational challenges that this implies.

In this thesis a methodology is presented for the solution of the multi-objective economic dispatch for a determined period of time. In the formulation, both conventional generation units and non-conventional units are considered, in particular photovoltaic and wind generation, as well as energy storage systems. The methodology also considers the forecast of the demanded power, the power of the photovoltaic and wind units for each time interval analyzed.

Case studies are presented in which the precision of the implemented forecasting model is analyzed, different levels of penetration of renewables are also analyzed in which the costs associated with conventional units, non-conventional units and energy storage devices are considered. Furthermore, the solution to the problem of multi-objective economic dispatch is analyzed.

Keywords: Electrical systems, Clean energy, Pollutant emissions, Multiobjective optimization, Level of penetration of renewable sources.

Contenido

| | |
|--|------|
| Dedicatoria | III |
| Resumen | V |
| Abstract | VII |
| Contenido | IX |
| Lista de Figuras | XI |
| Lista de Tablas | XIII |
| Lista de Símbolos y abreviaturas | XV |
| Lista de Publicaciones | XVII |
| | |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Introducción | 1 |
| 1.2. Estado del arte | 2 |
| 1.3. Objetivo | 7 |
| 1.3.1. Objetivo general | 7 |
| 1.3.2. Objetivos particulares | 7 |
| 1.4. Justificación | 8 |
| 1.5. Metodología | 9 |
| 1.6. Estructura de la tesis | 10 |
| | |
| 2. Despacho económico de generación | 13 |
| 2.1. Despacho económico convencional | 13 |
| 2.1.1. Formulación del problema | 14 |
| 2.2. Despacho económico con inclusión de fuentes de energía renovables y sistemas de almacenamiento de energía | 16 |
| 2.2.1. Formulación del problema | 17 |
| 2.2.2. Función de costos para unidades no convencionales | 19 |
| 2.2.3. Restricciones de penetración de RES e inclusión de BESS | 20 |
| 2.2.4. EDRES e inclusión de BESS multiobjetivo | 21 |
| 2.3. Solución al problema del ED | 22 |
| 2.4. Conclusiones | 24 |
| | |
| 3. Pronóstico de demanda eléctrica, generación solar y eólica | 25 |
| 3.1. Pronóstico de demanda eléctrica | 25 |
| 3.2. Pronóstico de generación fotovoltaica | 26 |

| | |
|--|----|
| 3.3. Pronóstico de generación eólica | 26 |
| 3.4. Técnicas de predicción | 27 |
| 3.5. Pronóstico de demanda, energía solar y energía eólica para casos de estudios | 29 |
| 3.6. Conclusiones | 31 |
| 4. Metodología para la solución del despacho con fuentes de energía renovables e inclusión de sistemas de almacenamiento de energía y casos de estudio | 33 |
| 4.1. Metodología | 33 |
| 4.2. Casos de estudio | 37 |
| 4.2.1. Caso A | 39 |
| 4.2.2. Caso B | 39 |
| 4.2.3. Caso C | 42 |
| 4.2.4. Caso D | 46 |
| 4.3. Conclusiones | 53 |
| 5. Conclusiones y trabajos futuros | 55 |
| 5.1. Conclusiones generales | 55 |
| 5.2. Trabajos futuros | 56 |
| Referencias | 59 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| 2.1. Unidades térmicas disponibles para satisfacer una demanda [Wood <i>et al.</i> , 2013]. | 14 |
| 2.2. Unidades térmicas, renovables y almacenamiento para satisfacer una demanda ($P_{demanda}$). | 18 |
| 3.1. Pronóstico con una hora de adelanto de la demanda | 30 |
| 3.2. Pronóstico con una hora de adelanto de la generación fotovoltaica | 30 |
| 3.3. Pronóstico con una hora de adelanto de la generación eólica | 31 |
| 4.1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta | 34 |
| 4.2. Potencia demandada | 40 |
| 4.3. ED convencional | 41 |
| 4.4. ED con límite máximo de penetración de RES del 30 % utilizando datos reales | 43 |
| 4.5. ED con límite máximo de penetración de RES del 30 % utilizando datos pronosticados | 43 |
| 4.6. Costos de generación con límite máximo de inclusión de RES del 40 % | 44 |
| 4.7. Despacho económico con límite máximo de penetración de RES y BESS del 40 % | 45 |
| 4.8. Despacho económico con límite máximo de penetración de RES y BESS del 40 % | 46 |
| 4.9. Costos de generación con diferentes niveles de penetración de RES y BESS | 47 |
| 4.10. ED convencional Multi-objetivo | 49 |
| 4.11. Emisiones Contaminantes | 49 |
| 4.12. ED Multi-objetivo con inclusión de RES | 50 |

Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| 3.1. Error Cuadrático Medio (RMSE) | 31 |
| 4.1. Datos de unidades convencionales | 38 |
| 4.2. Datos de potencias unidades no convencionales y BESS | 38 |
| 4.3. Coeficientes de costos unidades no convencionales y BESS | 38 |
| 4.4. ED convencional con pronóstico de demanda | 40 |
| 4.5. ED con penetración máxima del 30 % y sin coeficiente de costo de RES . . | 42 |
| 4.6. ED con penetración máxima del 40 % y con coeficiente de costo de RES . . | 42 |
| 4.7. ED con diferentes niveles de penetración | 47 |
| 4.8. Comparativa de costos y potencias en diferentes casos de estudios | 48 |
| 4.9. ED convencional Multi-objetivo | 50 |
| 4.10. ED con penetración máxima del 30 % y sin coeficiente de costo de RES . . | 51 |
| 4.11. EDRES multi-objetivo con penetración máxima del 40 % de RES | 52 |
| 4.12. ED multi-objetivo con diferentes niveles de penetración | 53 |

Lista de Símbolos y abreviaturas

| | |
|-------|---|
| RES | Fuentes de energía renovable. |
| ESS | Sistemas de almacenamiento de energía. |
| BESS | Sistemas de almacenamiento de energía basado en baterías. |
| ED | Despacho económico. |
| GA | Algoritmo genético. |
| SGA | Algoritmo genético simple. |
| TGA | Algoritmo genético de dos fases. |
| ABC | Colonias de abejas artificiales. |
| PSO | Optimización de enjambre de partículas. |
| DE/TS | Búsqueda Evolutiva/Tabú Híbrida Diferencial. |
| EDRES | Despacho económico con fuentes de energía renovables. |
| WIM | Punto ideal ponderado. |
| ANN | Redes neuronales adaptativas. |
| NWP | Predicción numérica del clima. |
| QPSO | optimización de enjambre de partículas de inspiración cuántica. |
| MIP | Programación entera mixta. |
| LGCC | Ley general de cambio climático. |
| SEN | Sistema eléctrico nacional. |
| SEP | Sistema eléctrico de potencia. |
| SQP | Programación secuencial cuadrática. |
| AR | Modelo autorregresivo. |
| ARMA | Modelos autorregresivos de media móvil. |
| ARIMA | Modelos autorregresivos integrado de media móvil. |
| RMSE | Error cuadrático medio. |

Lista de Publicaciones

Elisa Espinosa-Juárez, Jorge Luis Solano-Gallegos, Fernando Ornelas-Téllez, ” *Economic Dispatch for Power System with Short-Term Solar Power Forecast*”, 2019 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI'19), Las Vegas, USA, 05-07 Dic. 2019.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

En la actualidad la generación de energía eléctrica con el constante incremento en costos, las grandes emisiones de gases de efecto invernadero y la disminución paulatina en las reservas de combustibles fósiles [Pazheri *et al.*, 2016][Jadoun *et al.*, 2018], ha obligado al sector energético a buscar tecnologías alternativas de generación basadas en fuentes de energías renovables (RES, por sus siglas en inglés) tales como la generación eólica, solar y los sistemas de almacenamiento de energía (ESS, por sus siglas en inglés), las cuales están teniendo una gran participación en los sistemas eléctricos, reduciendo los costos en la generación de energía eléctrica, las emisiones de gases de efecto invernadero y la utilización de fuentes de combustibles fósiles. Sin embargo, debido a la inclusión de las energías limpias en los sistemas eléctricos, el sector energético enfrenta grandes desafíos por la naturaleza estocástica de las mismas.

Actualmente la generación de energía por medio de fuentes renovables crece de manera importante, lo que hace que el uso de las RES y los sistemas de almacenamiento de energía tengan más importancia en la operación de los sistemas eléctricos. Un problema con la penetración a gran escala de estas tecnologías son la intermitencias y las fluctuaciones de potencia, lo cual dificulta su utilización en la operación del sistema eléctrico, debido a que tal potencia depende de factores geográficos y climáticos [Lin *et al.*, 2017][Chatrung, 2019].

Como una solución potencial para resolver las intermitencias y las fluctuaciones de potencia de las fuentes de energías renovables no convencionales, los sistemas de almacenamiento de energía basado en baterías (BESS, por sus siglas en inglés) ofrecen una solución para mitigar las fluctuaciones de potencia, su capacidad de almacenamiento y suministro de energía ofrece una respuesta rápida de ajuste de potencia activa, ya que la respuesta a los cambios de carga ocurren en aproximadamente 20 ms, además que estas tecnologías no producen emisiones de gases de efecto invernadero [Akorede *et al.*, 2010].

Existen distintos tipos de almacenamiento de energía, pero la opción más utilizada en la industria para el almacenamiento de energía son las baterías, dentro de las cuales destacan las baterías de plomo-ácido, baterías a base de níquel, baterías de azufre de sodio, baterías de sodio-níquel-cloruro y baterías de ion-litio. La elección de estas depende en gran medida a la aplicación de los BESS, longevidad, seguridad y la rentabilidad de estas debido los altos costos de las baterías [Chen y Sen, 2016].

En esta tesis se estudia la inclusión de RES y BESS en el problema de despacho económico de carga (ED, por sus siglas en inglés). El ED se realiza considerando la demanda que se tiene a lo largo de un cierto tiempo y se incluye el pronóstico tanto de la demanda de energía como de la generación fotovoltaica y la generación eólica.

1.2. Estado del arte

En el ED se establece de una forma óptima los recursos de generación eléctrica para satisfacer la demanda del sistema eléctrico reduciendo, en lo posible, los costos de generación y cumpliendo las restricciones operativa del sistema. El problema de optimización que se formula en el ED ha sido ampliamente estudiado y para su solución se han aplicado diversas técnicas.

En [Su y Lin, 2000] se sugiere un método basado en una red neuronal Hopfield para la solución ED convencional, donde se requiere un modelo lineal para relacionar la entrada-salida de la neurona; una de las características de este modelo es el uso de los factores de ponderación relacionados a la función de potencia lo que resulta ser más efectivo y sencillo en comparación con el método convencional basado en multiplicadores de Lagrange

[Wood *et al.*, 2013].

En [Zhang *et al.*, 2005] proponen un algoritmo evolutivo híbrido con técnicas cuasi-simplex basado en un método de Punto Ideal Ponderado (WIM, por sus siglas en inglés), para la solución de un modelo de ED de carga económico/ambiental considerando las incertidumbres de los coeficientes de costos, además de los coeficientes de emisiones de las unidades térmicas, donde tales incertidumbres son expresadas por números difusos; una de las ventajas de este modelo es que se puede tener un modelo más preciso cuando los coeficientes de costos y emisiones vienen representados por números difusos, además que la solución óptima obtenida por el modelo propuesto es estable y confiable.

En el trabajo realizado por Gaurav Prasad Dixit, *et al.* En [Dixit *et al.*, 2011] se diseña un método basado en optimización de colonias de abejas artificiales (ABC, por sus siglas en inglés) donde resuelven el ED convencional tomando en cuenta las emisiones producidas por las unidades convencionales. Se realizó una comparación con Algoritmo Genético Simple (SGA, por sus siglas en inglés) y con el Algoritmo Genético (GA, por sus siglas en inglés) híbrido donde los resultados reportados muestran un trabajo computacional, de fácil implementación, mejor que los algoritmos antes mencionados.

Por otro lado, en [Rajasekhar y Rao, 2017] se desarrolló un algoritmo para la solución del ED convencional donde utiliza el jacobiano invertido del algoritmo de flujo de potencia para obtener las ecuaciones de pérdidas de transmisión incrementales y obtener un cronograma de generación más preciso y con un costo mínimo. En [Chansareewittaya, 2018] se implementó un algoritmo híbrido el cual combina la evolución diferencial y búsqueda Tabú (DE/TS, por sus siglas en inglés), tal estudio presenta un sistema de 6 máquinas convencionales donde las funciones objetivos de costos y emisiones se formulan como una sola función, además compara DE con el modelo híbrido propuesto DE/TS, donde el modelo propuesto por las características de seguimiento anti-retroceso del TS se pueden obtener mejores resultados que con evolución diferencial.

Con el crecimiento global acelerado de la generación de energía por medio de fuentes de energías renovables, en los años recientes se han reportado diversos estudios sobre la integración de estas fuentes de energía limpias en el problema de ED, al que se le denomina despacho económico con fuentes de energía renovables (EDRES, por sus siglas en inglés),

el cual combina el despacho de energía convencional con el despacho de energía limpia. El EDRES combina la generación de energía por medio de fuentes convencionales y fuentes de energía renovables para satisfacer la demanda del sistema eléctrico de potencia al reducir en lo posible los costos de generación, tomando en cuenta disponibilidad del recurso renovable, la demanda, restricciones operativas del sistema.

En [Cheung y Rios-Zalapa, 2011] se implementa un nuevo sistema de EDRES dinámico y robusto denominado Aplicación de Control de Generación que afronta la incertidumbre en la penetración de fuentes limpias en gran escala en el sistema; tal algoritmo suministra al sistema capacidad rampa cuando se producen las incertidumbres ocasionadas por las fuentes renovables, esto para mantener la correcta operación y seguridad del sistema, ya que proporciona a los despachadores en grandes centros de control del sistema eléctrico la capacidad de administrar cambios en la generación, restricciones e intercambios simultáneamente en una base operativa a lo largo del día y casi en tiempo real.

En [Pazheri *et al.*, 2014] y [Al-Nahhal *et al.*, 2019], utilizan un algoritmo de programación cuadrática secuencial (SQP, por sus siglas en inglés), donde el trabajo realizado por Pazheri y Othman, muestra un análisis comparativo de costos entre el ED convencional y EDRES además que analiza los costos asociados con los daños a la salud y medio ambiente causados por las unidades convencionales. Además incluyen los costos de la generación solar, eólica e hidráulica, así como también los costos asociados a distintos tipos de sistemas de almacenamiento de energía. En el artículo [Yan *et al.*, 2015] se utiliza un algoritmo de optimización, pronóstico del recurso eólico y además, para asegurar el funcionamiento óptimo del sistema eléctrico, se consideran los sistemas de almacenamiento de energía para minimizar los costos tanto del recurso eólico, como de los sistemas de almacenamiento de energía; también se realiza una comparación de costos de operación con diferentes escenarios para comprobar el modelo propuesto. En el trabajo presentado en [Al-Nahhal *et al.*, 2019], se da solución al ED de carga con penetración de energía eólica analizando costo total en el sistema con la penetración de recurso eólico y sin él, concluyendo que su modelo propuesto muestra una solución más eficiente y convergencia más rápida.

Otro aspecto relevante para mejorar la confiabilidad y la seguridad en la operación de los sistemas eléctricos con altas penetraciones de fuentes renovables es la formulación del

EDRES considerando técnicas de pronóstico que permitan predecir la disponibilidad de la generación del recurso renovable e incluso de la demanda eléctrica que se tendrá en el futuro inmediato. En el pronóstico de la demanda eléctrica, el recurso solar y el eólico se han utilizado diversas técnicas. En [Vu *et al.*, 2016] se emplea un modelo autorregresivo (AR, por sus siglas en inglés) de orden selectivo para predecir la demanda eléctrica en un horizonte de pronóstico a corto plazo, se eligen distintos patrones estacionales y se agregan al modelo AR y finalmente, el modelo AR de orden selectivo elimina los retrasos más despreciables del modelo AR estacional.

Por otro lado, una de las técnicas más utilizadas para la predicción de la demanda eléctrica con datos históricos de años son las Redes Neuronales Adaptativas (ANN, por sus siglas en inglés), como en [Singh y Sahay, 2018], donde se predice la demanda eléctrica en un horizonte de corto plazo con la ayuda ANN de MATLAB. Se muestra que las ANN es una técnica muy precisa para la predicción de la demanda para una hora de anticipación en comparación con otras técnicas.

Para la predicción de la generación fotovoltaica, en el trabajo presentado en [Chen *et al.*, 2017] se implementa un modelo para la predicción de la energía fotovoltaica, el cual combina la predicción numérica del clima (NWP, por sus siglas en inglés) y las redes convolucionales. Se entrena a las redes convolucionales utilizando la regresión del proceso Gaussiano para convertir los valores de energía solar entrantes de los parques solares ubicadas arbitrariamente en una red para aprovechar la capacidad de aprendizaje de las redes convolucionales, después las redes convolucionales toman la entrada de NWP para generar valores de energía solar y posteriormente calcular la predicción para los parques solares. En [Serttas *et al.*, 2018], se presenta una metodología nueva que combina dos técnicas, llamada Mycielski-Markov para la predicción en un horizonte a corto plazo, donde Mycielski es una técnica de procesamiento de señales la cual explora los datos históricos y localiza en los datos de radiación solar los valores que reinciden, mientras que Markov es un técnica probabilística la cual predice un valor en base a probabilidades de transición de los estados de radiación solar.

En lo que corresponde a las técnicas para la predicción de energía eólica, en [Surussavadee y Wu, 2015], se utiliza un modelo basado en redes neuronales para la predicción del viento con 3 y 6 horas de anticipación; así como los datos históricos de la velo-

cidad del viento de los años 2011 y 2012 para el entrenamiento de la red neuronal, mientras que evalúan la precisión del modelo con los datos de 2013. Los resultados muestran que el modelo propuesto es más eficiente cuando el período de predicción es más corto. En [Verma *et al.*, 2018] se presenta un modelo para predecir la velocidad del viento en un horizonte de pronóstico a corto plazo basado en las cadenas de Markov, tal modelo estocástico se utiliza para sistemas que cambian aleatoriamente y sólo dependen de una sola variable, la velocidad del viento, donde ciertos datos pueden ser organizados en estaciones/grupos para que sean procesados de una manera más eficaz.

En lo referente al almacenamiento de energía, la reducción de costo de los BESS ha permitido un avance significativo en la aplicación de los sistemas de almacenamiento en la operación de los sistemas eléctricos de pequeña y gran escala. En [Amereh *et al.*, 2014] reportan un GA híbrido combinado con el algoritmo de Optimización de Enjambre de Partículas (PSO, por sus siglas en inglés) para solucionar el EDRES con inclusión de BESS; el modelo propuesto utiliza el GA híbrido en las iteraciones iniciales para reducir la probabilidad de un mínimo local, para posteriormente aumentar la velocidad de optimización y la capacidad de ajuste local utilizando el PSO, todo esto para minimizar el valor presente neto total y maximizar el índice de confiabilidad energética.

En el trabajo realizado en [Zhang *et al.*, 2015], proponen un modelo optimización de enjambre de partículas de inspiración cuántica (QPSO, por sus siglas en inglés), donde el estado de una partícula se simboliza mediante un bit cuántico y un ángulo, en el lugar de la posición y la velocidad de la partícula como en el PSO simple, para la solución de un ED con inclusión de energía eólica, BESS y limitando las emisiones; se muestra que la presencia de los BESS permiten aminorar las intermitencias ocasionadas por las energías limpias. Los resultados del modelo implementado muestran que los costos de generación y las emisiones disminuyen drásticamente al tener una buena coordinación RES y BESS, además esto permite una inclusión mayor de energías no convencionales en los sistemas eléctricos.

En [Alqunun y Crossley, 2016], se reporta un método de optimización para minimizar costos de una microrred con inclusión de BESS, que permite el intercambio de energía con el sistema de distribución principal; el modelo implementando está basado en

Programación Entera Mixta (MIP, por sus siglas en inglés), tal modelo relaciona la energía nominal del BESS y el costo total de generación de una microrred cuando esta opera en modo conectado y desconectado. La aplicación del BESS fue diseñada para que cuando los precios de electricidad del mercado eléctrico fueran relativamente bajos, entonces los BESS pudieran extraer energía de la red principal para almacenar, para posteriormente cuando los costos de electricidad fueran relativamente altos las baterías pudieran suministrar energía para así abatir costos de generación, además se analizó el impacto de la energía nominal del BESS cuando la microrred opera en modo conectado y desconectado, y se concluye que si se reduce la potencia nominal y se aumenta la energía nominal del BESS, se puede mejorar los beneficios económicos de la microrred. Además, con la ayuda del software Matlab en [Ran *et al.*, 2018] se propone un sistema de una microrred con generación fotovoltaica con almacenamiento de energía, para suministrar energía fotovoltaica continua y estable para respaldar el funcionamiento económico, confiable y seguro del sistema. En el modelo propuesto, se simula la microrred con los modelos matemáticos de todos los elementos involucrados y además este tipo de microrred emplea un esquema de control multinivel de dos capas, donde la primera capa es el monitoreo y control de los flujos de potencia desde el sistema de generación de energía fotovoltaica hasta ESS y la carga de los usuarios, mientras que la segunda capa de los dispositivos está formada por la unidad de control local de cada elemento del sistema.

1.3. Objetivo

1.3.1. Objetivo general

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología para la solución del EDRES multi-objetivo que permita la inclusión de fuentes de energías renovables y los sistemas de almacenamiento de energía basado en baterías para reducir los costos de generación de energía eléctrica y la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero.

1.3.2. Objetivos particulares

- Formular el problema del EDRES incorporando los BESS.

- Aplicación de técnicas de pronóstico para predecir la demanda eléctrica y RES.
- Establecer una metodología que permita incorporar el pronóstico de la demanda eléctrica y las fuentes de energía renovables en la solución del problema del ED.
- Implementar la metodología y realizar estudios sobre sistemas de prueba para comprobar su eficacia.

1.4. Justificación

En la actualidad la problemática que se tiene sobre calentamiento global, los altos costos de generación de energía y la disminución en las reservas de petróleo, a llevado al sector energético a la necesidad de impulsar tecnologías más eficientes y limpias para la generación de energía [Secretaría de Energía, 2019].

Nuestro país posee un gran potencial para la captación de generación de energías limpias, ya que se cuenta con altos niveles de irradiación solar, fuertes vientos, mares, ríos y zonas geotérmicas. La energía solar en nuestro país en este año 2020 tiene una capacidad instalada de más de 5500 megawatts (MW), repartida en las 67 plantas solares que se tiene [Energíahoy, 2020]; este tipo de tecnología tuvo un incremento anual en su participación del 287 % entre 2019-2018, lo cual significó que su participación en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) pasó del 1 % al 3 % con respecto al año anterior y se prevee que al concluir este año se incremente la capacidad instalada entre 200-500 MW, mientras que la energía eólica tiene una capacidad instalada de más de 6000 MW hasta inicios de este año repartidas en 71 plantas eólicas en el país [Energías renovables, 2020]; este tipo de tecnología tuvo un incremento anual en su participación del 34 % entre 2019-2018, lo cual significó que su participación en el SEN pasó del 4 % al 5 % y se contempla incrementar la capacidad instalada entre 1000-1200 MW para este tipo de tecnología al terminar este año [Sígler Édgar, 2020][Martín C. Jon, 2020]. Nuestro país tiene como meta que para el año 2024 la generación de energía por medio de RES represente el 35 % de la generación total del país y que para el año 2050 la energía generada por RES contribuya con un 50 % del consumo total en el país [Prospectiva de Energías Renovables 2018-2032, 2018][LGCC, 2018][LTE, 2015].

Por lo que ante el incremento constante que se tiene en la actualidad y se tendrá en un futuro, son de gran interés las técnicas para la predicción del recurso solar y eólico, esto debido a las incertidumbres de su disponibilidad las cuales pueden comprometer la calidad, seguridad y confiabilidad del sistema eléctrico, por ello la importancia de un modelo de pronóstico eficaz con el que se pueda predecir con un horizonte de pronóstico adecuado a las necesidades del sistema. La predicción de demanda eléctrica, es un proceso de gran importancia en la planificación y operación de los sistemas eléctricos, ya que dependiendo del horizonte de pronóstico, se puede predecir demandas altas que puedan comprometer la calidad, seguridad y confiabilidad del sistema; también se puede prever la construcción de nuevas plantas de generación o el desarrollo de las líneas de transmisión, por ello la elección de un método eficaz de pronóstico es de suma importancia. Un mal pronóstico podría estar comprometiendo la seguridad y confiabilidad del sistema en el caso de un pronóstico muy por debajo del valor real o cuando el valor pronosticado está muy por arriba del valor real podría provocar pérdidas económicas.

Por otro lado, las intermitencias y fluctuaciones de potencia características del recurso solar y eólico, hace que los BESS tengan una gran importancia, ya que con la ayuda de estas tecnologías se pueden solucionar o aminorar en gran medida estos problemas, puesto que con este tipo de tecnologías se puede almacenar energía en los tiempos de mayor captación de energía renovables para posteriormente entregarla en los tiempos de RES no disponibles o cuando se presentan problemas de fluctuaciones en la generación, por lo que los BESS representan una gran alternativa para contribuir a una operación segura, económica y confiable de los sistemas eléctricos.

Uno de los estudios más importantes que se realizan para el análisis y la operación del sistema eléctrico es el ED de carga, por lo que es de gran interés incluir en este estudio los RES y los BESS que caracterizan a los sistemas eléctricos actuales, así como el pronóstico de las variables estocásticas que intervienen en su formulación.

1.5. Metodología

El desarrollo de esta tesis se basa en la realización de las siguientes actividades:

- Revisión bibliográfica de temas y conceptos relacionados con las tecnologías renovables y de los sistemas de almacenamiento de energía en baterías.
- Revisión bibliográfica de los métodos de pronóstico y solución del EDRES multi-objetivo reportados en la literatura.
- Desarrollo e implementación de metodología para la solución del EDRES multi-objetivo y pronóstico.
- Planteamiento de casos de estudios para evaluar y comparar el desempeño del algoritmo propuesto.

1.6. Estructura de la tesis

Esta tesis consta de 5 capítulos, a continuación se menciona una breve descripción de los restantes Capítulos:

En el Capítulo 2 se presenta la formulación del despacho económico convencional y la formulación del despacho económico con fuentes de energías renovables e inclusión de los sistemas de almacenamiento de energía.

En el Capítulo 3 se hace mención de la importancia del pronóstico de demanda, generación fotovoltaica y eólica, así como distintos métodos para realizarlo. Se presenta la aplicación de la técnica de AR para las series de tiempo que se utiliza en los casos de estudios de EDRES.

En el Capítulo 4 se describe la metodología propuesta para la realización del pronóstico de potencia demandada, generación solar y eólica para el ED multi-objetivo con la inclusión de tecnologías renovables y los BESS para reducir los costos de generación y las emisiones contaminantes. También se aplica la metodología propuesta para la solución del EDRES con inclusión de BESS en distintos casos de estudios.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones de este trabajo así como también se hace una sugerencia de trabajos futuros.

Capítulo 2

Despacho económico de generación

En este capítulo se presenta la formulación y técnicas de solución del problema del ED convencional, así como del EDRES con inclusión de BESS. Además en la formulación se considera una función objetivo de emisiones contaminantes adicional a la función de costos; también se hace mención del método utilizado para la solución del ED multiobjetivo con RES e inclusión de los BESS.

2.1. Despacho económico convencional

El problema del ED convencional de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), se refiere a la utilización de plantas de generación térmicas para despachar energía, siempre cumpliendo con las restricciones operativas del sistema, con el fin de satisfacer la demanda eléctrica, considerando los costos de producción de las unidades presentes en el sistema, para minimizar el costo total de operación.

La realización de este proceso es muy importante debido a la incertidumbre que presenta la carga en el tiempo, por lo que se debe lograr una adecuada coordinación en la potencia de salida en cada generador, para mantener un equilibrio de potencia entre la carga y la generación, y mantener los parámetros del sistema en su rango normal de operación.

2.1.1. Formulación del problema

El problema del ED consiste en satisfacer una potencia demandada en el sistema $P_{demanda}$, de un sistema que consta de N generadores conectados a un bus el cual alimenta a la carga $P_{demanda}$, como se muestra en la Figura 2.1. Cada generador genera una potencia P_{g_i} ($i = 1, 2, 3, \dots, N$); el costo de generación de cada generador dependerá del costo del combustible que requieren los generadores $Fuel_{1,2,3,\dots,N}$.

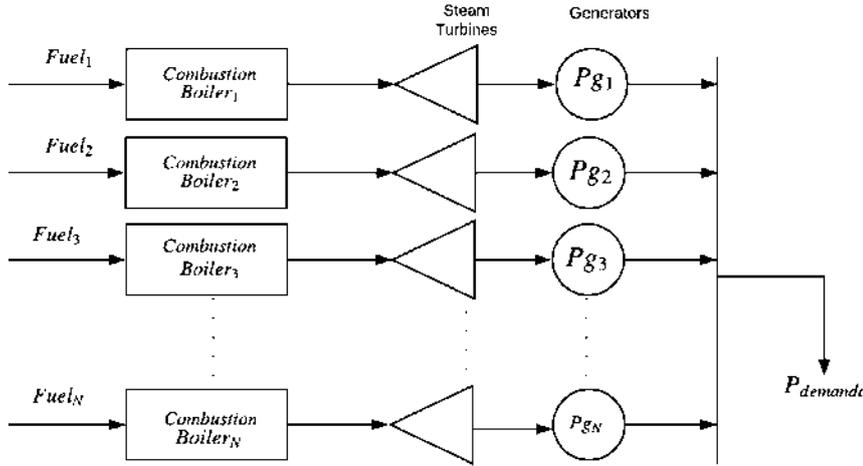


Figura 2.1: Unidades térmicas disponibles para satisfacer una demanda [Wood *et al.*, 2013].

Por lo tanto, la formulación del problema del ED convencional puede representarse como un problema de optimización cuya función objetivo es minimizar el costo total de generación, sujeto a restricciones operativas del sistema. Esto es,

$$\min C_{Total} = \min \sum_i^N C_i(P_{g_i}) \quad (2.1)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} P_{g_1} + \dots + P_{g_N} - P_{loss} &= P_{demanda} & i = 1, 2, 3, \dots, N \\ P_{g_i}^{min} &\leq P_{g_i} \leq P_{g_i}^{max} & i = 1, 2, 3, \dots, N \end{aligned}$$

donde:

C_{Total} es el costo total de generación.

$C_i(P_{g_i})$ es el costo de generación de la unidad i para generar la potencia P_{g_i} .

N es el número total de generadores.

Pg_i es la potencia despachada por la unidad i .

$P_{demanda}$ es la potencia demandada.

P_{loss} son las pérdidas del sistema.

Pg_i^{min} es la potencia mínima de generación por la unidad i .

Pg_i^{max} es la potencia máxima de generación por la unidad i .

El costo de generación asociado a las unidades convencionales usualmente se representa por un polinomio cuadrático, es decir, [Huang y Huang, 2003][Wood *et al.*, 2013]

$$C_i = \alpha_i + \beta_i Pg_i + \delta_i Pg_i^2 \quad (2.2)$$

Donde

α_i , β_i , δ_i son los coeficientes de costos asociados a cada una de las unidades convencionales.

Por lo que (2.1) se puede reescribir como,

$$\min C_{Total} = \min \sum_i^N C_i(Pg_i) = \min \sum_{i=1}^N (\alpha_i + \beta_i Pg_i + \delta_i Pg_i^2) \quad (2.3)$$

Pérdidas en el sistema

También es posible incluir en la formulación del ED, las pérdidas ocasionadas por la distribución de energía desde el punto de generación hasta el punto de consumo.

Una forma de incluir las pérdidas del sistema en el problema de ED es mediante la matriz de coeficientes de pérdidas, cuyos elementos se obtienen a partir de la impedancia de los elementos que componen la red y de su topología. La ecuación de pérdidas está dada por [Basu, 2005];

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Pg_i \cdot B_{ij} \cdot Pg_j + \sum_{i=1}^N B_{0i} \cdot Pg_i + B_{00} \quad (2.4)$$

donde:

P_{loss} son las pérdidas del sistema.

B_{ij} es una matriz cuadrada de igual dimensión que Pg_i .

B_{0i} es un vector columna de longitud igual a Pg_i .

B_{00} es un valor constante.

Por lo tanto, la restricción de balance de potencia del sistema queda representada por [Chandram *et al.*, 2008][Wood *et al.*, 2013],

$$P_{demanda} + P_{loss} - \sum_{i=1}^N Pg_i = 0 \quad (2.5)$$

Función objetivo para emisiones contaminantes

Adicionalmente, cabe mencionar que, en el problema del ED convencional se pueden incluir otras funciones objetivos, tales como la reducción de emisiones contaminantes o las penalizaciones por daños a la salud y medio ambiente asociadas a las emisiones de CO_2 . En esta tesis, además de incluir la función de costos también se incluye la función de emisiones contaminantes, la cual se puede expresar como [Rodrigues de Assis *et al.*, 2018],

$$\min \quad Emisiones_{total} = \sum_{i=1}^N (\sigma_i Pg_i^2 + \tau_i Pg_i + \gamma_i + \lambda_i \sin(\zeta Pg_i)) \quad ton/hr \quad (2.6)$$

donde:

$\sigma, \tau_i, \gamma_i, \lambda_i, \tau_i, \zeta_i$ son los coeficientes de emisiones contaminantes asociados a la generación de la unidad i .

2.2. Despacho económico con inclusión de fuentes de energía renovables y sistemas de almacenamiento de energía

En el problema del ED además de unidades convencionales se pueden considerar unidades de generación con fuentes renovables. La inclusión de las fuentes de energía renovables en el problema EDRES no solo permite el poder disminuir significativamente los costos de generación de energía, sino también permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero [Salhi *et al.*, 2014]. Este proceso permite combinar el despacho de energía por medio de unidades convencionales con unidades no convencionales cumpliendo los mismos requerimientos que el despacho convencional. Este proceso es de gran interés

en la operación de los sistemas eléctricos y en el mercado eléctrico de la actualidad por la creciente penetración de las energías limpias y la inclusión de sistemas de almacenamiento de energía.

2.2.1. Formulación del problema

El problema del EDRES al igual que el ED clásico consiste en satisfacer una demanda $P_{demanda}$, donde el sistema incluye generadores térmicos, plantas de generación de fuentes renovables y la inclusión de BESS, como se muestra en la Figura 2.2. Por lo tanto, la formulación del problema del EDRES puede expresarse como un problema de optimización cuya función objetivo es minimizar el costo total de generación, que incluye los costos de generación convencional, costos de generación de fuentes renovables y el costo de almacenamiento de energía y sujeto a distintas restricciones operativas del sistema.

$$\min\left(\sum_i^N C_i + \sum_i^{N_{res}} Cost_{resi} + \sum_i^{N_{storage}} Cost_{storagei}\right) \quad (2.7)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} P_g^{total} + P_{total}^{res} - P_{storage} + P_{dess} - P_{loss} &= P_{demanda} \\ P_g^{min} &\leq P_g \leq P_g^{max} && i = 1, 2, 3, \dots, N \\ P_{solar_i}^{min} &\leq P_{solar_i} \leq P_{solar_i}^{max} && solar_{i=1,2,3,\dots,N_S} \\ P_{wind_i}^{min} &\leq P_{wind_i} \leq P_{wind_i}^{max} && wind_{i=1,2,3,\dots,N_W} \\ P_{storage_i}^{min} &\leq P_{storage_i} \leq P_{storage_i}^{max} && storage_{i=1,2,3,\dots,N_{storage}} \end{aligned}$$

donde:

$Cost_{resi}$ es el costo de generación de las unidades de fuentes renovables.

$Cost_{storagei}$ es el costo de almacenamiento de los $BESS_i$.

N_{res} es el número total de unidades no convencionales.

P_g^{total} es la potencia total generada por las unidades convencionales.

P_{dess} es la potencia despachada por los BESS.

$P_{storage}$ es la energía almacenada en la unidad de almacenamiento i .

$P_{solar_i}^{min}, P_{solar_i}^{max}$ es la potencia mínima y máxima de generación de la unidad fotovoltaica i .

$P_{wind_i}^{min}, P_{wind_i}^{max}$ es la potencia mínima y máxima de generación de la unidad eólica i .

$P_{storage_i}^{min}, P_{storage_i}^{max}$ es la potencia mínima y máxima del dispositivo de almacenamiento i .

N_S es el número de unidades fotovoltaicas.

N_W es el número de unidades eólicas.

$N_{storage}$ es el número de dispositivos de almacenamiento de energía i .

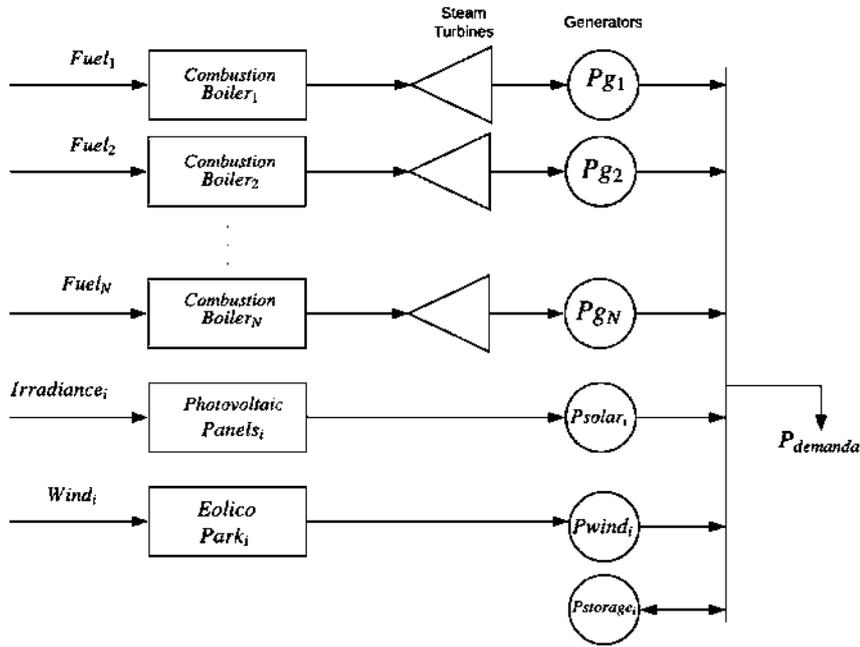


Figura 2.2: Unidades térmicas, renovables y almacenamiento para satisfacer una demanda ($P_{demanda}$).

Además en el EDRES con almacenamiento de energía se deben incluir restricciones al estado de carga y descarga de las baterías, lo cual se abordará en la sección 2.2.3.

La potencia total de las fuentes de energía renovables es,

$$P_{total}^{res} = \sum_{i=1}^{N_S} P_{solar_i} + \sum_{i=1}^{N_W} P_{wind_i} \quad (2.8)$$

2.2.2. Función de costos para unidades no convencionales

La función de costos en ($\$/MWh$) asociados en la generación de energía por medio de las unidades no convencionales depende de varios factores, como el tipo de fuente de energía no convencional utilizada, el costo correspondiente al mantenimiento, operación, eficiencia/rendimiento [International Renewable Energy Agency, 2018]. En esta tesis se utiliza la siguiente ecuación de costos para las RES [Pazheri *et al.*, 2014][Basu, 2019];

$$Cost_{res} = C_t \cdot P_t \quad (2.9)$$

donde

t es el tipo tecnología no convencional.

C_t es el coeficiente de costo correspondiente al tipo de tecnología no convencional.

P_t es la potencia inyectada por el tipo de fuentes renovable.

Función de costos para los sistemas de almacenamiento de energía

Este factor de costos al igual que a las tecnologías renovables depende de varios factores como el tipo de dispositivo de almacenamiento, costo de capital, mantenimiento, la ubicación de operación del equipo [Supingklad *et al.*, 2016][Ribeiro *et al.*, 2001], y se puede expresar mediante [Pazheri *et al.*, 2014];

$$Cost_{storage} = C_b \cdot P_b \quad (2.10)$$

donde

C_b es el coeficiente de costo correspondiente al tipo de dispositivo de almacenamiento.

b es el tipo de dispositivo de almacenamiento (batería de iones de litio, batería plomo-ácido, batería azufre de sodio, aire comprimido y hidro bombeado).

P_b es la potencia inyectada por el tipo de dispositivo de almacenamiento.

De acuerdo a lo anterior, se puede representar una sola ecuación para la función de costos expresada como,

$$C_{TOTAL} = \sum_{i=1}^N (\alpha_i + \beta_i P g_i + \delta_i P g_i^2) + \sum_{t=1}^{N_{res}} C_t \cdot P_t + \sum_{b=1}^{N_{storage}} C_b \cdot P_b \quad (2.11)$$

2.2.3. Restricciones de penetración de RES e inclusión de BESS

Restricción para RES

La energía total despachada por las plantas de generación no convencionales se le asigna un porcentaje de nivel máximo de penetración para satisfacer la demanda. La determinación de este factor es de gran importancia para mantener la calidad, seguridad y confiabilidad del suministro eléctrico, ya que de considerar un factor de penetración de RES demasiado grande, el sistema puede no tener capacidad de respuesta para afrontar las incertidumbres ocasionadas por RES [Pazheri *et al.*, 2014]. El factor asignado para la máxima penetración de RES se incluye como una restricción en el problema del EDRES mediante,

$$P_{total}^{res} \leq X^{level} P_{demand} \quad (2.12)$$

donde; X^{level} es el porcentaje máximo de inclusión de RES en el sistema.

Restricción para los BESS

Las características operativas de las baterías hace necesario incluir restricciones adecuadas en el problema del EDRES. Las restricciones de potencia de las baterías se formulan para evitar que la potencia despachada por las baterías durante el período no disponible de RES se descarguen totalmente o evitar que se carguen más allá de su límite máximo de almacenamiento, durante el período de RES disponible, por lo que se considera que la potencia despachada por las baterías (P_{dessa}) debe ser inferior a una cierta proporción η del mínimo $P_{storage}^{min}$, de la misma forma se considera una proporción δ de su máximo $P_{storage}^{max}$ cuando se está cargando, lo que se puede expresar con:

$$\eta P_{storage}^{min} \leq P_{dessa} \leq \delta P_{storage}^{max} \quad (2.13)$$

donde P_{dessa} ; es la potencia despachada por la unidad de almacenamiento i ,

La suma de la potencia entregada en el período de descarga T_{dl} no debe exceder la energía total almacenada durante $T_{storage}$, lo que se puede representar con la ecuación 2.14;

$$\sum_{T_{dl}} P_{storage} \leq \sum_{T_{storage}} P_{storage} \quad (2.14)$$

La energía se almacena cuando la energía renovable no se ha despachado (P_{resnd}) durante el período de tiempo $T_{storage}$ considerado [Pazheri *et al.*, 2016], es decir,

$$E_{storage} = \sum_{i=1}^{T_{storage}} P_{storagei} T_{storagei} \quad (2.15)$$

$$P_{storagei} = \frac{\int_t P_{resnd} dt}{\int_t dt} \quad (2.16)$$

Donde

$E_{storage}$ es la energía almacenada.

T_{dl} es el período de descarga.

$T_{storage}$ es el período de almacenamiento.

2.2.4. EDRES e inclusión de BESS multiobjetivo

Adicionalmente, en el problema del EDRES e inclusión de BESS tanto como en el ED convencional es posible incluir más de una función objetivo, por lo que se constituye un problema de ED multiobjetivo.

En esta tesis se considera el EDRES e inclusión de BESS, donde además de la función de costos se incluye la función de emisiones contaminantes. La formulación del EDRES con inclusión de BESS y multiobjetivo es;

$$\min\left(\sum_i^N C_i + \sum_i^{N_{res}} Cost_{resi} + \sum_i^{N_{storage}} Cost_{storagei}, Emissiones_{total}\right) \quad (2.17)$$

Sujeto a:

$$Pg^{total} + P_{total}^{res} - P_{storage} + P_{dess} - P_{loss} = P_{demanda}$$

$$Pg_i^{min} \leq Pg_i \leq Pg_i^{max}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

$$\begin{aligned}
P_{solar_i}^{min} &\leq P_{solar_i} \leq P_{solar_i}^{max} && solar_{i=1,2,3,\dots,NS} \\
P_{wind_i}^{min} &\leq P_{wind_i} \leq P_{wind_i}^{max} && wind_{i=1,2,3,\dots,NW} \\
P_{storage_i}^{min} &\leq P_{storage_i} \leq P_{storage_i}^{max} && storage_{i=1,2,3,\dots,NST} \\
P_{total}^{res} &\leq X^{level} P_{demand} \\
\eta P_{storage_i}^{min} &\leq P_{dessi} \leq \delta P_{storage_i}^{max} \\
\sum_{T_{dl}} P_{storage} &\leq \sum_{T_{storage}} P_{storage}
\end{aligned}$$

2.3. Solución al problema del ED

En la literatura existen muchas técnicas para resolver el despacho económico convencional, desde las técnicas más sencillas donde no se consideran todas las restricciones operativas del sistema hasta técnicas mejor desarrolladas donde se realiza un análisis en el que incrementa su nivel de complejidad; algunas de las técnicas convencionales frecuentemente utilizadas en la literatura son método de Lagrange, método de Iteración-Lambda, método Gradientes y método de Newton.

Dentro de las técnicas ampliamente utilizadas basadas en inteligencia artificial para la solución del problema del ED, se encuentran la optimización de enjambre de partículas, colonias de abejas artificiales, la programación secuencial cuadrática y algoritmos genéticos.

En esta tesis para resolver el problema de optimización que se plantean en el EDRES con inclusión de BESS, se utiliza el Toolbox de Optimización de Matlab, en particular la función `fminimax` que permite resolver problemas multiobjetivo. El método que utiliza está basado en programación cuadrática secuencial; este es una extensión del método de cuasi-Newton, este método es muy eficiente para la solución numérica de problemas de optimización no lineal sujeto a restricciones, además es muy efectivo resolviendo pequeños, medianos y ciertas clases de problemas con no-linealidades a gran escala [Palma *et al.*, 2001][Wang y Pu, 2013]. En este método se modela la función objetivo en la iteración x^k como un subproblema cuadrático de segundo orden y minimiza este subproblema para definir el nuevo punto x^{k+1} [Bidabadi *et al.*, 2016], además este método consta de tres etapas; la actualización de la matriz Hessiana de la función lagrangiana, solución de problemas de programación

cuadrática y por último búsqueda de línea y cálculo de la función de mérito. La formulación de un problema de optimización no lineal con restricciones es la siguiente [Su, 2011],

$$\min f(x) \quad (2.18)$$

Sujeto a:

$$c_i(x) \geq 0 \quad i \in I = 1, 2, \dots, m \quad (2.19)$$

donde $x \in R^n$, $f : R^n \rightarrow R$ y $c_i(i \in I) : R^n \rightarrow R$ son continuas y diferenciales, se denota $f(x^k)$ por f^k , $C(x^k)$ por C^k , $g(x^k)$ por g^k y $A(x^k)$ por A^k . Se asume que

$$g(x) = \nabla f(x)$$

$$C(x) = (c_1(x), c_2(x), \dots, c_m(x))^T$$

$$A(x) = (\nabla c_1(x), \nabla c_2(x), \dots, \nabla c_m(x))$$

Para resolver (2.18), se utiliza el método SQP, el cual genera una secuencia x^k que converge a la solución deseada mediante la resolución iterativa del problema de programación cuadrática,

$$\min \nabla g(x)^T d + \frac{1}{2} d^T H d \quad (2.20)$$

Sujeto a:

$$C(x) + A(x)^T d \leq 0 \quad (2.21)$$

donde $H \in R^{n \times n}$ se elige como una aproximación positiva al Hessiano de la función lagrangiana, obtenidas por técnicas cuasi-newton.

La solución al subproblema de programación cuadrática produce un vector d^k , el cual se utiliza para formar una nueva iteración. Para obtener un nuevo valor de \mathbf{x} se utiliza (2.22);

$$x^{k+1} = x^k + \lambda^k d^k \quad (2.22)$$

Donde d^k resuelve (2.21) y λ^k es el tamaño de paso para reducir el valor de una función de mérito para (2.19). Esta función de mérito es normalmente una función de penalización como la función de penalización exacta l_1 . Se ha demostrado que SQP es globalmente convergente.

2.4. Conclusiones

En este Capítulo se presentó la formulación del Despacho económico convencional y del despacho económico con fuentes de energías renovables e inclusión de los BESS. Además se presentó la formulación del despacho económico multiobjetivo, considerando como función adicional la minimización de las emisiones contaminantes. Se distingue una notoria diferencia en la formulación entre los distintos casos, ya que la formulación del EDRES es más compleja al considerar más restricciones operativas del sistema, entre las que se consideraron restricciones en las cuales los sistemas de almacenamiento de energía no pudieran cargarse o descargarse por completo, esto para evitar reducir su vida útil; también se consideró un nivel máximo de penetración de RES, el cual debe ser determinado de acuerdo a las características del sistema.

Capítulo 3

Pronóstico de demanda eléctrica, generación solar y eólica

La alta participación de las fuentes de energía renovables en el sistema eléctrico conlleva a grandes desafíos debido a la naturaleza estocástica y disponibilidad de las energías limpias, ya que estas dependen de factores geográficos y climáticos, por lo que la implementación de un buen pronóstico puede mejorar la confiabilidad y seguridad del sistema eléctrico, la planificación de la producción de energía para las necesidades del mercado eléctrico, evitando así producción deficiente o sobrada de energía [Yagli *et al.*, 2018].

3.1. Pronóstico de demanda eléctrica

En la actualidad, para las empresas encargadas de producir energía eléctrica esta práctica se ha vuelto una parte fundamental porque con esto las empresas pueden realizar la toma de decisiones en base a la cantidad despachada y los precios de tales, ya que de tener un pronóstico de demanda muy por debajo de la real, puede ocasionar que el sistema no esté preparado ante una demanda real alta y en tal caso se estaría arriesgando tanto la confiabilidad y la seguridad del sistema, y en caso contrario al estar generando más de lo que se está requiriendo ocasionaría cuantiosos gastos, debido a que las unidades comprometidas estarían trabajando improductivamente.

3.2. Pronóstico de generación fotovoltaica

Con la rapidez con la que crece la participación de la generación fotovoltaica en la operación de los sistemas eléctricos y con la proyección que tendrá en el futuro este tipo de generación, inevitablemente se tiene que abordar el tema de las incertidumbre de la generación de energía producidas por plantas solares, que pueden poner en riesgo la seguridad y confiabilidad del suministro eléctrico, si el sistema no está preparado para afrontar dichas incertidumbres [Snegirev *et al.*, 2017]. La generación solar es altamente dependiente de factores geográficos, meteorológicos y la capa de nubes entre otras. Por tal motivo, el pronóstico del recurso solar es tema de gran importancia en la operación del sistema eléctrico y del mercado eléctrico por que con la implementación de un modelo de pronóstico eficaz, podremos garantizar la óptima operación del sistema y planificación coordinada entre las unidades despachables de generación, para así prevenir una insuficiente o una sobrada generación que lleve a un elevado costo económico de generación. En la literatura están reportados una gran diversidad de técnicas para la realización del pronóstico de la irradiación solar para diferentes horizontes de tiempo. En la actualidad se usan ampliamente métodos estadísticos y métodos heurísticos para la realización de modelos de pronóstico. Dentro de los métodos más utilizados se encuentran probabilidad de Poisson, redes neuronales, análisis de regresión lineal, pronóstico basado en imágenes satelitales, pronóstico utilizando redes inalámbricas de sensores, análisis discriminante, método de aprendizaje conjunto y redes bayesianas [Leka y Barnes, 2003][Yu *et al.*, 2010][Bloomfield *et al.*, 2012][Huang *et al.*, 2017].

3.3. Pronóstico de generación eólica

Con la creciente inclusión de parques eólicos en el sistema eléctrico ha surgido un enorme interés e importancia por implementar modelos que sean capaces de pronosticar la generación de energía de parques eólicos con días de anticipación. La iniciativa privada tanto como a la gubernamental requieren implementar modelos más precisos y eficientes de pronóstico para poder cumplir con los requerimientos de calidad, confiabilidad, estabilidad y seguridad en el suministro. La penetración en gran escala de este recurso renovable y su variabilidad hace que cuando existen las fluctuaciones de potencia estas influyen tanto

en el control como en el despacho de energía del sistema eléctrico [Landberg, 1998]. Con la implementación de modelos de pronóstico para la generación de energía eólica se puede tener una mejor coordinación en el despacho de energía entre las plantas [Kolev y Sulakov, 2018]. Ante esta problemática, surgen una gran variedad de estudios que emplean modelos para predecir la velocidad del viento, tales como modelos físicos o numéricos, modelos estadísticos y los modelos basados en inteligencia artificial.

3.4. Técnicas de predicción

Como se mencionó previamente, en la literatura existen una gran variedad de técnicas para la realización del pronóstico de distintas variables, tales como modelos numéricos, modelos estadísticos y modelos basados en inteligencia artificial.

Los modelos numéricos son métodos frecuentemente usados para predecir el clima mediante el uso de fórmulas numéricas. Los modelos numéricos tienen la capacidad de poder pronosticar con precisión el futuro [Verma *et al.*, 2018].

Los modelos estadísticos son cuantitativos y se clasifican en estocásticos y estadísticos, estos métodos buscan analizar los movimientos de tendencia, estacionalidad y aleatoriedad que caracterizan a una serie de tiempo para predecir su comportamiento futuro. La ventaja de estos modelos estadísticos es que predicen con precisión valores en el horizonte temporal cercano [Kolev y Sulakov, 2018].

Los modelos basados en inteligencia artificial incluyen la construcción de modelos mediante algoritmos de aprendizaje automático, por lo que predicen los datos sin modelos matemáticos predefinidos. Pronostican los datos estudiando el comportamiento entre los datos y prediciendo el siguiente valor en ese patrón [Verma *et al.*, 2018].

También existen técnicas de pronóstico que combinan diferentes técnicas de predicción, tales como los Modelos Autorregresivos (AR, por su siglas en inglés), Modelos Autorregresivos de Media Móvil (ARMA, por su siglas en inglés) y los Modelos Autorregresivos Integrado de Media Móvil (ARIMA, por su siglas en inglés), entre otros.

En esta tesis se utilizan los modelos AR los cuales surgieron para abordar el problema de pronóstico de series de tiempo. Al tener una amplia variedad de aplicaciones, este es uno de los métodos estadísticos de análisis cuantitativo multivariante más utilizados que se reportan en la literatura. Está basado en el método de mínimos cuadrados, tanto en la regresión simple de dos variables como en regresión múltiple de más de dos variables; este método usando la correlación analiza la relación dependiente entre dos variables, una llamada variable dependiente o criterio y la otra variable independiente o predictora [Cheng *et al.*, 2010]. Los modelos AR son procesos utilizados para modelar y predecir datos basados en valores históricos, con los que se realizan proyecciones, por lo que la variable dependiente debe estar mínimamente un periodo adelante que la variable independiente, por lo que es de gran importancia centrarse en el tipo de variable, la frecuencia de las observaciones y el horizonte de tiempo de las proyecciones [Rodó Paula, 2020].

Los modelos AR(p), donde p es el orden del modelo y equivale al número de períodos de retroceso con el cual se realizará la predicción de la variable, regularmente están divididos en tres etapas: la primera etapa consiste en la identificación del modelo con el objetivo de determinar el orden p , la segunda etapa es la estimación del modelo y por último se estiman los coeficientes AR [Wang y Zhang, 2008], además, dichos modelos se pueden expresar mediante (3.1) [Wang y Yuan, 2017][Bernardí Cabrer, 2004],

$$y_t = \delta + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \epsilon_t \quad (3.1)$$

donde

$y_t, y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-p}$ son vectores que contienen los valores de las variables aleatorias del proceso estocástico en los periodos $t, t-1, t-2, t-p$.

$\phi_1, \phi_2, \phi_p, \delta$ contienen los parámetros del modelo y los cuales pueden ser estimados.

ϵ_t es un vector de perturbaciones aleatorias la cual es la que contiene la única información que aparece en el período t en relación a la información en los períodos anteriores.

3.5. Pronóstico de demanda, energía solar y energía eólica para casos de estudios

Para los casos de estudios del Capítulo 4 se requiere hacer el pronóstico a corto plazo con una hora de adelanto de las variables estocásticas que intervienen en el despacho económico con fuentes de energías renovables. En esta tesis, para realizar el pronóstico de la demanda, la potencia solar y eólica que se tienen en un sistema, se utilizan modelos AR del Toolbox System Identification de Matlab. A continuación se presentan los pronósticos de una hora en adelanto, para la demanda, generación fotovoltaica y eólica, utilizando los datos reales de demanda, generación fotovoltaica y eólica que se obtuvieron del sistema eléctrico del Reino Unido del 1 al 10 de julio del 2019 [GB Electricity National, 2019].

Para realizar el pronóstico con una hora de adelanto, los datos originales fueron escalados para tener potencias referidas a la mayor potencia demandada. Posteriormente fueron escalados nuevamente para tener una potencia máxima del sistema de 1276 MW para la realización de los casos de estudio de despacho económico.

En las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se muestra el pronóstico con una hora de adelanto de la potencia demandada, generación fotovoltaica y eólica, respectivamente. Se muestran las series de tiempo de los valores reales correspondientes a datos de cada hora de los primeros diez días del mes de julio del 2019. También, considerando los datos del día 1 al día 3 de julio, se muestran los valores obtenidos de la predicción del día 4 al día 10 de julio. Como se puede apreciar, los valores obtenidos son muy cercanos a los reales. Para evaluar la eficacia del pronóstico se calcula el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés),

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - y_t)^2}{n}}$$

donde

\hat{y}_t es el valor predicho.

y_t es el valor real.

n es el número de observaciones.

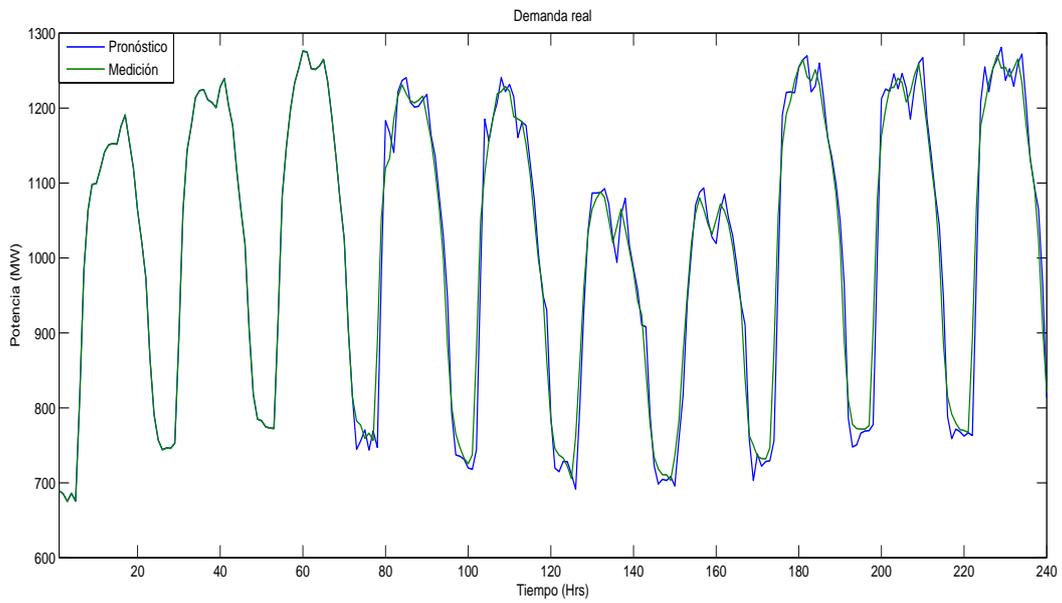


Figura 3.1: Pronóstico con una hora de adelanto de la demanda

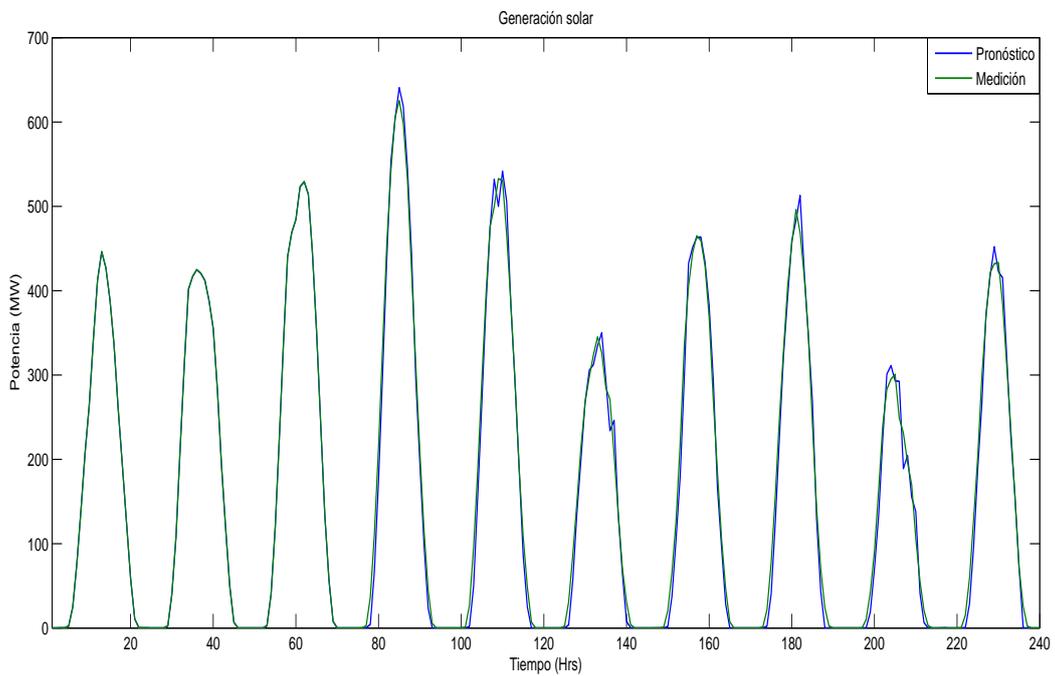


Figura 3.2: Pronóstico con una hora de adelanto de la generación fotovoltaica

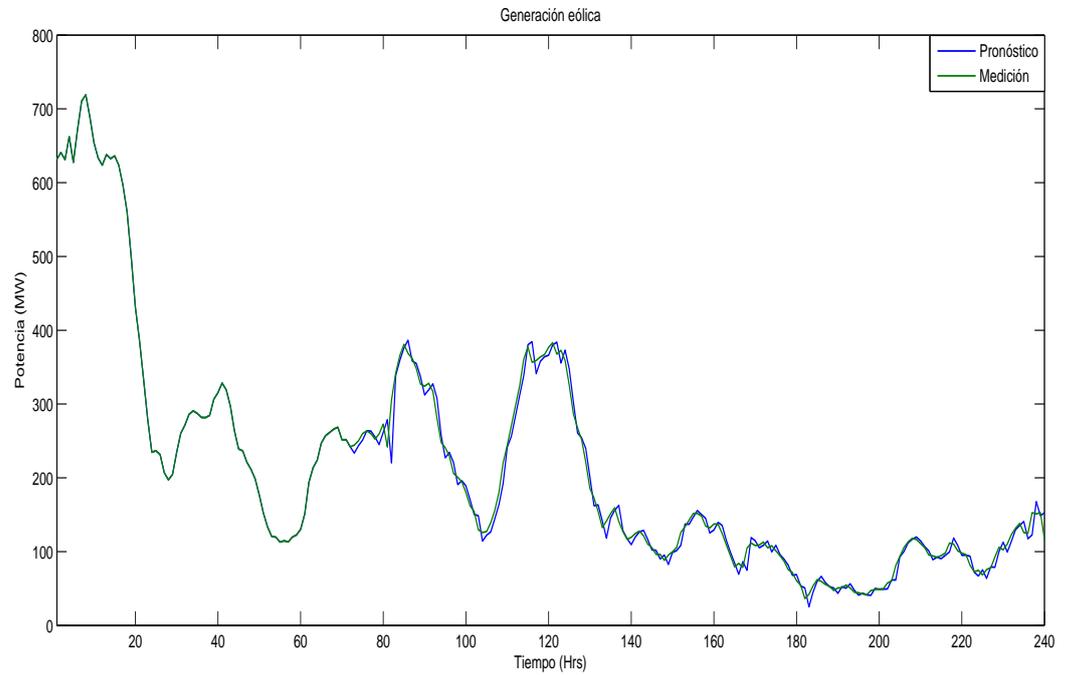


Figura 3.3: Pronóstico con una hora de adelanto de la generación eólica

Tabla 3.1: Error Cuadrático Medio (RMSE)

| RMSE | | |
|---------|-------------------------|-------------------|
| Demanda | Generación fotovoltaica | Generación eólica |
| 0.0288 | 0.0141 | 0.0101 |

Los RMSE que se obtienen para el pronóstico con una hora de adelanto de la demanda, generación fotovoltaica y la generación eólica, se presentan en la Tabla 3.1.

Como se observa en las Figuras 3.1-3.3 y de la Tabla 3.1, el pronóstico tiene muy buena precisión, ya que los errores son muy pequeños siendo el de mayor precisión el pronóstico de generación eólica, con un error de 0.0101.

3.6. Conclusiones

En este Capítulo se mencionaron distintas técnicas de predicción reportadas en la literatura y la importancia de tener pronósticos precisos para mantener la seguridad,

confiabilidad y calidad del suministro eléctrico. Los métodos utilizados para la realización del pronóstico con modelos autoregresivos con una hora de adelanto, de la demanda eléctrica y de las fuentes renovables para los casos analizados, muestran un pronóstico con valores cercanos a los reales; para comprobar su precisión se calculó el RMSE, corroborándose su precisión al tener valores menores a 0.03 de RMSE.

Capítulo 4

Metodología para la solución del despacho con fuentes de energía renovables e inclusión de sistemas de almacenamiento de energía y casos de estudio

En este capítulo se presenta la metodología propuesta para la solución del problema del ED con pronóstico de una hora en adelante de la demanda, generación fotovoltaica y eólica, además se incluyen los sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías como una solución viable ante las fluctuaciones y disponibilidad de los recursos naturales; la metodología propuesta se implementó en Matlab.

4.1. Metodología

La solución del problema de despacho económico de la presente tesis se realiza para cada hora, a lo largo de un período de tiempo de 24 horas; el pronóstico de la demanda, energía solar y energía eólica se realiza con una hora de adelanto y además se integran los

sistemas de almacenamiento de energía en baterías. A continuación se describe la metodología propuesta que se presenta en el diagrama de la Figura 4.1,

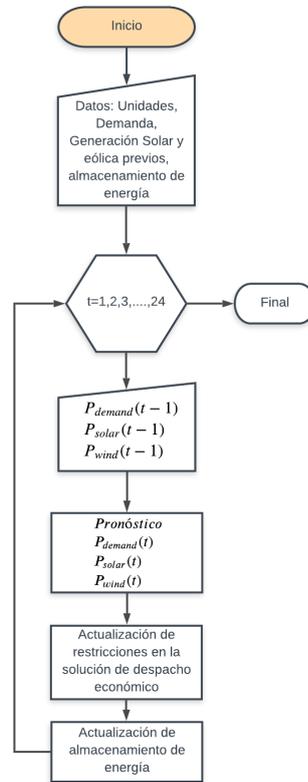


Figura 4.1: Diagrama de flujo de la metodología propuesta

1. Primera etapa

En la primera etapa de la metodología propuesta se introducen los datos previos a la hora de pronóstico de demanda, energía solar y eólica, los datos de función de costos, datos de función de emisiones, coeficientes de pérdidas, potencia mínima y máxima de las unidades térmicas, en el caso de las unidades no convencionales se introducen los datos de costos, potencia mínima y máxima de las plantas y por último en el caso de los BESS se introducen datos de costos, energía inicial de almacenamiento, energía mínima de descarga y energía máxima de almacenamiento, así como las potencias mínima y máxima despachable por los BESS.

Al final de esta etapa se selecciona el periodo inicial y final para la solución del ED y el

horizonte de pronóstico de la demanda, generación solar y eólica

2. Segunda etapa

Se inicia el ciclo para realizar el ED para cada iteración que corresponde a cada hora en qué se hace.

3. Tercera etapa

En esta tercera etapa se actualizan los valores previos a la hora de predicción ($t-1$) con los datos reales de demanda, generación solar y eólica; esto para incluir los datos $t-1$ para predecir el nuevo valor t .

4. Cuarta etapa

En esta etapa se realiza el pronóstico de la demanda, generación solar y eólica utilizando los AR de System Identification Toolbox de Matlab. Esta etapa consta de tres pasos para la realización del pronóstico; en el primer paso los datos seleccionados en la etapa anterior se introducen a la función `data= iddata(PastData,[])` de Matlab, donde **PastData** son las observaciones seleccionadas en la etapa anterior mientras que `[]`, esta función es usada para identificar un sistema, encapsulando datos de mediciones de entrada y salida. Las funciones de validación del modelo emplean los datos de salida para comparar qué tan bien se ajusta la respuesta estimada del modelo a los datos originales. En el segundo se utiliza la función `sys= ar(data,n)` de Matlab, para la estimación de parámetros del modelo de orden n , el cual está basado en método de mínimos cuadrados, donde **data** es la variable calculada anteriormente. En el último paso se utiliza la función `yt=forecast(sys,PastData,K)` de Matlab para pronosticar la salida de un modelo de serie temporal identificado **sys**, donde el valor de **K** es el horizonte de pronóstico, es decir, **k** toma el valor de 1 para predecir el valor de la nueva t lo cual significa que se realizará el pronóstico con una hora de adelanto utilizando datos medidos pasados.

5. Quinta etapa

En esta etapa, con el valor pronosticado \mathbf{t} de la demanda, generación fotovoltaica y eólica en la etapa anterior y con la ayuda del Toolbox de optimización de Matlab, en particular la función `fminimax`, se realiza el proceso para la solución del problema del ED. La función `fminimax` utiliza el método de programación cuadrática secuencial para resolver problemas de optimización multiobjetivo. La función tiene como argumentos $\mathbf{x} = \mathbf{fminimax}(\mathbf{fun}, \mathbf{x0}, \mathbf{A}, \mathbf{b}, \mathbf{Aeq}, \mathbf{beq}, \mathbf{lb}, \mathbf{ub}, \mathbf{nonlcon})$, \mathbf{fun} que es una función, en la cual se introducen las funciones objetivos, en este caso las funciones de costos y de emisiones de las unidades de generación que serán minimizadas; la variable $\mathbf{x0}$ corresponde a un vector o matriz de punto de partida para la variable \mathbf{x} , donde el tamaño de este vector o matriz debe ser igual al número de variables involucradas, en este caso al número de máquinas disponibles para el despacho de energía; \mathbf{A} y \mathbf{b} , corresponden a las restricciones de desigualdad lineales, aquí se introducen las restricciones de máxima penetración de energía entre RES y BESS. Las restricciones de igualdad lineales son \mathbf{Aeq} y \mathbf{beq} , para este caso al no tener restricciones lineales, tales variables son representadas como un vector vacío; las variables \mathbf{lb} y \mathbf{ub} son vectores que contienen las potencias mínimas y máximas de generación respectivamente de las unidades disponibles, mientras que $\mathbf{nonlcon}$ es una función, donde se incluyen las restricciones no lineales \mathbf{c} y \mathbf{ceq} . En este problema \mathbf{ceq} son las restricciones de igualdad no lineales en las que se incluye la ecuación de balance de potencia con pérdidas del sistema.

6. Sexta etapa

Una vez realizado el ED en la etapa anterior, el valor del almacenamiento se actualiza, esto dependiendo si los BESS despacharon energía cuando la generación fotovoltaica y eólica le es insuficiente para cubrir con lo máximo permitido en penetración de energía no convencional o cuando lo generado por los recursos renovables es superior a lo que se permite inyectar al sistema, por lo que esa energía, que ya no es despachable en ese momento, es almacenada para su uso en los periodos de menor disposición de energía de RES o cuando estas no están presentes. Al concluir esta sexta etapa, se actualiza el valor de energía almacenada y se regresa a la etapa 2. Este proceso se repite hasta que

se realiza el ED para el periodo de tiempo, que en los casos de estudios es de 24 hrs.

4.2. Casos de estudio

En esta sección se plantean diferentes escenarios de estudio donde se demuestra la eficacia y beneficios de la metodología implementada. Se analiza el impacto que tiene la inclusión de la generación con fuentes renovables y los sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías en el despacho de económico de energía a lo largo de 24 horas. Se presentan los siguientes casos de estudio.

Caso A Despacho económico en el que se incluyen solamente unidades de generación convencional.

Caso B Despacho económico en el que incluyen fuentes de generación convencional y fuentes de generación fotovoltaica y eólica.

Caso C En el despacho económico se incluye además los sistemas de almacenamiento de energía.

Caso D En este caso se incluye además de lo contemplado a los casos anteriores, una función objetivo adicional, minimizar las emisiones contaminantes.

En los casos de estudio presentados, se utilizan los datos de un sistema de 6 unidades de generación convencional; los datos de potencia, costos, los coeficientes de pérdidas y de emisiones de las unidades térmicas reportados en [Gaing, 2003] [Rodrigues de Assis *et al.*, 2018]. En la Tabla 4.1 se presentan para las 6 unidades convencionales, los datos de los coeficientes de la función de costos de generación, datos de emisiones de acuerdo con (2.2) y (2.6) y los datos de potencias máximas y mínimas de generación.

Para analizar el impacto de la inclusión de fuentes de energía renovables y los BESS en los casos de estudio, se considera una unidad de generación fotovoltaica, una unidad de generación eólica y una unidad de almacenamiento de energía basado en baterías de plomo-ácido. En la Tabla 4.2 se presentan los datos de potencia máxima y mínima de las unidades antes mencionadas, mientras que los coeficientes de la función de costos se presentan en la

Tabla 4.3 [Pazheri *et al.*, 2014].

Tabla 4.1: Datos de unidades convencionales

| Datos de potencia, coeficientes de costos y emisiones | | | | | | | | | | |
|---|--------------|--------------|------------|-----------|------------|------------|----------|------------|-------------|---------|
| Unidad | Pg_i^{min} | Pg_i^{max} | α_i | β_i | δ_i | σ_i | τ_i | γ_i | λ_i | ζ |
| 1 | 100 | 500 | 240 | 7.0 | 0.0070 | 0.06490 | -0.05554 | 0.04091 | 0.0002 | 2.857 |
| 2 | 50 | 200 | 200 | 10.0 | 0.0095 | 0.05638 | -0.06047 | 0.02543 | 0.0005 | 3.333 |
| 3 | 80 | 300 | 220 | 8.5 | 0.0090 | 0.04586 | -0.05094 | 0.04258 | 0.000001 | 8 |
| 4 | 50 | 150 | 200 | 11.0 | 0.0090 | 0.03380 | -0.03550 | 0.05326 | 0.002 | 2 |
| 5 | 50 | 200 | 220 | 10.5 | 0.0080 | 0.04586 | -0.05094 | 0.04258 | 0.000001 | 8 |
| 6 | 50 | 120 | 190 | 12.0 | 0.0075 | 0.05151 | -0.05555 | 0.06131 | 0.00001 | 6.667 |

Tabla 4.2: Datos de potencias unidades no convencionales y BESS

| Unidades no convencionales y BESS | | |
|-----------------------------------|--------------|--------------|
| Unidad | Pg_i^{min} | Pg_i^{max} |
| Solar | 0 | 600 |
| Wind | 0 | 600 |
| BESS | 0 | 700 |

Tabla 4.3: Coeficientes de costos unidades no convencionales y BESS

| Unidades no convencionales y BESS | |
|-----------------------------------|---------------------|
| Unidad | Coficiente de costo |
| C_{solar} | 13 |
| C_{wind} | 9 |
| C_{ab} | 7 |

Los datos de coeficientes de pérdidas de acuerdo con la (2.4) [Gaing, 2003];

$$B_{ij} = (0.01) \cdot \begin{bmatrix} 0.0017 & 0.0012 & 0.0007 & -0.0001 & -0.0005 & -0.0002 \\ 0.0012 & 0.0014 & 0.0009 & 0.0001 & -0.0006 & -0.0001 \\ 0.0007 & 0.0009 & 0.0031 & 0.0000 & -0.0010 & -0.0006 \\ -0.0001 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0024 & -0.0006 & -0.0008 \\ -0.0005 & -0.0006 & -0.0010 & -0.0006 & 0.0129 & -0.0002 \\ -0.0002 & -0.0001 & -0.0006 & -0.0008 & -0.0002 & 0.0150 \end{bmatrix}$$

$$B_{oi} = (0.01) \cdot \begin{bmatrix} -0.0003908 & -0.0001297 & 0.0007047 & 0.0000591 & 0.0002161 & -0.0006635 \end{bmatrix}$$

$$B_{oo} = 0.00056$$

En la metodología propuesta, el pronóstico se hace en cada iteración utilizando el procedimiento descrito en el Capítulo 3, considerando los datos hasta el tiempo $t-1$ y se pronostica el valor para el tiempo t como se indicó en el diagrama de flujo de la Fig. 4.1.

A continuación se presentan los casos de estudios con diferentes consideraciones y restricciones del problema de ED. Los valores utilizados de la potencia demandada, la energía fotovoltaica y la energía eólica son los correspondientes al sistema reportado en la Sección 3.5 para el día 4 de julio del 2019, los cuales se escalaron para considerar en el sistema de 6 unidades térmicas una demanda máxima de 1276 MW.

4.2.1. Caso A

Para el despacho económico en este caso de estudio se consideró la potencia demandada en las 24 horas del día 4 de julio del 2019, que se denota en la Fig.4.2. La Fig.4.3 muestra la potencia despachada por cada planta térmica. Se observa que la unidad 1 es la que tiene mayor participación en el despacho de energía esto debido a su bajo costo de generación con respecto a las otras unidades de generación, por el contrario, la unidad 6 es la que tiene menor participación debido a sus altos costos de generación en comparación a las otras.

En la Tabla 4.4 se presentan los resultados de potencia despachada y costos de generación durante todo el día, utilizando datos reales y datos obtenidos de la predicción; se puede observar que los costos totales de generación y las potencias despachadas son muy aproximados, la diferencia es menor al 0.15 % y al 0.20 % respectivamente.

4.2.2. Caso B

En este caso, se considera el problema de ED con la integración de RES en el sistema; se realiza el ED con la integración de generación fotovoltaica y la generación eólica considerando las series de tiempo reales y se compara con la metodología propuesta, en la que incluye el pronóstico de la potencia demandada, generación fotovoltaica y la generación eólica. Para el pronóstico, se utilizan los valores de tres días de la serie de tiempo real anteriores a la

predicción de la siguiente hora; para la siguiente predicción el valor real de la hora anterior se añade a la serie de tiempo real para la predicción de la siguiente hora.

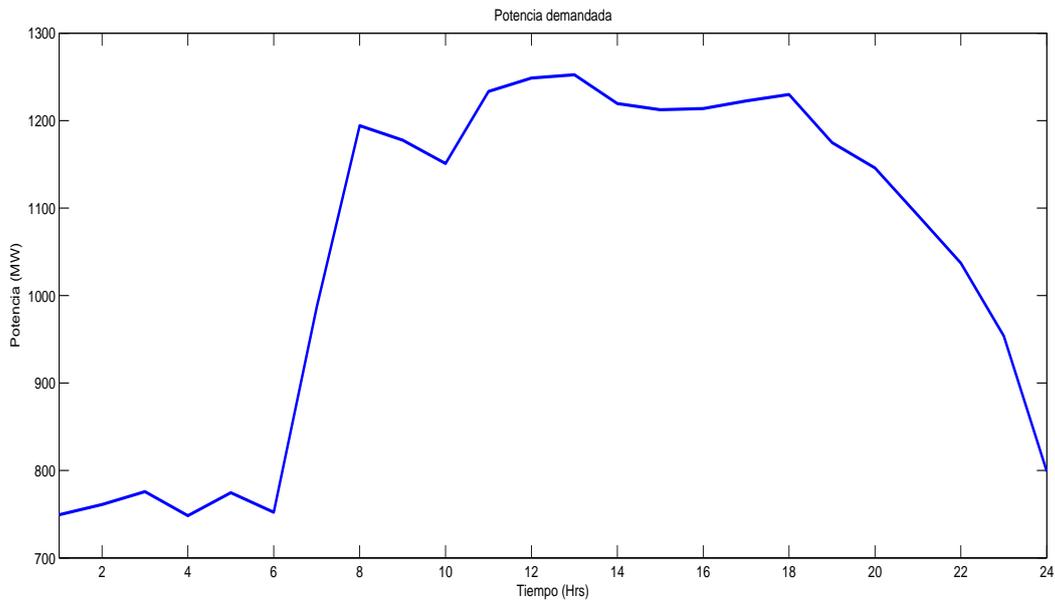


Figura 4.2: Potencia demandada

Tabla 4.4: ED convencional con pronóstico de demanda

| Despacho económico convencional | | |
|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Unidad | Usando datos reales (MW) | Usando datos pronosticados (MW) |
| 1 | 9536.32 | 9513.90 |
| 2 | 3273.75 | 3257.10 |
| 3 | 5408.61 | 5391.33 |
| 4 | 2384.95 | 2388.72 |
| 5 | 3035.41 | 3017.28 |
| 6 | 1515.32 | 1536.07 |
| Potencia Total (MW) | 25 154.36 | 25 104.40 |
| Costo Total (\$) | 301 085.11 | 300 663.54 |

En este caso de estudio se considera inicialmente el coeficiente de costo igual a cero para RES y posteriormente se obtienen resultados con los coeficientes de costos reportados en la Tabla 4.3, también se consideran los niveles máximos de penetración de RES del 30 %

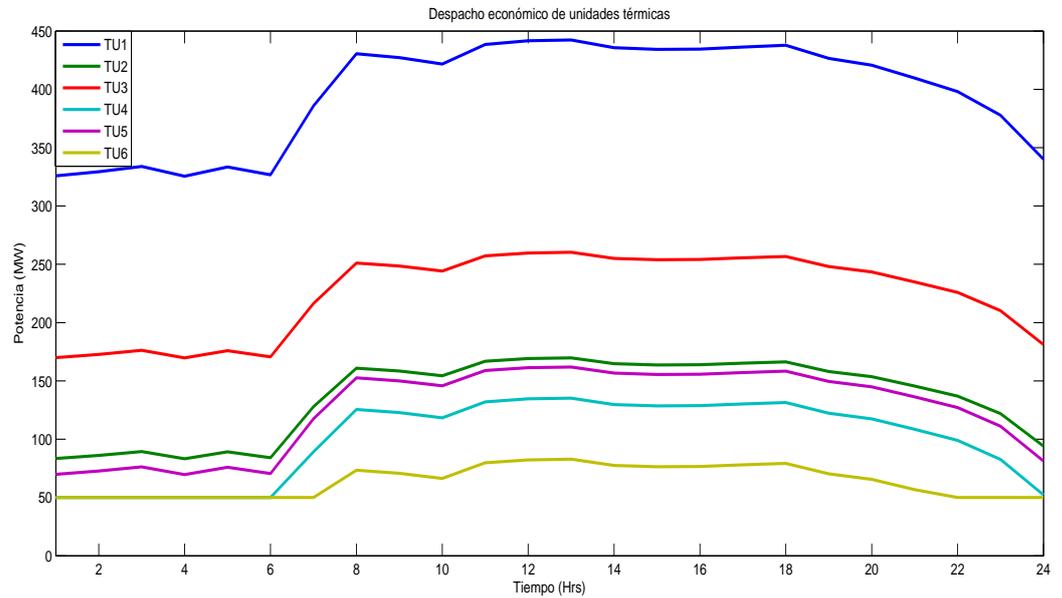


Figura 4.3: ED convencional

y 40 % de la demanda real.

En las Figuras 4.4 y 4.5, considerando un nivel máximo de penetración del 30 %, se muestran los resultados del EDRES durante 24 horas utilizando datos reales y datos pronosticados respectivamente, en las que se muestra potencias despachadas por las unidades convencionales y RES muy similares, lo que corrobora la buena precisión del modelo de pronóstico implementado.

La Tabla 4.5 muestra los valores de potencia despachados por las unidades térmicas y RES, durante las 24 horas del día. Se puede observar que los costos totales de generación y las potencias despachadas son muy aproximados, la diferencia es menor al 0.07 % y al 0.20 % respectivamente. También se observa que al incluir la generación de RES, los costos totales disminuyen en más del 30 % con respecto al caso anterior.

Por otro lado, la Fig.4.6 muestra los costos de generación del EDRES con límite máximo de nivel de penetración del 40 %, durante todo el día. En la Tabla 4.6, donde se comparan los costos totales del EDRES al asignar costo de generación a las RES y cuando estas no tienen asignación de costo, como se puede apreciar en la Tabla antes mencionada, la energía des-

pachada por las unidades convencionales es menor cuando las RES no tienen costo, esto por que toda la energía disponible de RES es despachada hasta los límites permitidos, mientras que al asignar costos a las RES la participación de estas en el ED es menor, por lo tanto, la participación de las unidades convencionales aumenta, ya que el costo de las unidades convencionales es un poco menor a las unidades no convencionales, además se aprecia que los costos de generación aumentaron más del 44 % al asignar costo a las RES.

Tabla 4.5: ED con penetración máxima del 30 % y sin coeficiente de costo de RES

| Despacho económico con inclusión de RES | | |
|--|---------------------|---------------------------------|
| Unidad | Usando datos reales | Usando datos pronosticados (MW) |
| 1 | 7549.24 | 7499.08 |
| 2 | 1978.32 | 2001.71 |
| 3 | 3872.06 | 3833.66 |
| 4 | 1322.96 | 1339.78 |
| 5 | 1767.21 | 1788.26 |
| 6 | 1200 | 1200 |
| RES | 7361.37 | 7339.75 |
| Potencia Total (MW) | 25 051.16 | 25 002.24 |
| Costo Total (\$) | 210 287.61 | 210 146.11 |

Tabla 4.6: ED con penetración máxima del 40 % y con coeficiente de costo de RES

| Despacho económico con inclusión de RES | | |
|--|------------------------------|------------------------------|
| Unidad | RES sin coeficiente de costo | RES con coeficiente de costo |
| 1 | 7026.57 | 7530.09 |
| 2 | 1719.67 | 2090.80 |
| 3 | 3474.01 | 3863.67 |
| 4 | 1200.60 | 1424.95 |
| 5 | 1485.64 | 1883.99 |
| 6 | 1200 | 1200 |
| RES | 8877.13 | 7013.41 |
| Potencia Total (MW) | 24 983.62 | 25 006.91 |
| Costo Total (\$) | 192 127.48 | 277 513.54 |

4.2.3. Caso C

En este caso, se considera el pronóstico de la demanda, energía fotovoltaica y energía eólica para resolver el problema del EDRES e incluyendo los BESS. Se analiza el efecto de la

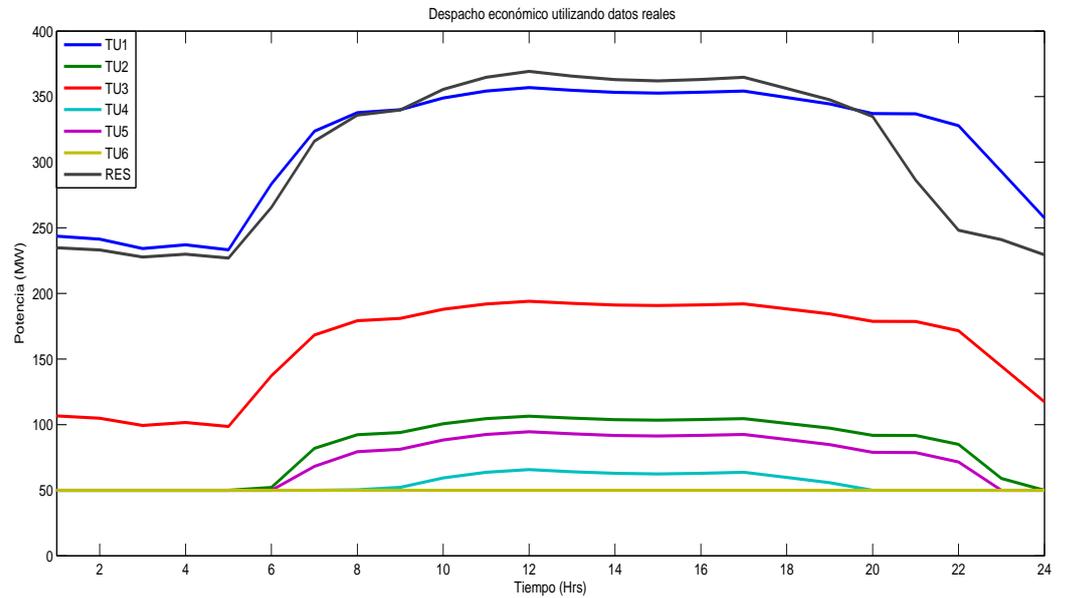


Figura 4.4: ED con límite máximo de penetración de RES del 30% utilizando datos reales

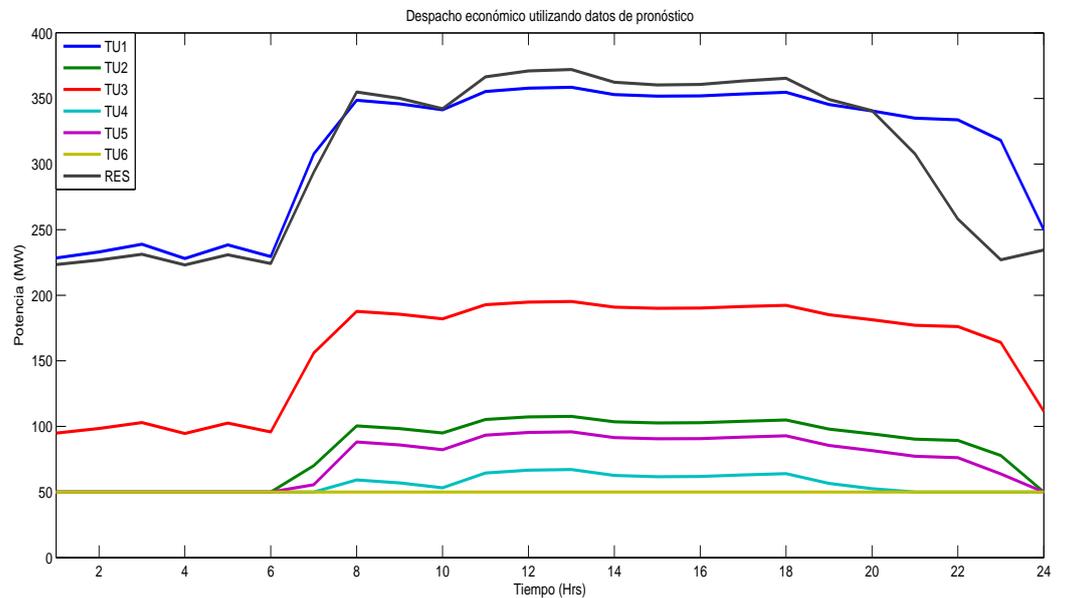


Figura 4.5: ED con límite máximo de penetración de RES del 30% utilizando datos pronosticados

integración de RES y BESS con diferentes niveles de penetración. En el caso de los BESS se considera una capacidad de almacenamiento inicial de 1000 MWh y también se conside-

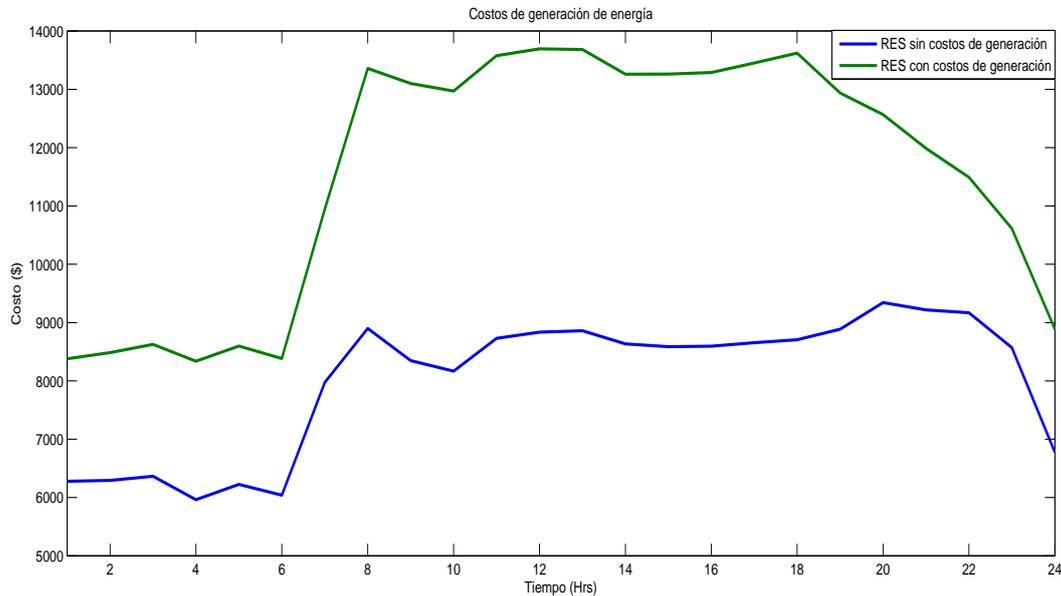


Figura 4.6: Costos de generación con límite máximo de inclusión de RES del 40 %

ran los límites de carga y descarga del 90 % y 10 % del valor de la capacidad máxima de almacenamiento, respectivamente.

En las Fig.4.7 y 4.8 se observan los resultados del despacho económico con un nivel del 30 % y 40 % de penetración respectivamente, en las cuales se aprecia que existe una menor participación de las unidades térmicas cuando el nivel de penetración entre RES y BESS es muy grande y en caso contrario existe una mayor participación de las unidades térmicas. En la Fig.4.7, se aprecia que con un 30 % de penetración entre RES y BESS, la energía generada por las fuentes no convencionales de entre la 1 y 6 horas es suficiente para satisfacer el 30 % de inclusión de RES. Por lo que la participación de BESS en el despacho de energía no es necesario, por otro lado entre las 6 y 20 horas la energía generada por RES equivale a más del 30 % del valor de la demanda por lo que solo el 30 % de lo producido por RES es energía despachable, mientras que lo restante se almacena en BESS para posteriormente en los períodos de RES no disponible o generación inferior al límite máximo de inclusión de RES, esa energía almacenada en BESS se encuentre disponible y por último entre las 20 y 24 horas es cuando existe poca producción de RES lo cual no es suficiente para satisfacer el

30 % por lo que las baterías suministran el restante para cumplir el equilibrio del sistema.

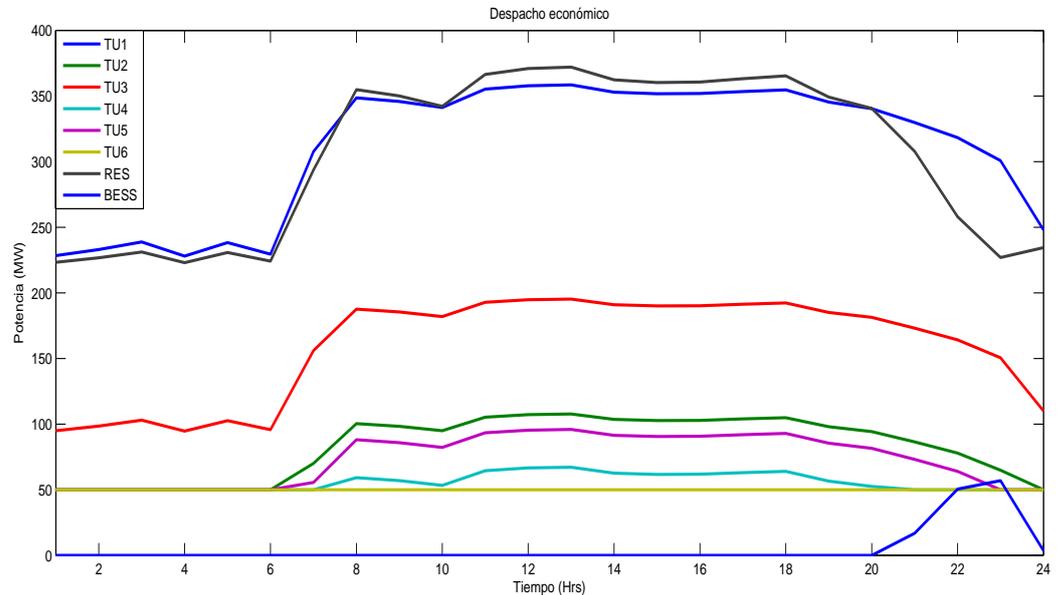


Figura 4.7: Despacho económico con límite máximo de penetración de RES y BESS del 40 %

En la Figura 4.8, se observa el resultado del EDRES con la inclusión de BESS cuando se tiene un nivel de penetración de RES del 40 %, la energía producida por RES entre la 1 y 9 horas no es suficiente para satisfacer la inclusión del 40 %, por lo que los sistemas de almacenamiento de energía ayudan a mantener el equilibrio del sistema al despachar energía para satisfacer esta condición, mientras que en las 9 y 18 horas la energía producida por RES corresponde a más del 40 % de la demanda, por lo que no es necesario el despacho de energía por medio de BESS ya que RES logra satisfacer el 40 % de inclusión de fuentes renovables y el restante se almacena en BESS y por último entre las 18 y 24 horas que es cuando lo generado por RES es insuficiente para cumplir la condición del 40 % de inclusión de RES por lo que las baterías suministran la energía restante para satisfacer dicha condición siempre respetando los límites operativos de carga y descarga.

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados del ED con una penetración máxima de RES y BESS del 30 % y 40 % sin coeficiente de costo de las unidades no convencionales. En la Tabla 4.7 también se observa que cuando el nivel de penetración de las energías renovables

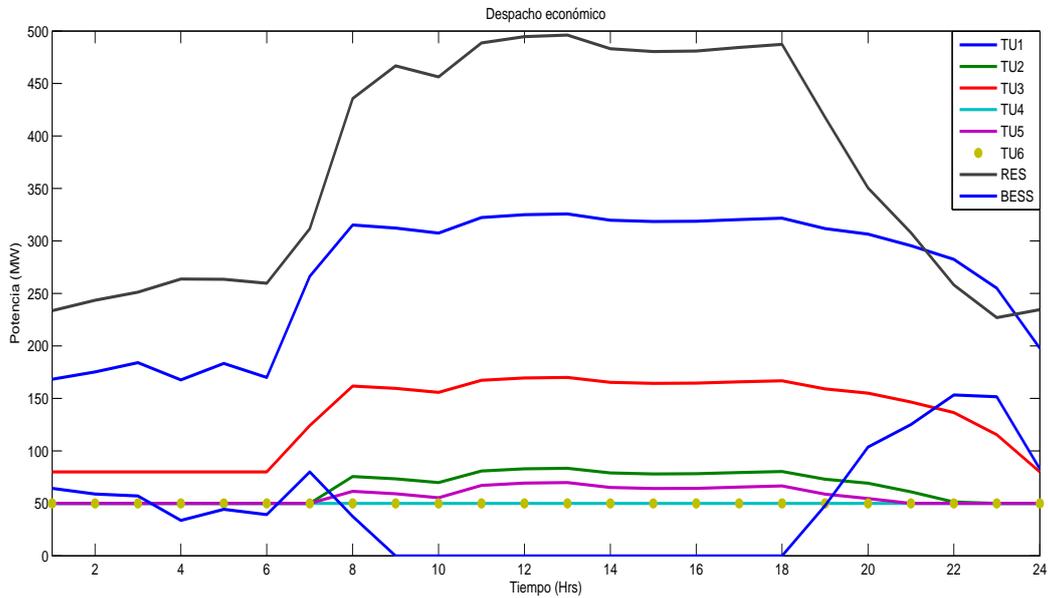


Figura 4.8: Despacho económico con límite máximo de penetración de RES y BESS del 40 %

son altos, los costos de generación se reducen y al incluir BESS los costos se reducen más como se observa en la Fig.4.9, ya que las baterías despachan energía en los periodos de RES no disponibles, además de que se almacena energía en los períodos de alta disponibilidad de RES, por lo que se impide el desperdiciar la energía no despachada. En la Tabla 4.8 se muestra, que si comparamos los costos de generación cuando existe un límite máximo de inclusión RES y BESS del 30 %, con los casos anteriores donde existe solo la inclusión de RES del 30 % y donde solo existen unidades térmicas, se aprecia que los costos se reducen más del 0.7 % y 30 % respectivamente, y si comparamos los mismos casos con una inclusión máxima del 40 % entre RES y BESS, los costos se reducen más del 14 % y 40 % respectivamente, mientras que las potencias se reducen en más del 0.1 % y 0.5 %, respectivamente.

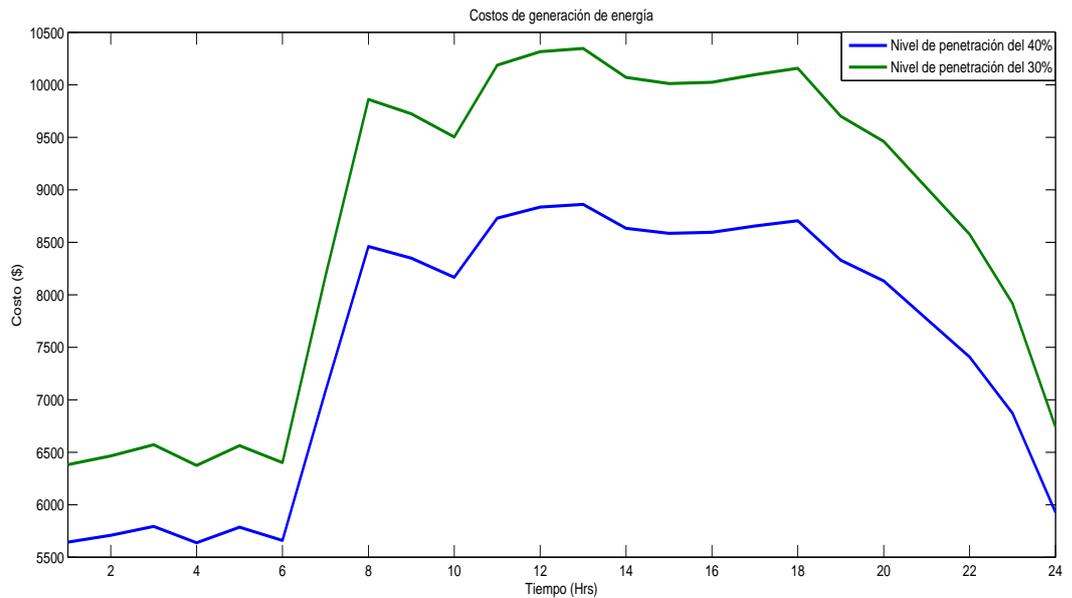
4.2.4. Caso D

Caso D1. Caso con unidades convencionales multi-objetivo.

En este caso se compara el ED convencional de un objetivo con el ED convencional multi-objetivo, en las Fig.4.3 y 4.10 se puede comparar los casos antes mencionados; se observa

Tabla 4.7: ED con diferentes niveles de penetración

| Despacho económico con RES e incluyendo BESS | | |
|--|-------------------------------|-------------------------------|
| Unidad | Nivel de penetración del 30 % | Nivel de penetración del 40 % |
| 1 | 7459.12 | 6471.28 |
| 2 | 1973.54 | 1565.73 |
| 3 | 3802.71 | 3207.01 |
| 4 | 1339.78 | 1200 |
| 5 | 1758.08 | 1371.34 |
| 6 | 1200 | 1200 |
| RES | 7339.75 | 8877.13 |
| BESS | 127.67 | 1079.43 |
| Potencia Total (MW) | 25 000.65 | 24 971.92 |
| Costo Total (\$) | 208 664.37 | 180 332.68 |

**Figura 4.9:** Costos de generación con diferentes niveles de penetración de RES y BESS

como el caso base de un solo objetivo, el cual al solo tener un criterio para encontrar una solución factible despacha energía con la unidad que generación más barata sin tener alguna restricción en las emisiones, por lo que en la Fig.4.3 se puede apreciar la alta participación en el despacho de energía de las unidades 1 y 3, esto debido a sus bajos costos de generación, mientras que en la Fig.4.10 se observa que al añadir otro objetivo, en este caso reducir

Tabla 4.8: Comparativa de costos y potencias en diferentes casos de estudios

| Comparativa de costos y potencias | | |
|---|---------------|------------------|
| Caso | Potencia (MW) | Costo total (\$) |
| Unidades térmicas | 25 104.4 | 300 663.54 |
| EDRES sin coeficiente de costo, con límite máximo de penetración del 30 % | 25 002.24 | 210 146.11 |
| EDRES e inclusión de BESS sin coeficiente de costo, con límite máximo de penetración del 30 % | 25 000.65 | 208 664.37 |
| EDRES e inclusión de BESS sin coeficiente de costo, con límite máximo de penetración del 40 % | 24 971.92 | 180 332.68 |

las emisiones de gases contaminantes, las unidades 1 y 3, las cuales tienen bajos costos de generación pero a su vez son las unidades que generan más emisiones, la participación de la unidad 1 en el despacho de energía se ve reducido notablemente, mientras que la unidad 3 tiene una ligera reducción y el resto de las unidades tienen un incremento en su participación para compensar la potencia que dejaron de producir las unidades 1 y 3.

En la Fig.4.11 se puede apreciar como con el ED multi-objetivo se tiene una notable disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con el ED de un solo objetivo.

La Tabla 4.9 muestra la comparación de potencias, emisiones y costos del ED convencional de un objetivo y multi-objetivo. Como se puede observar la unidad 1 pasó de una participación de más del 37 % a poco más del 31 % de la demanda total en un día, mientras que en las unidades 2 y 6 se presentó un ligero incremento en su participación debido a que tales unidades son las que menos contaminan, en lo que respecta a las emisiones, la reducción de estas significó poco más del 16 %, por lo cual se dejó de emitir al medio ambiente 60 748.44 toneladas de CO_2 y por otra parte el costo total de generación en un día tuvo un casi insignificante incremento de apenas el 0.53 %.

Caso D2. ED con RES multi-objetivo.

En el caso del ED multi-objetivo con la inclusión RES cuando estas no tienen costo, se puede reducir aún más la participación de las unidades que producen grandes

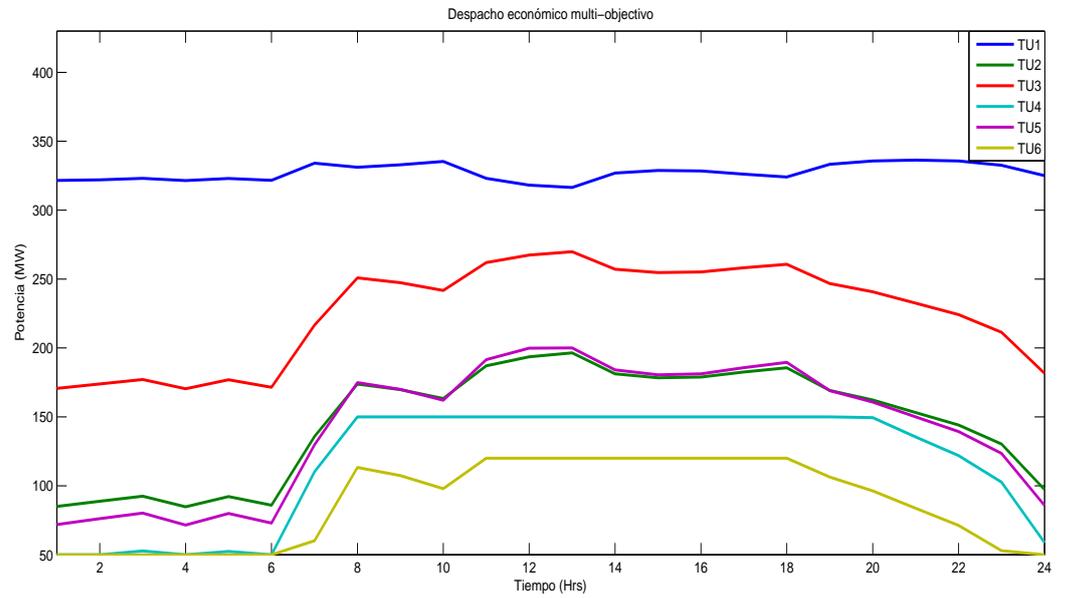


Figura 4.10: ED convencional Multi-objetivo

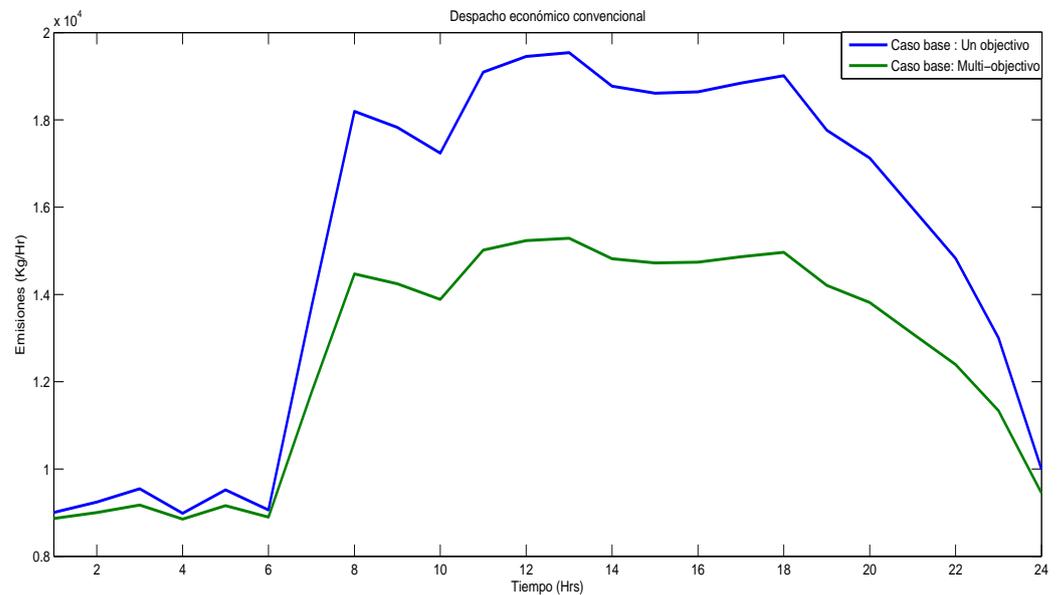


Figura 4.11: Emisiones Contaminantes

cantidades de CO_2 . Al comparar las Fig.4.5 y 4.12 se percibe como la participación de la unidad 1 fue la única que vio reducida su generación al ser la más contaminante pero al

Tabla 4.9: ED convencional Multi-objetivo

| Despacho económico convencional | | | | |
|---------------------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|
| Unidad | Caso base con un objetivo (MW) | Emisiones (ton/día) | Caso base Multi-objetivo (MW) | Emisiones (ton/día) |
| 1 | 9513.88 | 247414.28 | 7857.39 | 166570.95 |
| 2 | 3257.03 | 26235.05 | 3512.40 | 30918.39 |
| 3 | 5391.35 | 56614.28 | 5419.84 | 57265.07 |
| 4 | 2388.87 | 8898.91 | 2783.70 | 12315.11 |
| 5 | 3017.22 | 18642.50 | 3430.58 | 24692.67 |
| 6 | 1536.05 | 5189.38 | 2099.40 | 10483.77 |
| Potencia Total (MW) | 25 104.40 | | 25 103.31 | |
| Emisiones (ton/día) | 362 994.40 | | 302 245.96 | |
| Costo Total (\$) | 300 663.54 | | 302 245.91 | |

ser la que produce la energía más barata se mantiene como la unidad convencional que más participa en el despacho de energía, mientras que la energía despachada por las fuentes de energía renovable no vio afectado su despacho de energía al ser unidades sin costo y sin producir emisiones de CO_2 .

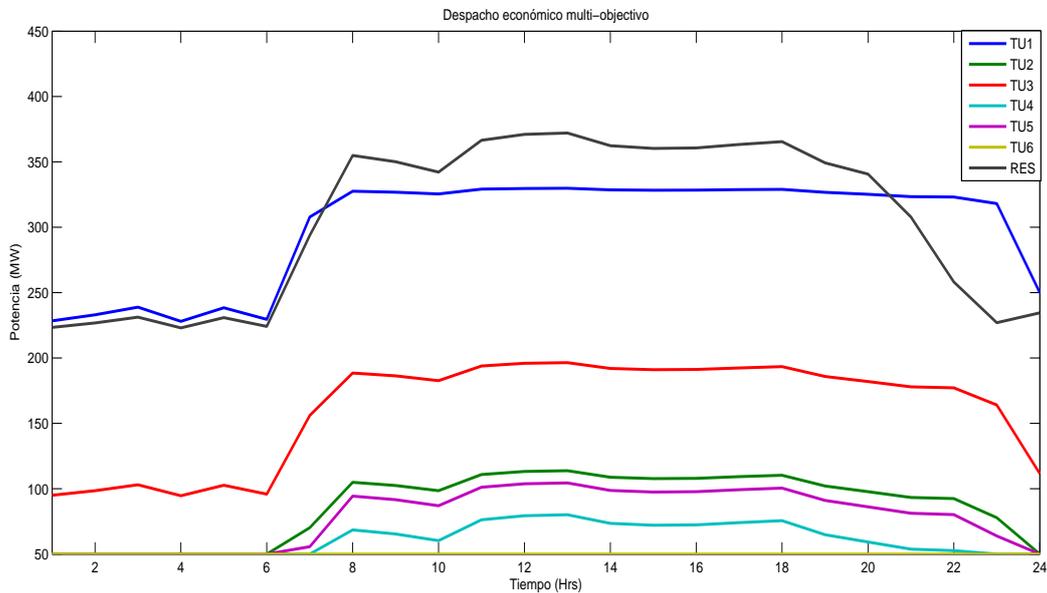


Figura 4.12: ED Multi-objetivo con inclusión de RES

En la Tabla 4.10 se observa la comparación del caso B de un objetivo y del caso **D2** inclu-

yendo las emisiones como un objetivo adicional, como se puede apreciar la unidad 1 tuvo un mínima reducción en su participación de poco más del 1 %, además de que fue la única unidad que redujo sus emisiones, ya que 2 unidades mantuvieron su generación y el resto tuvieron que aumentar su generación y por ende aumentaron sus emisiones, por lo que sus emisiones se redujeron más del 5 %, pero por el contrario los costos de generación tuvieron un pequeño incremento apenas del 0.035 %, por otro lado, si se compara el caso **D2** y el caso **D1** de un solo objetivo con solo unidades térmicas, las emisiones se reducen más del 46 %, mientras que al comparar el caso **D1** multiobjetivo con el **D2** las emisiones se reducen poco más del 35 %. En la Tabla 4.11, muestran los resultados del EDRES con un nivel de penetración del 40 %, cuando estas no tienen factor de costo y se compara cuando se le asigna factor de costo, como se observa la energía despachada por RES incremento su participación en el despacho de energía, esto al permitir un mayor nivel en la participación de RES, lo que básicamente al no tener costo ni generar emisiones, la energía disponible del recurso natural es despachada, lo cual representó una ligera reducción del 8.6 % y 10.47 % en los costos y emisiones en comparación con el caso anterior, respectivamente.

Tabla 4.10: ED con penetración máxima del 30 % y sin coeficiente de costo de RES

| Despacho económico con inclusión de RES | | | | |
|--|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| Unidad | Caso B de un objetivo | Emisiones (ton/día) | Caso B Multi-objetivo | Emisiones (ton/día) |
| 1 | 7499.08 | 155719.77 | 7182.06 | 141780.37 |
| 2 | 2001.70 | 10011.29 | 2070.38 | 10811.50 |
| 3 | 3833.66 | 29596.06 | 3847.26 | 29831.44 |
| 4 | 1339.78 | 2514.01 | 1477.19 | 3123.64 |
| 5 | 1788.26 | 6384.08 | 1883.33 | 7187.18 |
| 6 | 1200 | 3025.41 | 1200.00 | 3025.41 |
| RES | 7339.75 | 0 | 7339.75 | 0 |
| Potencia Total (MW) | 25 002.23 | | 24 999.97 | |
| Emisiones (ton/día) | 207 250.62 | | 195 759.54 | |
| Costo Total (\$) | 210 146.11 | | 210 219.93 | |

Por otra parte, al asignar coeficiente de costo a las RES como se muestra en la Tabla 4.11, se puede apreciar cómo la participación de RES se redujo, esto porque el costo asociado a

la generación fotovoltaica y eólica es mayor que algunas máquinas convencionales, por lo que su participación en el despacho de energía es menor en comparación al otro caso. En lo que respecta a las unidades convenciones, en cinco de ellas se presentó un ligero incremento en su despacho de energía, esto para cubrir la potencia que las RES dejaron de inyectar al sistema, en este caso el costo y las emisiones de CO_2 sufrieron un aumento ligeramente superior al 40 % y 21 %, respectivamente, aunque si se compara estos valores con el ED donde la energía es despachada solo por unidades convencionales, los costos siguen siendo menores al igual que las emisiones generadas en más del 8 % y 29 %, lo que aún hace viable la inclusión de los recursos renovables en el despacho de energía.

Tabla 4.11: EDRES multi-objetivo con penetración máxima del 40 % de RES

| Despacho económico con inclusión de RES | | | | |
|---|------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|
| Unidad | RES sin coeficiente de costo | Emisiones (ton/día) | RES con coeficiente de costo | Emisiones (ton/día) |
| 1 | 6970.77 | 134142.79 | 7530.09 | 158625.46 |
| 2 | 1736.07 | 7310.04 | 2090.80 | 11038.70 |
| 3 | 3479.58 | 24359.84 | 3863.67 | 30684.56 |
| 4 | 1212.89 | 2031.92 | 1424.95 | 2890.74 |
| 5 | 1506.88 | 4393.16 | 1883.99 | 7174.94 |
| 6 | 1200.00 | 3025.41 | 1200 | 3025.41 |
| RES | 8877.13 | 0 | 7013.41 | 0 |
| Potencia Total (MW) | 24 983.32 | | 25 006.91 | |
| Emisiones (ton/día) | 175 263.17 | | 213 439.81 | |
| Costo Total (\$) | 192 132.98 | | 277 513.54 | |

Caso D3. EDRES con inclusión de BESS multiobjetivo.

En la Tabla 4.12, se presentan los resultados del ED para dos niveles de penetración, en los cuales se considera factor de costos a las unidades no convencionales y BESS, dichos factores están representados en la Tabla 4.3. Como se aprecia en la Tabla 4.12, al existir una mayor inclusión de RES en el despacho de energía, la participación de las unidades convencionales es menor, lo que representó una reducción en las emisiones producidas y costos de generación de más del 11 % y 1 %, respectivamente. Al comparar las Tablas

4.7 y 4.12, se observa que al existir una sola función objetivo y cuando el valor asignado a las fuentes renovables y al almacenamiento es igual a cero, la participación de las RES y BESS es mayor, ya que la energía que se encuentra disponible es despachada al no tener costo, mientras que al formular el problema de ED multi-objetivo y al asignar los factores de costos representados en la Tabla 4.3, la participación de las RES se reduce, mientras que los costos de generación tuvieron un aumento significativo del 32.84 % y 51.5 %, respectivamente, en lo que respecta a los BESS, en ambos escenarios no presentaron variaciones en su participación, ya que la energía inyectada al sistema no sufrió algún cambio.

Tabla 4.12: ED multi-objetivo con diferentes niveles de penetración

| Despacho económico con inclusión de RESS y BESS | | | | |
|--|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|
| Unidad | Nivel de penetración del 30 % | Emisiones (ton/día) | Nivel de penetración del 40 % | Emisiones (ton/día) |
| 1 | 7586.42 | 159890.29 | 6993.94 | 141363.97 |
| 2 | 2067.75 | 10849.20 | 1939.08 | 9744.17 |
| 3 | 3901.19 | 30849.56 | 3607.94 | 27473.69 |
| 4 | 1430.49 | 2913.42 | 1402.81 | 2798.73 |
| 5 | 1859.25 | 7042.08 | 1758.59 | 6402.25 |
| 6 | 1200 | 3025.41 | 1200 | 3025.41 |
| RES | 6834.23 | 0 | 7013.41 | 0 |
| BESS | 127.67 | 0 | 1079.43 | 0 |
| Potencia Total (MW) | 25 007 | | 24 995.2 | |
| Emisiones (ton/día) | 214 569.96 | | 190 808.22 | |
| Costo Total (\$) | 277 198.69 | | 273 187.24 | |

4.3. Conclusiones

El despacho económico con fuentes renovables e inclusión de BESS, nos permite reducir los costos de generación y las emisiones de CO_2 generadas al producir energía con fuentes de energía convencionales. Como lo muestran los casos de estudio analizados, la incorporación de RES y BESS en el sistema eléctrico reducen el costo total de generación de energía y las emisiones de CO_2 , con lo que se demuestra que es posible reducir los costos de generación y además contribuir al cuidado del medio ambiente, al reducir la participación

de las unidades de generación convencionales.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones generales

En este trabajo de tesis se presentó la metodología para la solución del EDRES e inclusión de los BESS, con la cual se abordó la problemática ante la creciente participación de las RES en los sistemas eléctricos para abatir costos de generación y las emisiones de CO_2 ; además en esta tesis se consideró el pronóstico a corto plazo de la potencia demandada, recurso solar y eólico, puesto que este proceso es importante en la operación de los sistemas eléctricos, ya que permite conocer potencias futuras y ante esto estar preparados a demandas muy altas o la variabilidad de los recursos naturales que puedan poner en riesgo la seguridad y confiabilidad del sistema, los resultados obtenidos en la metodología propuesta mostraron la precisión del modelo propuesto, al predecir valores muy cercanos a los reales, ya que el valor RMSE confirma la buena precisión del modelo.

En los casos de estudio se presentaron diferentes escenarios en los que se mostraron los beneficios de la metodología propuesta. Por una parte se demostró que la solución del despacho económico con fuentes de energía renovables e inclusión de los sistemas de almacenamiento de energía basado en baterías, cuando los costos de generación de estos son significativamente más bajo que las unidades convencionales, pueden reducir significativamente el costo total de generación y las emisiones de CO_2 generadas por las unidades convencionales, ya que al tener más presencia las energías limpias en el despacho de energía,

la participación de las unidades convencionales es mucho menor.

Otro escenario que se analizó fue el del despacho económico multi-objetivo con integración de RES y BESS, en este caso se les asignó costo a las unidades no convencionales y los BESS, los resultados mostraron que con la implementación del ED multi-objetivo las emisiones producidas son reducidas significativamente, mientras que los costos son elevados si se comparan con el caso anterior donde las unidades no convencionales no tienen costo de producción, aunque el costo es menor comparado donde la energía es despachada solo por unidades térmicas.

En general, la metodología propuesta demostró importancia de incluir RES y los BESS en la solución del problema del ED multi-objetivo para reducir los costos de generación y las emisiones de CO_2 , así como importancia de incluir el pronóstico de demanda y de recursos renovables no convencionales que intervienen en el despacho económico.

5.2. Trabajos futuros

El despacho económico con integración de fuentes de energías renovables e inclusión de sistemas de almacenamiento de energía aplicado en sistemas eléctricos de potencia es un área de investigación en constante desarrollo. A continuación se presentan algunos trabajos futuros que pueden desarrollarse para continuar desarrollando esta área de investigación;

- Considerar otras técnicas de pronóstico que sean más precisas y así disminuir el RMSE.
- Considerar otras funciones de costo asociadas a las emisiones de las unidades convencionales. Aplicar otra función de costo, como la de daños a la salud y medio ambiente, hará que la utilización de las unidades con fuentes de energía renovables y los sistemas de almacenamiento tengan mayor importancia.
- Considerar otras funciones de costo de generación no convencional, que tomen en cuenta otros aspectos tales como, costos de inversión, recuperación de la inversión o precios en mercado eléctrico, entre otros.
- Realizar más consideraciones en las restricciones operativas a los BESS.

- Considerar penalizaciones por sobreestimación del recurso renovable, cuando la energía renovable disponible es menor que la energía renovable programada y penalizaciones al no utilizar toda la energía renovable disponible.
- Realizar estudios que permitan seleccionar los sistemas de almacenamiento de energía que sean más eficientes y viables.

Referencias

- [Akorede *et al.*, 2010] Akorede, M. F., Hizam, H., y Pouresmaeil, E. (2010). Distributed energy resources and benefits to the environment. *2010 Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2):724–734.
- [Al-Nahhal *et al.*, 2019] Al-Nahhal, R., Naiem, A., y Hegazy, Y. G. (2019). Economic load dispatch problem using particle swarm optimization technique considering wind power penetration. *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pp. 1–6. IEEE.
- [Alqunun y Crossley, 2016] Alqunun, K. y Crossley, P. A. (2016). Rated energy impact of bess on total operation cost in a microgrid. *2016 IEEE Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, pp. 292–300. IEEE.
- [Amerreh *et al.*, 2014] Amerreh, M., Khozani, Z. S., y Kazemi, A. (2014). Multi objective design of stand-alone pv/wind energy system by using hybrid ga and pso. *2014 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 695–699. IEEE.
- [Basu, 2005] Basu, M. (2005). A simulated annealing-based goal-attainment method for economic emission load dispatch of fixed head hydrothermal power systems. *2005 International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 27(2):147–153.
- [Basu, 2019] Basu, M. (2019). Combined heat and power dynamic economic dispatch with demand side management incorporating renewable energy sources and pumped hydro energy storage. *2019 IET Generation, Transmission & Distribution*, 13(17):3771–3781.

- [Bernardí Cabrer, 2004] Bernardí Cabrer (2004). Econometría empresarial II, modelos lineales sin estacionalidad, Apuntes de Econometría. Disponible en: <https://www.docsity.com/es/econometria-empresarial-ii-modelos-lineales-sin-estacionalidad/3124592/>. Online; 3 de Mayo de 2014.
- [Bidabadi *et al.*, 2016] Bidabadi, S., Omidi, M. J., y Kazemi, J. (2016). Energy efficient power allocation in downlink ofdma systems using sqp method. *2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 329–334. IEEE.
- [Bloomfield *et al.*, 2012] Bloomfield, D. S., Higgins, P. A., McAteer, R. J., y Gallagher, P. T. (2012). Toward reliable benchmarking of solar flare forecasting methods. *2012 The Astrophysical Journal Letters*, 747(2):L41.
- [Chandram *et al.*, 2008] Chandram, K., Subrahmanyam, N., y Sydulu, M. (2008). Brent method for dynamic economic dispatch with transmission losses. *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 1–5. IEEE.
- [Chansareewittaya, 2018] Chansareewittaya, S. (2018). Hybrid differential evolutionary/tabu search for economic dispatch and environmental dispatch. *2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, pp. 9–12. IEEE.
- [Chatrungs, 2019] Chatrungs, N. (2019). Battery energy storage system (bess) and development of grid scale bess in egat. *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*, pp. 589–593. IEEE.
- [Chen y Sen, 2016] Chen, A. y Sen, P. K. (2016). Advancement in battery technology: A state-of-the-art review. *2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1–10. IEEE.
- [Chen *et al.*, 2017] Chen, K., He, Z., Chen, K., Hu, J., y He, J. (2017). Solar energy forecasting with numerical weather predictions on a grid and convolutional networks. *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, pp. 1–5. IEEE.

- [Cheng *et al.*, 2010] Cheng, X., Sun, L., y Liu, P. (2010). Application of regression analysis based on genetic particle swarm algorithm in financial analysis. *2010 International Conference On Computer Design and Applications*, volumen 4, pp. V4–335. IEEE.
- [Cheung y Rios-Zalapa, 2011] Cheung, K. W. y Rios-Zalapa, R. (2011). Smart dispatch for large grid operations with integrated renewable resources. *2011 ISGT 2011*, pp. 1–7. IEEE.
- [Dixit *et al.*, 2011] Dixit, G. P., Dubey, H. M., Pandit, M., y Panigrahi, B. (2011). Artificial bee colony optimization for combined economic load and emission dispatch. *2011 International Conference on Sustainable Energy and Intelligent System*, 1(1):340–345.
- [Energías renovables, 2020] Energías renovables (2020). El parque eólico nacional mexicano supera los 6.000 megavatios de potencia instalada. Disponible en: <https://www.energias-renovables.com/eolica/la-eolica-supero-los-6-gw-de-20200204>. Online; 3 de Febrero de 2020.
- [Energíahoy, 2020] Energíahoy (2020). Capacidad instalada suma 5,510 MW, al primer trimestre de 2020 Asolmex. Disponible en: <https://energiyahoy.com/2020/04/01/capacidad-instalada-suma-5510-mw-al-primer-trimestre-de-2020-asolmex/#:~:text=Capacidad%20instalada%20suma%205%2C510%20MW%2C%20al%20primer%20trimestre%20de%202020%20Asolmex,-1%20abril%2C%202020>. Online; 1 de Abril de 2020.
- [Gaing, 2003] Gaing, Z.-L. (2003). Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints. *2003 IEEE transactions on power systems*, 18(3):1187–1195.
- [GB Electricity National, 2019] GB Electricity National (2019). Grid Demand and Output per Production Type. Disponible en: <https://gridwatch.co.uk/>. Online; 1 de Julio de 2019.
- [Huang y Huang, 2003] Huang, C.-M. y Huang, Y.-C. (2003). A novel approach to real-

- time economic emission power dispatch. *2003 IEEE Transactions on Power Systems*, 18(1):288–294.
- [Huang *et al.*, 2017] Huang, X., Wang, H., Xu, L., y Sun, W. (2017). Learning solar flare forecasting model from magnetograms. En *2017 IEEE Visual Communications and Image Processing (VCIP)*, pp. 1–4. IEEE.
- [International Renewable Energy Agency, 2018] International Renewable Energy Agency (2018). RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2018. Disponible en: <https://irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>. Online;2018.
- [Jadoun *et al.*, 2018] Jadoun, V. K., Pandey, V. C., Gupta, N., Niazi, K. R., y Swarnkar, A. (2018). Integration of renewable energy sources in dynamic economic load dispatch problem using an improved fireworks algorithm. *2018 IET Renewable Power Generation*, 12(9):1004–1011.
- [Kolev y Sulakov, 2018] Kolev, V. y Sulakov, S. (2018). Forecasting the hourly power output of wind farms for day-ahead and intraday markets. *2018 10th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, pp. 1–4. IEEE.
- [Landberg, 1998] Landberg, L. (1998). A mathematical look at a physical power prediction model. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 1(1):23–28.
- [Leka y Barnes, 2003] Leka, K. y Barnes, G. (2003). Photospheric magnetic field properties of flaring versus flare-quiet active regions. II. Discriminant analysis. *2003 The Astrophysical Journal*, 595(2):1296.
- [LGCC, 2018] LGCC (2018). Ley General de Cambio Climático, Reforma Publicada en DOF-13-07-2018. Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_130718.pdf.
- [Lin *et al.*, 2017] Lin, Q., Yin, M., Shi, D., Qu, H., Huo, J., Cheng, Y., Li, G., y Li, J. (2017).

- Optimal control of battery energy storage system integrated in pv station considering peak shaving. *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, pp. 2750–2754. IEEE.
- [LTE, 2015] LTE (2015). Ley de Transición Energética, DOF-24-12-2015. Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LTE.pdf>.
- [Martín C. Jon, 2020] Martín C. Jon (2020). Las energías renovables batieron su récord en México pese a las tensiones con el Gobierno. Disponible en: https://elpais.com/economia/2020/02/26/actualidad/1582694040_481642.html. Online; 26 de Febrero de 2020.
- [Palma *et al.*, 2001] Palma, R., Pérez, J., y Núñez, J. (2001). Flujo de potencia óptimo con programación cuadrática secuencial. *2010 Congreso Optima*.
- [Pazheri *et al.*, 2014] Pazheri, F., Othman, M., Malik, N., y Safoora, O. (2014). Reduction in cost with limited emission at hybrid power plant in presence of renewable power. *2014 IEEE Global Humanitarian Technology Conference-South Asia Satellite (GHTC-SAS)*, pp. 20–24. IEEE.
- [Pazheri *et al.*, 2016] Pazheri, F., Othman, M. F., Malik, N. H., y Al-Arainy, A. A. (2016). Energy-efficient and environmentally friendly power dispatch by trigeneration with renewable energy and energy storage. *2016 Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24(6):5150–5161.
- [Prospectiva de Energías Renovables 2018-2032, 2018] Prospectiva de Energías Renovables 2018-2032 (2018). Prospectiva de Energías Renovables 2018-2032. Disponible en: https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PER_18_32_F.pdf. Online; 2018.
- [Rajasekhar y Rao, 2017] Rajasekhar, V. Y. y Rao, G. K. (2017). Economic load dispatch using newton’s power flow method (using inverted jacobian matrix). *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, pp. 3063–3068. IEEE.
- [Ran *et al.*, 2018] Ran, L., Zhengyu, L., y Zhen, C. (2018). Economic dispatch of off-grid

- photovoltaic generation system with hybrid energy storage. *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, pp. 1–6. IEEE.
- [Ribeiro *et al.*, 2001] Ribeiro, P. F., Johnson, B. K., Crow, M. L., Arsoy, A., y Liu, Y. (2001). Energy storage systems for advanced power applications. *2001 Proceedings of the IEEE*, 89(12):1744–1756.
- [Rodó Paula, 2020] Rodó Paula (2020). Modelo autorregresivo (AR). Disponible en: <https://economipedia.com/definiciones/modelo-autorregresivo-ar.html>. Online; 2020.
- [Rodrigues de Assis *et al.*, 2018] Rodrigues de Assis, J. N. R., Machado-Coelho, T. M., Soares, G. L., y Mendes, M. H. S. (2018). Robust evolutionary optimization algorithm for multi-objective environmental/economic dispatch problem with uncertainties. *2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pp. 1–6. IEEE.
- [Salhi *et al.*, 2014] Salhi, A., Naimi, D., y Bouktir, T. (2014). Resolution of economic dispatch problem considering wind power penetration planning. *2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, pp. 395–400. IEEE.
- [Secretaría de Energía, 2019] Secretaría de Energía (2019). II. Marco constitucional y legal 2019-2033. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/475501/PRODESEN_II.pdf. Online; 14 de Junio de 2019.
- [Serttas *et al.*, 2018] Serttas, F., Hocaoglu, F. O., y Akarslan, E. (2018). Short term solar power generation forecasting: A novel approach. *2018 International Conference on Photovoltaic Science and Technologies (PVCon)*, pp. 1–4. IEEE.
- [Sígler Édgar, 2020] Sígler Édgar (2020). La energía solar y la eólica despuntan, a pesar del rechazo del gobierno. Disponible en: <https://expansion.mx/empresas/2020/01/27/la-energia-solar-y-la-eolica-despuntan-a-pesar-del-rechazo-del-gobierno>. Online; 27 enero de 2020.
- [Singh y Sahay, 2018] Singh, A. y Sahay, K. B. (2018). Short-term demand forecasting by using ann algorithms. *2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, pp. 1–4. IEEE.

- [Snegirev *et al.*, 2017] Snegirev, D., Eroshenko, S., Valiev, R., y Khalyasmaa, A. (2017). Algorithmic realization of short-term solar power plant output forecasting. *2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS)*, pp. 228–231. IEEE.
- [Su y Lin, 2000] Su, C.-T. y Lin, C.-T. (2000). New approach with a hopfield modeling framework to economic dispatch. *2000 IEEE Transactions on Power Systems*, 15(2):541–545.
- [Su, 2011] Su, K. (2011). A modified penalty-free-type nonmonotone sqp method. *2011 Fourth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, pp. 462–466. IEEE.
- [Supingklad *et al.*, 2016] Supingklad, W., Paudel, A., y Ongsakul, W. (2016). Optimal power dispatch considering wind and battery energy storage cost functions using stochastic weight trade-off pso. *2016 International Conference on Cogeneration, Small Power Plants and District Energy (ICUE)*, pp. 1–8. IEEE.
- [Surussavadee y Wu, 2015] Surussavadee, C. y Wu, W. (2015). A neural network-based wind forecasting model for wind power management in northeastern thailand. *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 3957–3960. IEEE.
- [Verma *et al.*, 2018] Verma, S. M., Reddy, V., Verma, K., y Kumar, R. (2018). Markov models based short term forecasting of wind speed for estimating day-ahead wind power. *2018 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*, pp. 31–35. IEEE.
- [Vu *et al.*, 2016] Vu, D. H., Muttaqi, K. M., Agalgaonkar, A. P., y Bouzerdoum, A. (2016). Intra-hour and hourly demand forecasting using selective order autoregressive model. *2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, pp. 1–6. IEEE.
- [Wang y Pu, 2013] Wang, B. y Pu, D. (2013). An sqp algorithm with flexible penalty

- functions. *2013 Sixth International Conference on Business Intelligence and Financial Engineering*, pp. 609–613. IEEE.
- [Wang y Zhang, 2008] Wang, J. y Zhang, T. (2008). Degradation prediction method by use of autoregressive algorithm. *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 1–6. IEEE.
- [Wang y Yuan, 2017] Wang, Q. y Yuan, H. (2017). Failure rate prediction based on ar model and residual correction. *2017 Second International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE)*, pp. 1–5. IEEE.
- [Wood *et al.*, 2013] Wood, A. J., Wollenberg, B. F., y Sheblé, G. B. (2013). *2013 Power generation, operation, and control*. John Wiley & Sons.
- [Yagli *et al.*, 2018] Yagli, Gokhan Mert and Yang, Dazhi and Srinivasan, Dipti and others (2018). Solar forecast reconciliation and effects of improved base forecasts. *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)*, pp. 2719–2723. IEEE.
- [Yan *et al.*, 2015] Yan, N., Xing, Z. X., Li, W., y Zhang, B. (2015). Economic dispatch analysis of wind power integration into power system with energy storage systems. *2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, pp. 141–142. IEEE.
- [Yu *et al.*, 2010] Yu, D., Huang, X., Wang, H., Cui, Y., Hu, Q., y Zhou, R. (2010). Short-term solar flare level prediction using a bayesian network approach. *2010 The Astrophysical Journal*, 710(1):869.
- [Zhang *et al.*, 2005] Zhang, G.-L., Li, G.-Y., Xie, H., y Ma, J.-W. (2005). Environmental/economic load dispatch based on weighted ideal point and hybrid evolutionary algorithm. *2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, volumen 4, pp. 2466–2471. IEEE.
- [Zhang *et al.*, 2015] Zhang, Y., Iu, H. H.-C., Fernando, T., Yao, F., y Emami, K. (2015). Cooperative dispatch of bess and wind power generation considering carbon emission

limitation in australia. *2015 IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(6):1313–1323.