



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL
APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA
CON BATERÍAS PARA MITIGAR EL IMPACTO DE LA ALTA PENETRACIÓN DE
CENTRALES EÓLICAS Y SOLARES FOTOVOLTAICAS EN LA REGULACIÓN PRIMARIA
DE FRECUENCIA DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**

Ricardo Alejandro Vásquez Morales
Asesorado por el M.A. Ing. Axel Ernesto Siguí Gil

Guatemala, noviembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL
APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA
CON BATERÍAS PARA MITIGAR EL IMPACTO DE LA ALTA PENETRACIÓN DE
CENTRALES EÓLICAS Y SOLARES FOTOVOLTAICAS EN LA REGULACIÓN PRIMARIA
DE FRECUENCIA DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

RICARDO ALEJANDRO VÁSQUEZ MORALES
ASESORADO POR EL M.A. ING. AXEL ERNESTO SIGUÍ GIL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|---|
| DECANA | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| VOCAL I | Ing. José Francisco Gómez Rivera |
| VOCAL II | Ing. Mario Renato Escobedo Martínez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente |
| VOCAL V | Br. Fernando José Paz González |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|-----------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Bayron Armando Cuyán Culajay |
| EXAMINADOR | Ing. Romeo Neftalí López Orozco |
| EXAMINADOR | Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON BATERÍAS PARA MITIGAR EL IMPACTO DE LA ALTA PENETRACIÓN DE CENTRALES EÓLICAS Y SOLARES FOTOVOLTAICAS EN LA REGULACIÓN PRIMARIA DE FRECUENCIA DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 03 de julio de 2021.

Ricardo Alejandro Vásquez Morales

Ref. EEPFI-0793-2021
Guatemala, 03 de julio de 2021

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON BATERÍAS PARA MITIGAR EL IMPACTO DE LA ALTA PENETRACIÓN DE CENTRALES EÓLICAS Y SOLARES FOTOVOLTAICAS EN LA REGULACIÓN PRIMARIA DE FRECUENCIA DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante **Ricardo Alejandro Vásquez Morales** carné número **200815557**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Energía y Ambiente.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

"Id y Enseñad a Todos"

Axel Ernesto Siguí Gil
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 14867



Mtro. Axel Ernesto Siguí Gil
Asesor

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Área
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-019-2021

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON BATERÍAS PARA MITIGAR EL IMPACTO DE LA ALTA PENETRACIÓN DE CENTRALES EÓLICAS Y SOLARES FOTOVOLTAICAS EN LA REGULACIÓN PRIMARIA DE FRECUENCIA DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario Ricardo Alejandro Vásquez Morales, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director



Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Guatemala, julio de 2021



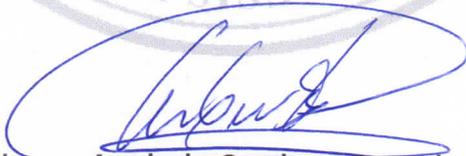
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

DTG. 631-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON BATERÍAS PARA MITIGAR EL IMPACTO DE LA ALTA PENETRACIÓN DE CENTRALES EÓLICAS Y SOLARES FOTOVOLTAICAS EN LA REGULACIÓN PRIMARIA DE FRECUENCIA DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Ricardo Alejandro Vásquez Morales**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|---------------------|--|
| Dios | Por brindarme sabiduría, inteligencia, paciencia y fuerza de voluntad para alcanzar esta meta. |
| Mis padres | Samuel Estuardo Vásquez Ríos y Vilma Lisette Morales Marín, por todo el apoyo y esfuerzo brindado, por darme oportunidades y facilidades para desarrollarme como profesional y como ser humano. Este triunfo también es de ustedes; los amo. |
| Mis hermanos | Daniel y Jasmine Vásquez Morales, por todos los buenos momentos que pasamos juntos y por todo el cariño que nos tenemos. |
| Mi familia | Mis abuelos, tios y primos, por todo el apoyo que me han brindado en las distintas etapas de mi vida y por motivarme a seguir adelante. |
| Mis amigos | Por alentarme a finalizar esta etapa de mi vida y su amistad. |
| Mi novia | Elviramaría Castellanos, por caminar junto a mí en la misma dirección, dedicarme su tiempo y llenar mis días de cariño y sonrisas. |

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|--|---|
| Dios | Por sus infinitas bendiciones. |
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Porque en sus aulas adquirí el conocimiento para la vida y me formé como profesional. |
| Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería | Por la formación académica adquirida en diversas áreas de la ciencia; por ser mi casa de estudios. |
| Mi asesor | M.A. Ing. Axel Ernesto Siguí Gil, por compartir sus conocimientos de manera desinteresada y guiarme en este camino. |
| Administrador del Mercado Mayorista | Por el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | VII |
| LISTA DE SÍMBOLOS | IX |
| GLOSARIO | XI |
| RESUMEN..... | XIII |
| | |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| | |
| 2. ANTECEDENTES | 3 |
| 2.1. Generalidades | 3 |
| 2.1.1. Análisis de resultados de investigaciones previas | 3 |
| 2.1.1.1. Análisis a nivel nacional | 3 |
| 2.1.1.2. Análisis a nivel internacional | 4 |
| 2.1.2. Discusión de resultados de investigaciones previas | 13 |
| | |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 15 |
| 3.1. Descripción general del problema | 15 |
| 3.2. Definición del problema | 16 |
| 3.2.1. Problemas específicos | 16 |
| 3.2.2. Delimitación del problema | 17 |
| 3.2.3. Pregunta principal de investigación | 17 |
| 3.2.4. Preguntas complementarias de investigación | 17 |

| | | |
|----------|--|----|
| 4. | JUSTIFICACIÓN | 19 |
| 5. | OBJETIVOS | 21 |
| 6. | NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN | 23 |
| 7. | MARCO TEÓRICO | 25 |
| 7.1. | Energía eólica | 25 |
| 7.1.1. | Potencial eólico en Guatemala | 25 |
| 7.1.2. | Capacidad instalada en Guatemala | 26 |
| 7.2. | Energía solar fotovoltaica | 26 |
| 7.2.1. | Potencial solar en Guatemala | 26 |
| 7.2.2. | Capacidad del potencial solar en Guatemala | 26 |
| 7.3. | Regulación de frecuencia | 27 |
| 7.3.1. | Regulación primaria | 28 |
| 7.3.2. | Regulación secundaria | 29 |
| 7.3.3. | Regulación terciaria | 30 |
| 7.4. | Sistemas de almacenamiento de energía | 30 |
| 7.4.1. | Mecánico | 30 |
| 7.4.1.1. | Central hidroeléctrica reversible | 31 |
| 7.4.1.2. | Volante de inercia | 31 |
| 7.4.1.3. | Aire comprimido | 32 |
| 7.4.2. | Térmico | 32 |
| 7.4.2.1. | Tradicional de calor sensible | 32 |
| 7.4.2.2. | Calor latente | 33 |
| 7.4.2.3. | Calor de reacción química reversible | 33 |
| 7.4.3. | Electromagnético | 34 |
| 7.4.3.1. | Magnética por superconducción | 34 |

| | | | |
|--------|----------|--|----|
| | 7.4.3.2. | Supercapacitores | 35 |
| 7.4.4. | | Químico | 35 |
| | 7.4.4.1. | Baterías secundarias | 35 |
| 7.4.5. | | Aplicaciones | 36 |
| | 7.4.5.1. | Regulación de frecuencia..... | 36 |
| | 7.4.5.2. | Inercia sintética | 37 |
| | 7.4.5.3. | Arranque en negro | 37 |
| | 7.4.5.4. | Regulación de tensión..... | 37 |
| | 7.4.5.5. | Manejo de congestión | 38 |
| | 7.4.5.6. | Arbitraje en el mercado diario e intradíaario | 38 |
| | 7.4.5.7. | Incremento de consumos propios | 38 |
| | 7.4.5.8. | Reducción y gestión del pico de energía..... | 39 |
| | 7.4.5.9. | Mejora en la calidad de potencia..... | 39 |
| 8. | | PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO..... | 41 |
| 9. | | MARCO METODOLÓGICO | 47 |
| | 9.1. | Tipo de estudio..... | 47 |
| | 9.2. | Diseño de investigación | 47 |
| | 9.3. | Enfoque de la investigación o propuesta..... | 48 |
| | 9.4. | Variables | 48 |
| | 9.4.1. | Operacionalización de variables..... | 50 |
| | 9.5. | Universo y población de estudio..... | 51 |
| | 9.5.1. | Criterios de inclusión | 52 |
| | 9.5.2. | Criterios de exclusión | 52 |
| | 9.6. | Muestreo | 52 |
| | 9.7. | Hipótesis..... | 54 |

| | | |
|----------|--|----|
| 9.8. | Métodos de recolección de datos..... | 55 |
| 9.8.1. | Fases de la metodología | 55 |
| 9.8.1.1. | Fase I: investigación bibliográfica | 55 |
| 9.8.1.2. | Fase II: análisis de base de datos..... | 55 |
| 9.8.1.3. | Fase III: análisis técnico..... | 56 |
| 9.8.1.4. | Fase IV: análisis económico | 57 |
| 9.8.1.5. | Fase V: resultados | 57 |
| 9.8.1.6. | Fase VI: propuesta..... | 58 |
| 9.9. | Técnicas de recolección de datos | 58 |
| 9.10. | Instrumentos de recolección de datos..... | 58 |
| 9.11. | Límites de la investigación | 59 |
| 9.12. | Obstáculos (riesgos y dificultades)..... | 59 |
| 9.13. | Aspectos éticos de la investigación..... | 60 |
| 9.14. | Autonomía..... | 60 |
| 9.15. | Riesgos de la investigación | 60 |
| 9.15.1. | Categoría I (sin riesgo) | 60 |
| 10. | TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN..... | 63 |
| 10.1. | Procesamiento y análisis de datos | 63 |
| 11. | CRONOGRAMA..... | 65 |
| 11.1. | Descripción detallada del cronograma y sus fases | 65 |
| 12. | FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO | 67 |
| 12.1. | Factibilidad técnica | 67 |
| 12.2. | Factibilidad económica | 67 |
| 12.3. | Factibilidad social..... | 69 |
| 12.4. | Factibilidad ecológica..... | 69 |

| | | |
|-----|-------------------|----|
| 13. | REFERENCIAS | 71 |
| 14. | APÉNDICE | 77 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|----|-------------------------------|----|
| 1. | Regulación de frecuencia..... | 28 |
|----|-------------------------------|----|

TABLAS

| | | |
|-------|---------------------------------------|----|
| I. | Variables independientes | 49 |
| II. | Variables dependientes | 49 |
| III. | Operacionalización de variables..... | 51 |
| IV. | Valores k y niveles de confianza..... | 53 |
| V. | Tolerancia de convergencia..... | 58 |
| VI. | Cronograma | 65 |
| VII. | Costos del estudio..... | 68 |
| VIII. | Recursos y disponibilidad..... | 69 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|--------------------------|----------------------------------|
| \$ | Dólar, moneda de Estados Unidos |
| Hz | Hercio |
| KWh/m² | Kilowatt-hora por metro cuadrado |
| MW | Megavatio |
| MWh | Megavatio hora |
| MVA_r | Megavoltio-amperio reactivo |
| % | Porcentaje |
| P.U. | Por unidad |

GLOSARIO

| | |
|---|--|
| Administrador del Mercado Mayorista (AMM) | Entidad privada, sin fines de lucro, encargada de operar el sistema eléctrico de potencia y administrar las transacciones del Mercado Mayorista de Electricidad. |
| Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) | Órgano técnico con independencia funcional, encargado de cumplir y hacer cumplir la Ley General de Electricidad. |
| LCOE (<i>Levelized cost of energy</i>) | Es el valor del coste total actual de construir y operar una instalación generadora de energía a lo largo de toda su vida útil. |
| MENA | Medio Oriente y Norte de África. |
| Ministerio de Energía y Minas (MEM) | Órgano del Estado responsable de coordinar y formular políticas, planes, programas relativos al subsector eléctrico. |
| Power System Simulator for Engineering (PSS®E) | Es una herramienta informática de alto rendimiento, utilizada para simular y analizar los sistemas eléctricos de potencia. |

**Sistema Nacional
Interconectado (SNI)**

Conjunto de líneas de transmisión, subestaciones y demás activos de transmisión que representan el sistema eléctrico de potencia de Guatemala.

RESUMEN

En la actualidad, el uso de energías renovables ha tenido un auge cada vez más importante a nivel mundial y se debe a que está orientado a que todos los sectores, específicamente el energético, cumplan con los objetivos de desarrollo sostenible; para lo cual se enfocan en la diversificación de la matriz energética, en búsqueda de formas de producir energía limpia a partir de nuevas tecnologías.

Guatemala se ha quedado un poco rezagada respecto de la investigación y búsqueda de nuevas fuentes de generación de energía limpia, ya que solamente se ha explotado entre un 2 % a un 4 % de la energía solar fotovoltaica y eólica a gran escala, del potencial real que se tiene. En el país solamente la energía hidráulica se ha desarrollado y explotado en lo que se refiere a energías renovables.

Si bien es cierto, dentro de los planes de expansión de la generación de energía eléctrica, políticas energéticas y objetivos generales por parte del Ministerio de Energía y Minas y en general del sector eléctrico, se ha tenido una mayor participación de energías no convencionales (solar y eólica); dicho estudio se centró en una nueva fuente de energía limpia que puede aportar impactos positivos técnicos, económicos y ambientales, logrando cumplir cada uno de estos objetivos planteados en la política energética e incorporando energía solar térmica.

Guatemala es uno de los países más vulnerables al cambio climático por su ubicación geográfica, sin embargo, también se pueden aprovechar sus recursos; debido a ello se da este impacto negativo; por lo que se tiene el interés en la

reducción del uso de combustibles fósiles en muchas aplicaciones. El presente estudio busca reemplazar dentro del despacho de carga cierta cantidad de generación de energía solar térmica; de lo mismo se concluirá cuando se obtengan los megavatios óptimos del proyecto y se verifique cuánto contribuirían a la reducción de gases de efecto invernadero.

Se espera que este estudio sea significativo para el sector eléctrico, y proporcione un aporte para considerar la incorporación de nuevas tecnologías como la solar térmica, ya que podría servir como antecedente para un futuro proyecto de inversión y contribuir realmente a la diversificación de la matriz energética y la conservación del medio ambiente.

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo de investigación aborda el análisis técnico y económico del aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías para mitigar el impacto de la alta penetración de energía eólica y solar fotovoltaica en la regulación primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

El interés del proyecto en mención viene dado por el incremento significativo alrededor del mundo de la integración de energías renovables a los sistemas eléctricos de potencia; la cual ha desplazado a generadores convencionales y su maquinaria rotativa. Guatemala no es la excepción y a partir del 2015 se integró a la matriz energética la energía eólica y solar fotovoltaica (Ulbig *et al.*, 2014).

El presente trabajo de investigación es uno de los primeros a nivel nacional que persigue analizar el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías para integrar una alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas en el sistema eléctrico de potencia de Guatemala.

En el presente trabajo de investigación se analiza por medio de estudios eléctricos la respuesta dinámica de la frecuencia, al incrementar en etapas la penetración de energía eólica y solar fotovoltaica. De manera análoga se analiza el escenario que contempla el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías.

El trabajo de investigación se divide de la manera siguiente: en la primera y segunda parte se incluye la introducción y los antecedentes. En la tercera parte se da a conocer el planteamiento del problema; Luego la justificación, objetivos, necesidades a cubrir y esquema de solución. En el marco teórico se definen los tipos de energía que serán analizados: eólica y solar fotovoltaica, los sistemas de almacenamiento de energía y sus aplicaciones. Después se da a conocer la propuesta de índice de contenido, el marco metodológico, las técnicas de análisis de información, el cronograma y la factibilidad del estudio. En la parte final se incluyen las referencias y los apéndices.

2. ANTECEDENTES

En el presente capítulo se describen aspectos relacionados con el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías en sistemas eléctricos de potencia con alta penetración de energía eólica y solar fotovoltaica.

2.1. Generalidades

A continuación, se mencionan los aspectos más importantes y relevantes acerca de investigaciones realizadas a nivel internacional, especialmente en Australia, Estados Unidos y en Europa. Debido a la alta penetración con la que cuentan estos sistemas eléctricos de potencia, se han desarrollado varios estudios para el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías, y su participación en la regulación primaria de frecuencia.

2.1.1. Análisis de resultados de investigaciones previas

Se realiza un análisis de investigaciones realizadas a nivel nacional y a nivel internacional, destacando la metodología utilizada y los resultados más importantes de las investigaciones.

2.1.1.1. Análisis a nivel nacional

En Guatemala no se han desarrollado estudios respecto de la alta penetración de energía eólica y solar fotovoltaica en el sistema eléctrico de potencia, solamente estudios del potencial de recurso con el que cuenta el país.

A nivel nacional no existen estudios del aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía (INCYT URL, 2018).

2.1.1.2. Análisis a nivel internacional

En los últimos años, la integración de energías renovables como la eólica y la solar fotovoltaica se ha incrementado significativamente alrededor del mundo, desplazando a los generadores convencionales y su maquinaria rotativa, con el fin de reducir las emisiones de CO₂ por el cambio climático. Estas centrales se conectan al sistema eléctrico de potencia por medio de un inversor en corriente directa por lo cual, no pueden proporcionar inercia rotacional (Ulbig *et al.*, 2014).

Debido a la alta penetración de energía eólica y solar fotovoltaica en sistemas eléctricos de potencia, la dinámica de la frecuencia es más rápida que en los sistemas eléctricos de potencia con alta inercia, por lo cual la operación se ha convertido en un reto. En el artículo científico *“impact of low rotational inertia on power system stability and operation”* (Impacto de baja inercia rotacional en la estabilidad y operación del sistema eléctrico de potencia). Ulbig *et al.*, (2014) evaluó el impacto de una baja inercia rotacional en la estabilidad y la operación del sistema.

En el artículo se analizó la respuesta dinámica del sistema eléctrico de potencia europeo ante eventos de desbalance entre la carga y la generación; se analizó la pérdida de 3 GW de generación en los escenarios de alta y baja inercia (50 % de penetración de energía eólica y solar fotovoltaica), baja inercia con esquemas de rápido despliegue de reserva primaria de frecuencia (Ulbig, *et al.*, 2014).

Entre las contribuciones más importantes que se describen en el artículo, se puede mencionar que la inercia global de un sistema no es constante, está en función del tiempo debido al despacho económico y la cantidad de generadores convencionales en línea. Entre las opciones de mitigación indicados en el artículo, se puede mencionar la implementación de inercia sintética directamente de centrales eólicas y solares fotovoltaicas y la implementación de esquemas de rápido despliegue de reserva primaria de frecuencia, como los sistemas de almacenamiento de energía con baterías, por su característica especial de rápida respuesta (Ulbig *et al.*, 2014).

En el artículo científico "*The combined effects of high penetration of wind and pv on power system frequency response*" (Los efectos combinados de alta penetración de energía eólica y solar fotovoltaica en la respuesta de frecuencia del sistema eléctrico de potencia), Yan *et al.* (2015) utiliza el software de simulación PSS®E para evaluar la respuesta de la frecuencia ante escenarios de alta penetración (demanda promedio) de centrales eólicas y solar fotovoltaica para techos en el sistema eléctrico del sur de Australia.

Ante esta alta penetración se desplaza la cantidad de generadores convencionales en línea para regular frecuencia y ante un desbalance entre la carga y generación, se podría provocar un abatimiento en el comportamiento de la frecuencia, llegando incluso a desconectar demanda (Yan *et al.*, 2015).

Los resultados del artículo demuestran que, ante un evento de desbalance de carga y generación, en un sistema con baja inercia y un disparo secundario considerable de energía solar fotovoltaica para techos, se pueden dar serios problemas de la regulación de la frecuencia; en algunos casos pueden causar oscilaciones electromecánicas de potencia y problemas de estabilidad (Yan *et al.*, 2015).

El constante crecimiento del parque eólico y solar fotovoltaico pone en cuestionamiento el futuro de la estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia. En el artículo “*Evaluating rotational inertia as a component of grid reliability with high penetrations of variable renewable energy*” (Evaluación de la inercia rotacional como componente de seguridad en sistemas eléctricos de potencia con alta penetración de energía renovable variable), Johnson *et al.*, (2019), evaluó distintos escenarios de penetración de energía renovable variable para determinar ante qué escenario de penetración el sistema eléctrico de potencia es más vulnerable ante contingencias que afectan la frecuencia, como el disparo de centrales generadoras.

Los autores analizaron un caso de estudio utilizando el sistema eléctrico de potencia de Texas, para el cual emplearon el software de simulación para la optimización del despacho y modelación de energía PLEXOS, evaluando distintos escenarios de despacho de generación. El año de evaluación fue el 2030, para el cual utilizaron una tasa de crecimiento anual para la demanda de 1.4 % y una máxima penetración de energía renovable variable de hasta 30 % (Johnson *et al.*, 2019).

Los resultados del análisis demuestran que existe una alta correlación entre la inercia del sistema eléctrico de potencia y la penetración de energía renovable variable. El sistema eléctrico de potencia de Texas puede mantener condiciones estables de operación para una alta penetración, siempre que las unidades generadoras convencionales se mantengan en línea, ya sea operando al mínimo técnico o a carga parcial, debido a que la contribución de inercia rotacional de estos generadores al sistema es binaria (Johnson *et al.*, 2019).

Los niveles seguros de inercia rotacional en sistemas eléctricos de potencia no se pueden asumir debido a la alta penetración de energías renovables. En el

artículo, “*Renewables in the European power system and the impact on system rotational inertia*” (Energía renovable en el sistema eléctrico de potencia de Europa y su impacto en la inercia rotacional), Mehigan *et al.*, (2020) investigó el impacto de distintos niveles de restricción de inercia en los costos de generación, en la reducción de energías renovables variables y en las emisiones de dióxido de carbono.

Se utilizó el sistema eléctrico de potencia de Europa como caso de estudio, para el cual fue empleado el software de simulación orientado a la optimización del despacho y modelación de energía PLEXOS, evaluando dos escenarios de despacho de generación y dos límites distintos de tasa de cambio de la frecuencia, 0.5 Hz/s y 1 Hz/s. En el primer escenario de despacho, se mantiene la participación de la energía nuclear en la red, para el segundo, se elimina la participación proveniente de estas centrales. El año de evaluación fue el 2030 (Mehigan *et al.*, 2020).

El análisis llevado a cabo demostró que el impacto de los niveles mínimos de inercia es único para cada área de control del sistema eléctrico de potencia de Europa, el cual depende principalmente del tamaño del área, la matriz energética y el intercambio de potencia con los sistemas eléctricos de potencia. Los resultados demuestran que es necesario evaluar los niveles mínimos de inercia para la transición a niveles altos de penetración de energía renovable variable, el cual afectará principalmente las metas de reducción de gases de efecto invernadero (Mehigan *et al.*, 2020).

Los niveles altos de penetración de energía renovable están a expensas de las centrales de energía convencional; se observa la necesidad de que estas nuevas tecnologías proporcionen las funciones de soporte al sistema eléctrico de potencia. En el artículo “*Primary frequency regulation with li-ion battery based*

energy storage system – evaluation and comparison of different control strategies” (Regulación primaria de frecuencia con sistemas de almacenamiento de energía con baterías de ion-litio – evaluación y comparación con diferentes estrategias de control), Thorbergss *et al.* (2013) analiza la viabilidad de proveer regulación de frecuencia primaria con sistemas de almacenamiento de energía, con base en el uso de baterías de Ion-litio.

En el artículo se analizan tres estrategias de control y se comparan entre sí para determinar el mayor beneficio económico evaluado en el mercado eléctrico danés. Se realizan simulaciones para determinar los ingresos obtenidos y la degradación de las baterías Ion-litio. Se evalúa la implementación de una estrategia de gestión de energía para la posición fija del estado de carga. Se realizó un análisis económico con base en simulaciones, considerando distintas posiciones fijas del estado de carga, para la diferenciación de regulación de frecuencia primaria para subir y bajar (Thorbergss *et al.*, 2013).

Los resultados demuestran que la posición fija del estado de carga de las baterías está directamente relacionada con la degradación, tiempo de vida útil y a la ganancia obtenida. Se identificó que, al utilizar una posición fija en el estado de carga de las baterías de 40 %, se incrementa la vida útil del sistema en casi 10 años y se disminuye en un 0.52 % la degradación anual, comparado con una posición fija de 50 %. Del análisis llevado a cabo para los distintos escenarios se concluyó que los beneficios obtenidos se incrementan al disminuir la posición fija del estado de carga (Thorbergss *et al.*, 2013).

En el artículo científico “*A bess sizing strategy for primary frequency regulation support of solar photovoltaic plants*” (Estrategia de dimensionamiento de sistemas de almacenamiento de energía con baterías en centrales solares fotovoltaicas para participar en la regulación primaria de frecuencia), Mejia-

Giraldo, *et al.* (2019) desarrolló un algoritmo de evaluación de desempeño y un modelo de optimización para dimensionar el sistema de almacenamiento de energía con baterías, en el cual utilizaron la plataforma Matlab y GAMS/CPLEX, respectivamente.

El modelo de optimización incorpora los costos de inversión y una función de penalización con base en el estado de carga del sistema de almacenamiento de energía para impedir una mala operación del estado de carga para suministrar reserva primaria de frecuencia. El algoritmo de evaluación de desempeño puede determinar si el dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía es correcto, con base en los días en el cual el sistema falló en proveer reserva primaria de frecuencia. Se utilizaron 15 meses de información del comportamiento de la frecuencia ante eventos de desbalance carga y generación en el sistema eléctrico de Colombia para alimentar la herramienta (Mejia-Giraldo, *et al.*, 2019).

Entre las contribuciones más importantes del artículo se puede mencionar que los límites superior e inferior del estado de carga de los sistemas de almacenamiento de energía con baterías afectan en su dimensionamiento; si estos límites son más estrechos, el dimensionamiento del sistema será mayor. Para dimensionar correctamente el sistema de almacenamiento de energía con baterías se deben utilizar los eventos de desbalance de carga y generación más severos del sistema eléctrico de potencia (Mejia-Giraldo, *et al.*, 2019).

Recientemente se ha visto un gran incremento en el uso de sistemas de almacenamiento de energía con baterías en aplicaciones para la red eléctrica debido a su versatilidad, alta densidad de energía, eficiencia y los bajos costos que siguen disminuyendo. En el artículo “*Battery energy storage system (BESS) y battery management system (BMS) for grid-scale applications*” (Sistemas de almacenamiento de energía con baterías y sistema de gestión de baterías para

aplicaciones en la red] Lawder *et al.* (2014), realiza un análisis exhaustivo del modelamiento de sistemas de gestión en los sistemas de almacenamiento de energía con baterías en las distintas aplicaciones para la red eléctrica.

El uso de sistemas de gestión reduce la degradación de las baterías y mejora el desempeño del sistema. Al combinarlo con un control de supervisión, se puede mejorar el desempeño de los sistemas de almacenamiento de energía con baterías en las siguientes aplicaciones: pico de demanda de potencia, seguimiento de la demanda para incrementar la eficiencia de las centrales de generación, estabilidad en el sistema eléctrico, mejora en la calidad de energía, regulación de frecuencia, reducción de intermitencia en la generación (Lawder *et al.*, 2014).

En el artículo se utiliza de ejemplo el caso de baterías cargadas con energía solar fotovoltaica y su aplicación en el pico de demanda de potencia, en el cual se enfocan en el estado de carga del sistema. Se analizan 3 escenarios de estado de carga, en el cual se demuestra que al reducir en 0.42 % la energía almacenada en las baterías, se incrementa el ciclo de vida del sistema y, a pesar de almacenar menos energía, se incrementa en 9.6 % la cantidad acumulada de energía almacenada en las baterías a lo largo de su vida útil (Lawder *et al.*, 2014)

En la tesis "*Integration of flexibility from battery storage in electricity market*" (Integración de flexibilidad en el mercado de electricidad por medio de sistemas de almacenamiento de energía con baterías), Engels (2020) proporciona una descripción general de las distintas aplicaciones en donde se pueden emplear los sistemas de almacenamiento de energía con baterías y una estimación cuantitativa de lo que se puede percibir en cada una de las distintas aplicaciones. Hoy en día, la tasa de retorno de inversión para los sistemas de almacenamiento de energía con batería aún se percibe baja e incierta; por esta razón el autor se

enfoca en seleccionar su uso en las distintas aplicaciones, optimizar el control y su dimensionamiento para reducir la incerteza e incrementar la tasa de inversión.

Se evalúa un caso de estudio en el mercado de reservas para la regulación de frecuencia del sistema eléctrico de Alemania, en el cual se combina el uso de la optimización estocástica con técnicas robustas de optimización y se demuestra que al combinar aplicaciones, participación en la regulación de frecuencia y disminución de consumo de potencia por parte de industrias, se incrementa de manera significativa el valor del sistema de almacenamiento de energía con baterías, comparado con el uso de este sistema para una sola aplicación (Engels, 2020).

La tesis muestra un marco holístico para optimizar el dimensionamiento y el estado de carga del sistema de almacenamiento de energía por baterías, para asegurarse que nunca esté completamente cargado o descargado. Los resultados muestran que su participación en las distintas reservas para la regulación de frecuencia del sistema es una de las aplicaciones que aporta la mayor tasa de retorno de inversión (Engels, 2020).

La penetración de energías renovables sigue creciendo continuamente debido a la transición mundial de sistemas eléctricos de potencia hacia tecnologías de bajas emisiones de dióxido de carbono, la cual desplaza generadores síncronos convencionales. Este desplazamiento resultará en una considerable reducción en la inercia del sistema, la cual puede conducir a grandes desviaciones de frecuencia, inestabilidad e incluso apagones (Engels, 2020).

En el artículo "*Application of battery energy storage systems for primary frequency control in power systems with high renewable energy penetration*" [Aplicación de sistemas de almacenamiento de energía con baterías para la

reserva primaria de frecuencia en sistemas eléctricos de potencia con alta penetración de energías renovables), Amin *et al.* (2021) investiga cómo los sistemas de almacenamiento pueden mejorar la estabilidad de la frecuencia en futuros sistemas eléctricos de potencia con alta penetración de energía renovable, se analizan los requerimientos de los sistemas de almacenamiento para participar en la regulación primaria de frecuencia y se resaltan las ineficiencias de los generadores síncronos en la regulación.

Los autores utilizan el sistema eléctrico de potencia de Australia como caso de estudio, y analizan un evento de contingencia en la interconexión Queensland – New South Wales ocurrida el 25 de agosto del 2018, en el cual se separa el sistema eléctrico de potencia de Australia. Evalúan el año 2040, en el cual proyectan que el 60 % de la generación térmica a base de carbón sea desplazada por energías renovables no síncronas (Amin *et al.*, 2021).

Entre los resultados más relevantes del estudio se puede mencionar la demostración que al desplazar la generación convencional, la tasa de cambio de la frecuencia ante eventos aumenta. Con un 40 % de penetración de energía renovable en el sistema eléctrico de potencia de Australia, se puede alcanzar el umbral de disparo de generación por alta frecuencia. Se concluyó que, utilizando un sistema de almacenamiento con una capacidad del 15 % de la generación total, se puede limitar la desviación de frecuencia por debajo del umbral de disparo y mejorar la frecuencia para una penetración de 80 % (Amin *et al.*, 2021).

Por último, el artículo demostró que, utilizando un alto coeficiente de estatismo en los sistemas de almacenamiento de energía con baterías, se puede mejorar el amortiguamiento disminuyendo las oscilaciones y contribuyendo con la estabilidad del sistema eléctrico de potencia (Amin *et al.*, 2021).

En abril de 2020 inició la operación comercial de la central generadora Capella Solar de la empresa NEOEN, la cual consiste en dos granjas solares fotovoltaicas con una capacidad de 70 MWp cada una. Las granjas solares Albireo 1 y Albireo 2 se ubican en el departamento de Usulután, El Salvador. Esta central cuenta con el sistema de almacenamiento de energía con baterías de iones de litio más grande de Centro América, la cual le permite participar en la regulación primaria de frecuencia y cumplir con la regulación salvadoreña. El sistema de almacenamiento tiene una capacidad de 3.2 MW y 2.2 MWh (Cartagena, 2019).

2.1.2. Discusión de resultados de investigaciones previas

Las investigaciones de (Amin *et al.*, 2021), (Johnson *et al.*, 2019), (Mehigan *et al.*, 2020), (Ulbig *et al.*, 2014) y (Yan *et al.*, 2015) se enfocan en el impacto de la alta penetración de la energía eólica y solar fotovoltaica sobre la frecuencia de los sistemas eléctricos de potencia, debido al desplazamiento de generadores convencionales.

Las investigaciones resaltan la importancia de la inercia de los sistemas eléctricos de potencia y su alta correlación con la alta penetración de energía eólica y solar fotovoltaica. Identifican la necesidad de evaluar los niveles mínimos de inercia en el sistema eléctrico de potencia para asegurar una transición fiable a niveles altos de penetración de energía renovable variable. Destacan la necesidad de implementar opciones de mitigación para el despliegue rápido de reserva primaria de frecuencia, como los sistemas de almacenamiento de energía con baterías.

En las investigaciones realizadas por Amin *et al.* (2021), Johnson *et al.* (2019), Mehigan *et al.* (2020), Ulbig *et al.* (2014) y Yan *et al.* (2015) se enfocan en el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con

baterías, principalmente para proveer regulación primaria de frecuencia en los sistemas eléctricos de potencia. Resaltan la importancia del estado de carga, su dimensionamiento y cómo los sistemas de control pueden afectar directamente la degradación, tiempo de vida y la ganancia obtenida.

Engels (2020) y Lawder *et al.* (2014) proporcionan una descripción general de las distintas aplicaciones en las que pueden participar los sistemas de almacenamiento de energía con baterías en los sistemas eléctricos de potencia. Por su parte, Engels (2020) agrega una estimación cuantitativa de la percepción en cada una de las aplicaciones. Los resultados demostraron que la mayor tasa de retorno de inversión se obtiene al participar en las distintas reservas para la regulación de frecuencia.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el presente capítulo se describen los aspectos generales en relación con el planteamiento del problema, condiciones específicas y su delimitación.

3.1. Descripción general del problema

El problema radica en que no se ha analizado el impacto de la alta penetración de centrales eólicas y solares en la regulación primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala. En consecuencia, no se ha analizado el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías.

Con el objetivo de integrar de manera segura una alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas al Sistema Nacional Interconectado de Guatemala, es necesario realizar estudios para conocer el impacto que tendrá en la regulación primaria de frecuencia, y una forma de mitigarlo. En la investigación se plantea el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías.

Por consiguiente, en este trabajo de investigación se realizará un análisis técnico y económico del aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías en la regulación primaria de frecuencia, ante un escenario de alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

3.2. Definición del problema

No se ha realizado un análisis técnico y económico del aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías para mitigar el impacto de la alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas en la regulación primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

3.2.1. Problemas específicos

Se desconoce cuál es el impacto y los beneficios de la alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala. Ante este escenario, los sistemas de almacenamiento de energía con baterías pueden contribuir a mitigar el impacto en la regulación primaria de la frecuencia. Para lo cual se evaluará el impacto y se determinarán los beneficios de ambos escenarios.

Por la carencia de investigaciones del aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala, no se han evaluado las opciones comerciales de venta de energía y su participación en servicios complementarios en la operación del sistema eléctrico.

Así mismo, la carencia de un análisis del contexto regulatorio de las leyes y normas técnicas que rigen el mercado eléctrico para centrales eólicas y solares fotovoltaicas con sistemas de almacenamiento de energía con baterías y su participación en los servicios complementarios, puede provocar una operación incorrecta, la cual puede llevar a cortes de energía e incluso apagones.

Por último, se desconoce el ahorro que tendrá el sistema por el aprovechamiento de sistemas de almacenamiento de energía debido a la inexistencia de un análisis de costo-beneficio de la implementación de sistemas de almacenamiento de energía con baterías, en comparación con el costo de la energía no servida por la activación del esquema de desconexión automático de carga por baja frecuencia.

3.2.2. Delimitación del problema

El estudio se pretende realizar sobre el sistema eléctrico de potencia de Guatemala. Se utilizará el software de análisis de sistemas de potencia PSS®E para realizar estudios eléctricos con la base de datos de la programación de largo plazo 2021 – 2022 del Administrador del Mercado Mayorista.

3.2.3. Pregunta principal de investigación

¿Qué se debe de realizar para el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías para mitigar el impacto de la alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas en la regulación primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala?

3.2.4. Preguntas complementarias de investigación

¿Cuál es el impacto y los beneficios de la alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas con sistemas de almacenamiento de energía con baterías en la regulación primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala?

¿Qué se debe de analizar en relación con las leyes y normas técnicas que rigen el mercado eléctrico para centrales eólicas y solares fotovoltaicas con sistemas de almacenamiento de energía con baterías y su participación en los servicios complementarios en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala?

¿Cuáles son las opciones comerciales de venta de energía y servicios complementarios para centrales eólicas y solares fotovoltaicas que implementen sistemas de almacenamiento de energía con baterías en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala?

¿Cuál es el análisis costo-beneficio de la implementación de sistemas de almacenamiento de energía con baterías en centrales eólicas y solares fotovoltaicas para participar en la regulación primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala?

4. JUSTIFICACIÓN

La investigación se fundamenta en las líneas de investigación de energía, correspondientes a energías renovables, respecto del diseño y operación de proyectos eólicos y solares.

Es necesario cuantificar el impacto técnico y económico que se obtendrá con el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías para mitigar el impacto de la alta penetración de energía solar fotovoltaica y eólica en la regulación primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

Si bien se cuenta con estudios en los que se ha analizado la factibilidad de centrales solares fotovoltaicas y eólicas, en el sentido que se dispone de recursos naturales en algunas regiones del país, en Guatemala no se tiene un estudio previo que considere la alta penetración de estas centrales e indique las consecuencias operativas y económicas de las mismas. Por otro lado, no hay registros de estudios respecto del aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías, sus distintas aplicaciones y opciones comerciales en el mercado eléctrico de Guatemala.

Con la presente investigación se pretende esclarecer el panorama que se espera en el sistema eléctrico de Guatemala. Se determinarán los beneficios y potenciales riesgos a los que se debe enfrentar el sistema por las condiciones de operación de alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas.

Se propondrán lineamientos normativos para la incorporación de sistemas de almacenamiento de energía con baterías en centrales eólicas y solares, para mitigar el impacto de su alta penetración en la regulación primaria de frecuencia, para maximizar los beneficios y fortalecer la seguridad operativa del Sistema Nacional Interconectado.

Este estudio será de gran utilidad para las distintas entidades nacionales, Administrador del Mercado Mayorista, Comisión Nacional de Energía Eléctrica y el Ministerio de Energía y Minas. El mismo servirá de referencia para tomar decisiones respecto del aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento en centrales solares fotovoltaicas y eólicas, así como en otras aplicaciones, para enfrentar los cambios que se vienen en la generación eléctrica del país, con el desarrollo de las nuevas tecnologías.

5. OBJETIVOS

General

Realizar un análisis técnico y económico del aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías para mitigar el impacto de la alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas en la regulación primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

Específicos

- Analizar el contexto regulatorio de las leyes y normas técnicas que rigen el mercado eléctrico para centrales eólicas y solares fotovoltaicas con sistemas de almacenamiento de energía con baterías y su participación en los servicios complementarios en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.
- Determinar el impacto y los beneficios de la alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas con sistemas de almacenamiento de energía con baterías para la regulación primaria de frecuencia en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.
- Analizar las opciones comerciales de venta de energía y servicios complementarios para centrales eólicas y solares fotovoltaicas que implementen sistemas de almacenamiento de energía con baterías en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

- Determinar el costo-beneficio de la implementación de sistemas de almacenamiento de energía con baterías en centrales eólicas y solares fotovoltaicas en su participación en la regulación primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

El trabajo de investigación cuenta con dos caracteres principales: el primero es exploratorio e innovador, ya que busca determinar los beneficios e impactos que puede conllevar un escenario de alta penetración de energía eólica y solar fotovoltaica al incorporar el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías en el sistema eléctrico de potencia de Guatemala.

Tendrá un enfoque descriptivo, ya que se detallará el estado de la alta penetración de energía eólica y solar fotovoltaica y el cambio que conlleva en la operación por el aprovechamiento energético de los sistemas de almacenamiento de energía con baterías.

7. MARCO TEÓRICO

En este se presenta la base teórica para dar a conocer el fundamento del conocimiento en materia del abundante recurso solar y eólico que posee Guatemala y el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías.

7.1. Energía eólica

La energía eólica es creada a partir del uso de una turbina, la cual canaliza la energía cinética del viento para generar electricidad. La energía eólica es un recurso que no se agota, es libre, ambientalmente amigable y disponible mundialmente.

A continuación, se describe la situación actual de Guatemala referente al aprovechamiento energético como fuente primaria el viento (Kadhem *et al.*, 2019).

7.1.1. Potencial eólico en Guatemala

Las regiones que cuentan con las condiciones para el aprovechamiento de la energía eólica se ubican en los departamentos de Escuintla, Jalapa y Zacapa. El potencial eólico de Guatemala que se considera económicamente viable se ha estimado entre 400 y 700 MW (INCYT URL, 2018).

7.1.2. Capacidad instalada en Guatemala

Actualmente Guatemala cuenta con una capacidad instalada 107.4 MW de energía eólica, la cual está distribuida en tres centrales de 52.8 MW, 23.1 MW y 31.5 MW (Administrador del Mercado Mayorista, 2021).

7.2. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es un tipo de energía renovable inagotable, la cual está en función principalmente de la irradiación solar que entra a la atmósfera y depende de la ubicación geográfica. El proceso térmico que conecta el panel solar con su entorno está modulado por cuatro variables medioambientales: insolación, temperatura ambiente, velocidad del viento y humedad relativa. A continuación, se describe la situación actual de Guatemala referente al aprovechamiento energético como fuente primaria del sol (Adeh *et al.*, 2019).

7.2.1. Potencial solar en Guatemala

A la fecha, el potencial de generación con energía solar no se ha determinado. El laboratorio de energía renovable de Estados Unidos (NREL), por medio del proyecto SWERA (*Solar and wind energy resource assessment*), estimó que la generación de energía con este recurso puede superar los 10 GWh anuales, de los cuales, solamente se está aprovechando el 0.01 % (INCYT URL, 2018).

7.2.2. Capacidad del potencial solar en Guatemala

Actualmente Guatemala cuenta con una capacidad instalada de 92.5 MW de energía solar fotovoltaica, compuesta por seis centrales instaladas en la red de

distribución y dos de 50 MW y 30 MW en la red de transmisión (Administrador del Mercado Mayorista, 2021).

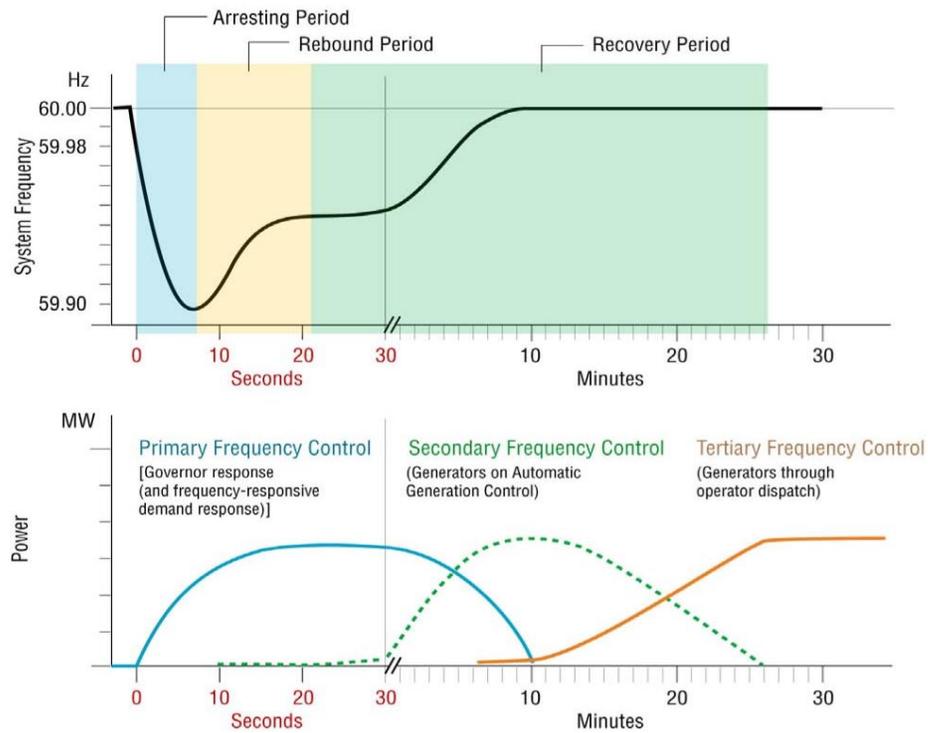
7.3. Regulación de frecuencia

La demanda y la generación de energía está continuamente cambiando a través del tiempo; en un sistema eléctrico de potencia debe haber un balance, el cual se refleja en el comportamiento de la frecuencia, el cual se asemeja a un indicador fundamental de salud para un sistema eléctrico de potencia (NERC, 2019).

Al existir un desbalance, la frecuencia varía de su valor nominal. Los operadores del sistema son los encargados de mantener este balance por medio de sistemas automáticos de control, llamadas a los operadores de las centrales generadoras y en algunos casos de emergencia, por medio de deslastre manual o automático de demanda. La mitigación de las desviaciones de la frecuencia, luego de un desbalance carga–generación, depende principalmente de la respuesta inercial, y la regulación primaria y secundaria de frecuencia (NERC, 2019).

Uno de los principales objetivos de los operadores y planeadores del sistema es que, ante eventos de desbalance, la frecuencia mínima no alcance el umbral de disparo de deslastre de carga. La respuesta de la recuperación de la frecuencia ante una pérdida de generación o de demanda depende de la inercia, el amortiguamiento de la demanda y las acciones de control. (NERC, 2019).

Figura 1. Regulación de frecuencia



Fuente: Arnaltes, S. y García, M. (2018). *Sistemas de almacenamiento energético. Aplicaciones de potencia para eólica*. Consultado el 13 de abril de 2021. Recuperado de https://www.aeeolica.org/uploads/9._Santiago_presentacion_REOLTEC.pdf.

En la figura 1 se muestra el comportamiento típico de la frecuencia y la respuesta de sus controles ante la pérdida de generación en un sistema eléctrico de potencia.

7.3.1. Regulación primaria

La regulación primaria de frecuencia, aparte del deslastre de demanda, es la única acción de control que se opone a la caída libre de la frecuencia para prevenir el colapso del sistema eléctrico (NERC, 2019).

La inercia desempeña un papel fundamental en este control para detener el decaimiento de la frecuencia. Al lapso de 0 segundos hasta la desviación de frecuencia más baja es definido como periodo de detención. El periodo de recuperación se puede subdividir en rebote, estabilización y recuperación. El rebote se identifica por la fuerte de recuperación de la frecuencia hasta los 20 segundos; la regulación primaria de la frecuencia amortigua el rebote y suaviza la recuperación de la frecuencia. En este periodo se crea un nuevo balance entre la generación y la demanda; la regulación primaria estabiliza la frecuencia a un valor más alto, pero más bajo que el punto inicial de partida (NERC, 2019).

Algunas centrales eólicas podrían contribuir a la regulación primaria de frecuencia. En el caso en el cual exista una sobrefrecuencia en el sistema, la regulación para disminuir la potencia está disponible en algunas turbinas eólicas que disponen de controles como el “*pitch*” y “*yaw*”. Para el caso que se presente baja frecuencia, las turbinas eólicas pueden contribuir a la regulación si están operando en modo de reducción de potencia (*curtailment mode*), de tal manera que existe un margen de seguridad o de reserva disponible para generar potencia cuando se requiera. Sin embargo, esto genera un impacto económico negativo sobre la central debido a la pérdida de producción de energía (Sandelic *et. al*, 2018).

7.3.2. Regulación secundaria

Este control es mucho más lento que la regulación primaria, no contribuye a la recuperación inicial de la frecuencia hasta 30 segundos o más después del evento inicial, a través de controles automáticos como el control de generación de área, y puede tardar entre 5 y 15 minutos en restaurar la frecuencia a un valor programado (NERC, 2019).

7.3.3. Regulación terciaria

Tiene como objetivo restaurar las reservas que han sido utilizadas en la regulación primaria y secundaria de frecuencia para que el sistema pueda responder a un evento posterior. La regulación terciaria contempla redespachos, convocación de generación y modificación de intercambios entre áreas de control (NERC, 2019).

7.4. Sistemas de almacenamiento de energía

Los sistemas de almacenamiento de energía permiten convertir la energía eléctrica proveniente del sistema eléctrico de potencia en una forma que pueda ser almacenada y reutilizada cuando se necesite. Son dispositivos flexibles de electrónica de potencia que apoyan al sistema eléctrico de potencia al suministrar energía de manera constante proveyendo confiabilidad y calidad de potencia. Los sistemas de almacenamiento de energía se pueden dividir principalmente en cuatro categorías: mecánico, térmico, electromagnético y químico (Mohamad *et al.*, 2018).

7.4.1. Mecánico

En este sistema de almacenamiento, la energía es convertida entre su forma mecánica y eléctrica; la energía eléctrica proveniente del sistema eléctrico de potencia es almacenada como energía potencial o energía cinética rotacional hasta que es requerida nuevamente para devolverla al sistema eléctrico de potencia. Entre los sistemas de almacenamiento de energía de forma mecánica se puede mencionar: central hidroeléctrica reversible, volantes de inercia, aire comprimido y la energía gravitacional (Nadeem *et. al*, 2019).

7.4.1.1. Central hidroeléctrica reversible

Este sistema almacena la energía eléctrica en forma de energía potencial al bombear agua de la altitud más baja de un embalse a la más elevada del mismo. Este tipo de sistema representa el 92.6 % de la capacidad mundial de almacenamiento de energía con 171.03 GW instalados. Entre sus características se pueden mencionar: larga duración de descarga, alta eficiencia, periodo largo de vida útil, bajo capital por unidad de energía, altamente confiable, flexible, bajos costos de operación y mantenimiento. La capacidad es el mayor de todos, con valores de 10 MW a 5,000 MW (Behabtu *et al.*, 2020).

Dentro de las mayores limitaciones de este sistema se puede mencionar: dependencia alta en las condiciones de la topografía, uso masivo de extensiones de terreno, largo tiempo de construcción, largos periodos de recuperación de inversión (Behabtu *et al.*, 2020).

7.4.1.2. Volante de inercia

Utiliza el principio de la energía cinética en el cual almacena energía proveniente del sistema eléctrico de potencia al acelerar una masa rotante y la descarga al desacelerar. Este sistema está compuesto principalmente de: un volante, cojinetes, máquina eléctrica, convertidor de energía y una cámara de almacenamiento. Entre sus características se puede mencionar su alta eficiencia, tiempos rápidos de respuesta, bajo impacto medio ambiental, baja degradación, periodo largo de vida útil y poco mantenimiento. Dentro de sus mayores limitaciones está la rápida tasa de autodescarga y el daño, potencialmente peligroso, ocasionado por fallas (Sabihuddin *et al.*, 2014).

7.4.1.3. Aire comprimido

Este sistema consta principalmente de tres procesos: compresión, almacenaje y expansión de aire; puede almacenar grandes cantidades de energía con alta eficiencia; cuenta con ventajas y aplicaciones similares a las centrales hidroeléctricas reversibles, y al igual que este sistema, está limitado debido al uso masivo de grandes extensiones de terreno (Mohamad *et al.*, 2018).

7.4.2. Térmico

El calor es almacenado en un depósito aislado, luego es extraído por medio de intercambiadores de calor para su uso como energía térmica o para generación de electricidad por medio un motor térmico. Los sistemas de almacenamiento térmico consisten en tres partes principales: material térmico, intercambiador de calor y sistema de contención. El uso de sistemas de almacenamiento térmico y recuperación de calor ha permitido incrementar las eficiencias de centrales de gas natural hasta en un 60 %. Existen tres tipos de almacenamiento térmico: tradicional: de calor sensible, latente y de reacción química reversible (Sabihuddin *et al.*, 2014).

7.4.2.1. Tradicional de calor sensible

El calor es absorbido y liberado cuando la temperatura ambiente cae por debajo de la de un material. Este sistema de almacenamiento térmico es el más ubicuo; entre los materiales que pueden absorber calor se puede mencionar el concreto, sales, metales y ladrillos refractarios. La entalpía de fusión varía de 0.85 a 1.15 KJ/Kg. (Sabihuddin *et al.*, 2014).

7.4.2.2. Calor latente

Este sistema utiliza para el almacenamiento de energía el calor absorbido durante la fase de transición (fusión de calor); entre los materiales usados se puede mencionar: orgánico, inorgánico y eutéctico. Entre las características principales de los materiales orgánicos se puede mencionar que son los más costosos, aunque estables químicamente y fácil de incorporar a materiales de construcción, porque no son corrosivos (Sabihuddin *et al.*, 2014).

Entre los materiales inorgánicos se puede mencionar la sal hidratada y compuestos metálicos. Los materiales inorgánicos tienen un costo mucho más bajo que los orgánicos, pero sufren de descomposición química luego de su uso repetitivo. La entalpía de fusión en este sistema varía entre 100 y 340 KJ/Kg. (Sabihuddin *et al.*, 2014).

7.4.2.3. Calor de reacción química reversible

Este tipo de almacenamiento es el más eficiente y el que tiene mayor densidad de energía de los sistemas de almacenamiento térmico. Funciona por medio de un proceso endotérmico en el cual rompe los compuestos en sus partes constituyentes, liberando calor y luego mezclando los componentes individuales nuevamente.

En comparación con los otros sistemas de almacenamiento térmico, este sistema ofrece el potencial de almacenaje a largo plazo (Sabihuddin *et al.*, 2014).

7.4.3. Electromagnético

Se basa en el almacenamiento de energía directamente en forma de carga y cuando se requiera, se produce energía eléctrica nuevamente. Este sistema estaba limitado al uso de capacitores e inductores, pero los avances en la tecnología han logrado extender su uso en aplicaciones de gran escala. Entre los sistemas de almacenamiento de energía de forma electromagnética se pueden mencionar la magnética por superconducción y los supercapacitores (Sabihuddin *et al.*, 2014).

7.4.3.1. Magnética por superconducción

La energía almacenada toma la forma de un campo magnético en una bobina superconductora, formado por el flujo de corriente directa. Está compuesto por una bobina superconductora, un sistema de refrigeración y uno de acondicionamiento de potencia. Al descargarse, el sistema tiene la capacidad de proporcionar grandes cantidades de potencia (MW) y densidades de energía hasta de 50000 MWh al sistema eléctrico de potencia en cuestión de milisegundos (Nadeem *et al.*, 2019).

El tiempo de vida útil del sistema es de aproximadamente 30 años y su eficiencia ronda entre el 95 % y 98 %. Dentro de sus mayores limitaciones se puede mencionar el alto capital de inversión, el complejo sistema de refrigeración y la alta sensibilidad del campo magnético ante variaciones de temperatura. (Nadeem *et al.*, 2019).

7.4.3.2. Supercapacitores

Este sistema almacena la energía en forma de un campo electrostático producido al aplicar un voltaje en corriente directa a dos electrodos, separados por una capa delgada del orden de 1 nanómetro, de material dieléctrico. Con base en los materiales de los electrodos, el sistema se puede clasificar en simétrico y asimétrico (Nadeem *et al.*, 2019).

Entre las características principales de este sistema se puede mencionar su confiabilidad, robustez, adaptabilidad a distintos ambientes, tiempo útil de vida de hasta 10000 ciclos de carga y descarga completa con 95 % de eficiencia. Dentro de sus mayores limitaciones se puede mencionar la alta tasa de autodescarga diaria y los altos costos de inversión (Nadeem *et al.*, 2019).

7.4.4. Químico

Se basa en el almacenamiento de energía en baterías por medio de la conversión de reacciones químicas. Los sistemas de almacenamiento de energía con baterías se pueden clasificar en primarias y secundarias. Las baterías primarias se refieren a las que no son recargables, el material interno a la batería cambia de forma irreversible durante su descarga, por lo cual, solamente pueden usarse una vez. Las secundarias se refieren a baterías recargables, las cuales se pueden usar en aplicaciones de sistemas eléctricos de potencia (Mohamad *et al.*, 2018).

7.4.4.1. Baterías secundarias

Se han desarrollado varias tecnologías para satisfacer el interés en su aplicación en sistemas eléctricos de potencia, dentro de las cuales se pueden

mencionar: plomo - ácido, níquel - cadmio (Ni-Cd), níquel - metal hidruro (Ni-MH), sulfuro de sodio (NaS) y ion litio (Li) y las baterías de flujo (Fan *et al.*, 2020).

Para participar en aplicaciones de sistemas eléctricos de potencia se deben considerar los siguientes aspectos constructivos: potencia y densidad de energía, tasa de carga y descarga, problemas de seguridad, voltaje del sistema, capacidad de la batería, tiempo de respuesta y eficiencia económica; deben de cumplir con las siguientes características: tiempo de respuesta rápido, largos ciclos de vida, bajos costos, alta eficiencia energética y alta potencia Debido a su modularización, tiempo de respuesta rápida, flexibilización en cuanto a la instalación y ciclos cortos de construcción, los sistemas de almacenamiento de energía con baterías son los más deseados para aplicaciones en sistemas eléctricos de potencia (Fan *et al.*, 2020).

7.4.5. Aplicaciones

Se describen las aplicaciones de los sistemas de almacenamiento de energía con baterías en los sistemas eléctricos de potencia.

7.4.5.1. Regulación de frecuencia

Los sistemas de almacenamiento de energía con baterías pueden participar en la regulación de frecuencia, ya sea en la reserva primaria, secundaria o terciaria. Estos tienen una cantidad limitada de energía, para asegurar que nunca esté cargado o descargado completamente; utilizan una estrategia de manejo del estado de carga, el cual permite garantizar su capacidad para el periodo en el que participan en estos servicios complementarios (Engels, 2020).

7.4.5.2. Inercia sintética

La inercia de los sistemas eléctricos de potencia normalmente proviene de la inercia rotacional de los generadores síncronos y los motores; al haber un desbalance entre la demanda y la generación, la inercia rotacional previene que la frecuencia del sistema cambie instantáneamente, limitando la tasa de cambio de la frecuencia. La inercia ha venido disminuyendo debido a la reducción de generación convencional y a la alta penetración de energía solar fotovoltaica y eólica. Con el uso correcto de sistemas de control, los sistemas de almacenamiento de energía con baterías pueden proporcionar una inercia sintética al sistema eléctrico de potencia (Alhejaj *et al.*, 2016).

7.4.5.3. Arranque en negro

Se refiere a la capacidad de los generadores de arrancar por completo sin la necesidad de utilizar energía externa de la red, normalmente durante un apagón parcial o total en el sistema eléctrico de potencia. En el sureste de California, demostraron la participación de este servicio complementario utilizando un sistema de almacenamiento de energía con baterías de ion de litio, con una capacidad de 33 MW y 20 MWh (Colthorpe, 2017).

7.4.5.4. Regulación de tensión

Los sistemas de almacenamiento de energía con baterías están conectados a la red por medio de un inversor de electrónica de potencia, el cual puede ser controlado para proporcionar o consumir potencia activa y reactiva de la red, para regular la tensión (Engels, 2020).

7.4.5.5. Manejo de congestión

Se refiere al exceso de transferencia de potencia activa sobre la capacidad de la red. Los sistemas de almacenamiento de energía con batería pueden manejar la congestión, asegurando que la potencia transferida se mantenga por debajo del límite; de esta manera se podrá evitar la limitación de la transferencia o la inversión en incrementar la capacidad de la red (Engels, 2020).

7.4.5.6. Arbitraje en el mercado diario e intradiario

Se refiere al comercio de energía entre consumidores y generadores en el mercado diario e intradiario. Los sistemas de almacenamiento de energía con baterías pueden cargar su sistema cuando el precio es bajo y descargarlo cuando es alto (Mohamad *et al.*, 2018).

7.4.5.7. Incremento de consumos propios

Para la industria que tiene instalada energía solar fotovoltaica, dependiendo de la tarifa, la inyectada a la red (exceso) se diferencia a la consumida en la misma. Normalmente la energía consumida de la red tiene un costo mucho mayor a lo percibido por la inyección de la energía a la red. A la industria le trae mayor beneficio consumir la energía localmente que inyectarla a la red, lo cual se puede realizar con los sistemas de almacenamiento de energía con baterías, almacenando el exceso de energía producido por los paneles y consumiéndolo cuando no esté disponible la energía de los paneles solares fotovoltaicos (Nadeem *et al.*, 2019).

7.4.5.8. Reducción y gestión del pico de energía

La tarifa cargada a los consumidores no solamente consiste en el consumo de energía, sino que del pico máximo de demanda. Los sistemas de almacenamiento de energía pueden reducir los costos de energía de la red al proporcionar (descargar) su energía en el horario pico y cargando en los escenarios de demanda mínima cuando la tarifa es mucho menor (Engels, 2020).

7.4.5.9. Mejora en la calidad de potencia

Se refiere a la calidad de las formas de onda del voltaje y la corriente. La calidad de energía se refleja en la estabilidad del sistema de potencia, en la ausencia de transitorios, armónicos y desbalance de fases. Los sistemas de almacenamiento de energía con baterías pueden incrementar la calidad de potencia del sistema eléctrico al balancear las fases, absorbiendo armónicos, regulando tensión, entre otros (Nadeem *et al.*, 2019).

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DE MARCO TEÓRICO

JUSTIFICACIÓN

INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES

1.1. Generalidades

1.1.1. Análisis de resultados de investigaciones previas

1.1.1.1. Análisis a nivel nacional

1.1.1.2. Análisis a nivel internacional

1.1.2. Discusión de resultados de investigaciones previas

2. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

2.1. Descripción general del problema

2.2. Definición del problema

2.2.1. Problemas específicos

2.2.2. Delimitación del problema

2.2.3. Pregunta principal de investigación

- 2.2.4. Preguntas complementarias de investigación
- 2.3. Necesidades por cubrir o satisfacer

3. MARCO TEÓRICO

- 3.1. Energía eólica
 - 3.1.1. Potencial eólico en Guatemala
 - 3.1.2. Capacidad instalada en Guatemala
- 3.2. Energía solar fotovoltaica
 - 3.2.1. Potencial solar en Guatemala
 - 3.2.2. Capacidad de potencial solar en Guatemala
- 3.3. Regulación de frecuencia
 - 3.3.1. Regulación primaria
 - 3.3.2. Regulación secundaria
 - 3.3.3. Regulación terciaria
- 3.4. Sistemas de almacenamiento de energía
 - 3.4.1. Mecánico
 - 3.4.1.1. Central hidroeléctrica reversible
 - 3.4.1.2. Volante de inercia
 - 3.4.1.3. Aire comprimido
 - 3.4.2. Térmico
 - 3.4.2.1. Tradicional de calor sensible
 - 3.4.2.2. Calor latente
 - 3.4.2.3. Calor de reacción química reversible
 - 3.4.3. Electromagnético
 - 3.4.3.1. Magnética por superconducción
 - 3.4.3.2. Super capacitores
 - 3.4.4. Químico
 - 3.4.4.1. Baterías secundarias
 - 3.4.5. Aplicaciones

- 3.4.5.1. Regulación de frecuencia
- 3.4.5.2. Inercia sintética
- 3.4.5.3. Arranque en negro
- 3.4.5.4. Regulación de tensión
- 3.4.5.5. Manejo de congestión
- 3.4.5.6. Arbitraje en el mercado diario e intradiario
- 3.4.5.7. Incremento de consumos propios
- 3.4.5.8. Reducción y gestión del pico de energía
- 3.4.5.9. Mejora en la calidad de potencia

4. MARCO METODOLÓGICO

- 4.1. Tipo de estudio
- 4.2. Diseño de investigación
- 4.3. Enfoque de la investigación o propuesta
- 4.4. Variables
 - 4.4.1. Operacionalización de variables
- 4.5. Universo y población de estudio
 - 4.5.1. Criterios de inclusión
 - 4.5.2. Criterios de exclusión
- 4.6. Muestreo
- 4.7. Hipótesis
- 4.8. Métodos de recolección de datos
 - 4.8.1. Fases de la metodología
 - 4.8.1.1. Fase I: investigación bibliográfica
 - 4.8.1.2. Fase II: análisis base de datos
 - 4.8.1.3. Fase III: análisis técnico
 - 4.8.1.4. Fase IV: análisis económico
 - 4.8.1.5. Fase V: resultados

- 4.8.1.6. Fase VI: propuesta
- 4.9. Técnicas de recolección de datos
- 4.10. Instrumentos de recolección de datos
- 4.11. Procesamiento y análisis de datos
 - 4.11.1. Tolerancia de los resultados
- 4.12. Límites de la investigación
- 4.13. Obstáculos (riesgos y dificultades)
- 4.14. Aspectos éticos de la investigación
- 4.15. Autonomía
- 4.16. Riesgo de la investigación
 - 4.16.1. Categoría I (sin riesgo)

- 5. ESTUDIO TÉCNICO
- 6. MARCO LEGAL
- 7. PROPUESTA DE SOLUCIÓN
- 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- 9. COSTOS APROXIMADOS Y ANÁLISIS FINANCIERO
 - 9.1. Costo del estudio
 - 9.2. Presupuesto de mejora
 - 9.3. Análisis financiero
 - 9.4. Análisis financiero de costo-beneficio
 - 9.5. Propuesta económica de proyecto

- 10. EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD DE LA PROPUESTA
 - 10.1. Factibilidad técnica
 - 10.2. Factibilidad económica
 - 10.3. Factibilidad social de la propuesta
 - 10.4. Factibilidad ecológica de la propuesta

CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES
REFERENCIAS
APÉNDICES

9. MARCO METODOLÓGICO

9.1. Tipo de estudio

El presente estudio es del tipo descriptivo, ya que busca determinar los efectos técnicos y económicos del aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías para mitigar el impacto de alta penetración de energía solar fotovoltaica y eólica en la reserva primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

Con base en esta investigación se podrá determinar el aprovechamiento energético, el impacto y los beneficios, las opciones comerciales y finalmente proponer lineamientos normativos, que permitan la operación y factibilidad de estos proyectos.

9.2. Diseño de investigación

Para la investigación se modificará e incrementará la penetración de centrales solares fotovoltaicas y eólicas en el Sistema Nacional Interconectado y se analizará la respuesta dinámica del sistema ante un escenario de alta penetración, considerando el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías y sin el mismo.

El estudio tendrá un diseño experimental del tipo experimento puro, que es el que mejor se adapta a las necesidades del estudio.

9.3. Enfoque de la investigación o propuesta

La investigación tendrá un enfoque cualitativo, al describir el impacto y los beneficios, las opciones comerciales y finalmente al proponer lineamientos normativos para obtener el que se obtienen del aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento con baterías en un escenario de alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas.

Por otra parte, la investigación tendrá un enfoque cuantitativo al determinar el costo-beneficio del aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías vs el deslastre de carga, por la activación del esquema de desconexión automática de carga por baja frecuencia, provocado por un desbalance entre la carga y la generación.

9.4. Variables

Para el desarrollo del estudio se trabajará principalmente con variables cuantitativas, ya que es necesario cuantificar los parámetros técnicos y económicos del aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento. Se utilizarán variables cualitativas para describir los escenarios propuestos y evaluados.

Para el análisis técnico y económico se definen las variables que se presentan en la tabla siguiente:

Tabla I. **Variables independientes**

| Variable | Definición | Unidad |
|-----------------------------------|--|----------|
| Penetración | Generación de energía solar fotovoltaica y eólica en el sistema | %, MW |
| Demanda local del Sistema | Potencia consumida por el sistema | MW |
| Intercambio | Potencia intercambiada con otras áreas de control | MW |
| Generación total | Potencia generada para abastecer la demanda y el intercambio | MW |
| Reserva primaria de frecuencia | Potencia disponible en el sistema ante eventos | MW |
| Contingencia | Evento de pérdida de generación | MW |
| Costo de energía no suministrada. | Costo económico de la interrupción del suministro eléctrico por causa de eventos | US\$/MWh |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se describe cada una de las de variables independientes del estudio, y se desarrolla la definición y dimensional.

Tabla II. **Variables dependientes**

| Variable | Definición | Unidad | Variables de las que depende |
|---|--|------------|--|
| Desviación de frecuencia | Desvío entre la frecuencia nominal del sistema y la frecuencia real. | Hz, % | Penetración, reserva primaria de frecuencia, demanda local, intercambios, contingencia |
| Desconexión automática de carga por baja frecuencia | Deslastre de demanda ante desviaciones de frecuencia. | %, MW, MWh | Umbral de desviación de frecuencia |

Continuación de la tabla II.

| | | | |
|-----------------------------------|---|----------|---|
| Energía no servida. | Costo económico de la cantidad de energía no suministrada en un tiempo definido. | US\$ | Precio de oportunidad de la energía, costo de la energía no servida, desconexión automática de carga por baja frecuencia. |
| Precio de oportunidad de energía. | Costo para suministrar un megavatio-hora adicional de energía a un determinado nivel de demanda y parque de generación. | US\$/MWh | Penetración, demanda local del sistema, generación total. |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se describe cada una de las variables dependientes del estudio, se desarrolla la definición, dimensional y las otras variables de las cuales depende.

9.4.1. Operacionalización de variables

A continuación, se describen las propiedades y escalas de medición de cada una de las variables dependientes e independientes.

La operacionalización de las variables se realizará utilizando el simulador de sistemas eléctricos de potencia PSS®E.

Tabla III. **Operacionalización de variables**

| Variable | Dimensión | Propiedad | Escala de medición |
|---|------------------|-------------------|---------------------------|
| Frecuencia | Hz, % | Numérica continua | Razón |
| Desconexión automática de carga por baja frecuencia | %, MW | Numérica continua | Razón |
| Intercambios | MW | Numérica continua | Razón |
| Demanda local | MW | Numérica continua | Razón |
| Generación total | MW | Numérica continua | Razón |
| Penetración | %, MW | Numérica continua | Razón |
| Energía no servida | US\$ | Numérica continua | Razón |
| Precio de oportunidad de energía | US\$/MWh | Numérica continua | Razón |
| Costo de energía no suministrada | US\$/MWh | Numérica continua | Razón |
| Contingencia | MW | Numérica continua | Razón |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla III se describe cada una de las de variables dependientes del estudio, se desarrolla la definición, la dimensional y las variables de las que depende.

9.5. Universo y población de estudio

Para esta investigación, el universo y la población corresponde al conjunto de elementos que representan el sistema de transmisión y de generación del sistema eléctrico de potencia de Guatemala.

9.5.1. Criterios de inclusión

- Modelo reducido equivalente del sistema eléctrico regional.
- Escenario de demanda media en el cual se presenta la máxima penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas.

9.5.2. Criterios de exclusión

- Generadores no modelados en la base de datos.
- La respuesta inercial que pueda aportar el modelo equivalente del sistema eléctrico de México.

9.6. Muestreo

Las variables principales por estudiar se enfocan en el comportamiento de la frecuencia, la cual es la misma en cualquier punto del sistema eléctrico de potencia y depende de la respuesta en conjunto de todo el sistema.

De la base de datos de la programación de largo plazo 2021 – 2022, el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala cuenta con 55 subestaciones en 230 kV, de los cuales es posible obtener los datos de frecuencia, por lo que se toma la totalidad de las subestaciones para el estudio.

Se tomó un error de 5 % y una confianza de 95 % y un porcentaje de subestaciones en 230 kV interrogadas de 90 %; lo que indica que un 10 % no fue posible la obtención de datos de frecuencia.

Fórmula de muestreo:

$$n = \frac{k^2 pqN}{e^2 (N - 1) + k^2 pq}$$

En donde:

n: tamaño muestra a determinar

p: variabilidad positiva = (0.90)

q: variabilidad negativa = (0.10)

N: tamaño de la población = (55)

e: es el error muestral que se considera = (0.05)

k: constante de nivel de confianza que indica la probabilidad de que los resultados del estudio sean ciertos o no.

Los valores de k que más se utilizan y sus respectivos niveles de confianza son:

Tabla IV. **Valores k y niveles de confianza**

| Nivel de confianza | 75 % | 80 % | 85 % | 90 % | 95 % | 97.5 % | 99 % |
|--------------------|------|------|------|------|------|--------|------|
| Valores de k | 1.15 | 1.28 | 1.44 | 1.65 | 1.96 | 2.24 | 2.58 |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se presentan los niveles de confianza y los valores K. El nivel de confianza indica la probabilidad que los resultados de la investigación sean ciertos

$$n = \frac{(1.96)^2 (0.90) (0.10) (55)}{(0.05^2) (55 - 1) + \{(1.96^2) (0.90) (0.1)\} \cdot 0.135 + 0.346} = \frac{19.01}{0.135 + 0.346} = 39.55 = 40$$

La muestra fue la siguiente:

- Población de subestaciones en 230 kV: 55
- Muestra de subestaciones en 230 kV: 55
- Mínimo de subestaciones en 230 kV aceptado: 40

9.7. Hipótesis

HI: Ante eventos de desbalance de carga y generación, en un escenario de alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala, el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías mejora la regulación primaria de frecuencia.

HO: Ante eventos de desbalance de carga y generación, en un escenario de alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala, el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías no mejora la regulación primaria de frecuencia.

9.8. Métodos de recolección de datos

Lo que se requiere es conocer el comportamiento de la frecuencia del sistema eléctrico de potencia ante eventos de desbalance entre la carga y la generación; el medio a través del cual se establece la relación entre el investigador y el software de análisis de sistemas de potencia es la observación.

9.8.1. Fases de la metodología

El desarrollo de la investigación se dividirá en fases, las cuales se describen a continuación.

9.8.1.1. Fase I: investigación bibliográfica

Se iniciará con la revisión de literatura sobre estudios, normas y leyes que rigen el aprovechamiento energético de los sistemas de almacenamiento de energía con baterías en centrales eólicas y solares fotovoltaicas, realizados por entes reguladores, operadores del sistema y entidades consultoras en países como Estados Unidos, Alemania, Dinamarca y Australia.

9.8.1.2. Fase II: análisis de base de datos

Es necesario contar con la base de datos del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala de la programación de largo plazo 2021 – 2022, la cual se obtendrá del Administrador del Mercado Mayorista, siendo de dominio público. Con el software de análisis de sistemas de potencia PSS@E, se revisarán y analizarán las variables independientes del escenario de demanda media en el cual las centrales de energía solar fotovoltaica y eólica están despachadas simultáneamente para cubrir la demanda.

9.8.1.3. Fase III: análisis técnico

A partir de la información obtenida del Administrador del Mercado Mayorista, se crearán dos bases de datos. Se utilizará el software de análisis de sistemas de potencia PSS®E para realizar análisis de flujos de carga y de estabilidad transitoria. En la primera base de datos se verificará que las centrales eólicas y solares fotovoltaicas estén despachadas a su capacidad máxima; en caso contrario se realizará un redespacho. Utilizando la lista de mérito, se identificará la unidad generadora marginal y según sea necesario, se le disminuirá su generación proporcionada al Sistema Nacional Interconectado o se pondrá fuera de operación.

La segunda base de datos contemplará el tratamiento, que en este caso es el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías. Se utilizará como punto de partida la base creada previamente y de acuerdo con la penetración de energía eólica y solar fotovoltaica, se modelará el sistema de almacenamiento de energía con baterías.

Por medio de análisis de flujos de carga se incrementará en etapas de 5 % la penetración de energía eólica y solar fotovoltaica en ambos escenarios. Utilizando la lista de mérito se identificará la unidad generadora marginal y según sea necesario se disminuirá su generación o se pondrá fuera de operación para el despacho de generación. De manera que, por despacho económico, la penetración de energía eólica y solar sustituya en la misma proporción a las centrales de otras tecnologías.

Por medio de análisis de estabilidad transitoria, en cada paso de incremento de penetración de energía eólica y solar fotovoltaica y eólica se aplicará la misma prueba en cada una de las bases de datos. Para los efectos de esta investigación

será un evento de pérdida de generación para provocar un desbalance entre la carga y generación del sistema.

El proceso descrito anteriormente será iterativo, hasta que en el caso sin tratamiento se alcance el umbral de frecuencia para la activación del esquema de desconexión automática de carga por baja frecuencia.

9.8.1.4. Fase IV: análisis económico

Del estudio técnico se utilizará la etapa en la cual se activó el esquema de desconexión automática de carga por baja frecuencia. De acuerdo con la penetración de energía eólica y solar para esa etapa, se analizará el costo de la implementación de sistemas de almacenamiento de energía con baterías al Sistema Nacional Interconectado de Guatemala. La energía no servida por la activación del esquema de desconexión de carga por baja frecuencia se valorizará al costo de la energía no servida, definido por el ente regulador. Con este análisis se obtendrá el costo-beneficio de implementar sistemas de almacenamiento de energía vs el costo por deslastre de demanda por la alta penetración de energía eólica y solar fotovoltaica.

9.8.1.5. Fase V: resultados

Al obtener los resultados se procederá a tabular los mismos y se utilizará estadística descriptiva como: promedio, promedio ponderado y porcentajes, para facilitar la comprensión del comportamiento de las variables. Los resultados se presentarán en tablas y gráficas que permitan visualizar y comparar los escenarios evaluados; se analizará el impacto técnico y económico para el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

9.8.1.6. Fase VI: propuesta

Se propondrán lineamientos normativos que permitan obtener los beneficios máximos que puedan brindar estas tecnologías, velando por la seguridad del sistema eléctrico de potencia y el beneficio económico de su implementación.

9.9. Técnicas de recolección de datos

El software de análisis de potencia PSS®E cuenta con un motor interno que recolecta y registra la información de los resultados obtenidos de las simulaciones. Estos se pueden graficar y analizar en el mismo software o bien exportar a hojas de Excel o archivos de texto plano para poder analizarlos.

9.10. Instrumentos de recolección de datos

Por ser un instrumento confiable y válido se utilizará el software de simulación de sistemas de potencia PSS®E. Los resultados, las simulaciones de análisis de flujos de carga en el dominio del tiempo son replicables por cualquier persona con acceso a los insumos utilizados para el desarrollo de la investigación.

Tabla V. Tolerancia de convergencia

| Nombre | Usado por | Valor | Aplicado a |
|--------|------------------|---------------|--|
| TOL | Gauss – Seidel | 0.0001 P.U. | Tolerancia de convergencia de cambio de magnitud de voltaje. |
| TOLN | Newton – Raphson | 0.1 MW y MVAR | Discrepancia en la tolerancia de convergencia. |

Continuación de la tabla V.

| | | | |
|--------|------------------|---------------|---|
| VCTOLQ | Newton – Raphson | 0.1 MW y MVAR | Discrepancia en la tolerancia de convergencia de la barra controlada por potencia reactiva. |
| VCTOLV | Newton – Raphson | 0.00001 P.U. | Error de tolerancia de convergencia de bus controlado por voltaje. |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se presentan las tolerancias utilizadas en cada uno de los métodos de solución usados por el simulador de sistemas eléctricos de potencia PSS®E.

9.11. Límites de la investigación

El desarrollo de la investigación se limitará al análisis técnico de la base de datos del año estacional 2021 – 2022, elaborado por el Administrador del Mercado Mayorista.

9.12. Obstáculos (riesgos y dificultades)

Para el análisis técnico, tanto para la parte de revisión de flujos de carga como para las simulaciones en el dominio del tiempo, se pueden obtener errores o advertencias respecto de la modelación de los sistemas de control y parámetros característicos de las unidades generadoras y de los parámetros eléctricos de los elementos de transmisión. Si al verificar la base de datos y ejecutar los análisis se presentara alguna anomalía, se consultará con el operador del sistema para

solventarla, de tal manera que los resultados obtenidos sean congruentes con la operación real del mismo.

9.13. Aspectos éticos de la investigación

La investigación no se realizará sobre ningún ser viviente, sin embargo, se abogará por la prevalencia de la ética para el desarrollo de la investigación.

9.14. Autonomía

La información que se utilizará para el desarrollo de la investigación es de dominio público. Las personas necesarias para el desarrollo de la investigación son: el asesor experimentado y el investigador. La investigación no es del tipo social y no se considera la participación de otro ser humano para el desarrollo de la misma. Sin embargo, durante su desarrollo, se abogará por el respeto de la autonomía de todo ser humano que pueda verse involucrado de forma directa o indirecta.

9.15. Riesgos de la investigación

Debido a que el tipo de estudio no realiza ninguna interacción, intervención o modificación a variables fisiológicas, psicológicas y sociales, puede clasificarse en la categoría I.

9.15.1. Categoría I (sin riesgo)

Esta investigación se considera sin riesgo debido a que no se efectúa ninguna modificación o intervención intencionada sobre variables biológicas, psicológicas o sociales, ya que la misma no se realiza sobre seres humanos, sino

sobre el sistema eléctrico de potencia de Guatemala. La investigación utiliza datos disponibles de dominio público.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

10.1. Procesamiento y análisis de datos

Se utilizará el programa de simulación de sistemas eléctricos de potencia PSS®E, el cual es una herramienta que utiliza esquemas iterativos como Gauss-Seidel, Newton-Raphson, Newton-Raphson desacoplado y Newton-Raphson desacoplado rápido para resolver una matriz de admitancias, compuesta por las impedancias de líneas de transmisión, transformadores, capacitores, demanda, entre otros. Este programa computacional tiene la característica de realizar simulaciones de flujo de carga dinámico en el dominio del tiempo, el cual será esencial para analizar el comportamiento de la frecuencia en el desarrollo de la investigación.

En el software de simulación PSS®E se pueden definir las tolerancias de convergencia de los resultados obtenidos. Esta corresponde a la diferencia entre la mejor solución encontrada y un límite superior menor que la tolerancia definida, los cuales se definieron como se muestra a continuación:

De igual manera se utilizará estadística descriptiva con herramientas como: promedio, promedio ponderado, porcentajes y medidas de posición.

Para la representación de los datos se utilizarán gráficos de los siguientes tipos: diagrama de barras y de sectores.

11. CRONOGRAMA

Se hace una descripción de las actividades que se realizarán durante todo el proceso de investigación y las fechas estipuladas para su cumplimiento.

11.1. Descripción detallada del cronograma y sus fases

El cronograma se divide en 5 fases, las cuales se definieron en relación con la metodología propuesta. Se presentan a diferentes escalas las distintas fases para el desarrollo de la investigación, así como las actividades que se ejecutarán y el tiempo estimado para su desarrollo.

Tabla VI. Cronograma

| Id | Fase de la investigación | Actividad | Duración | Comienzo | Fin | hi 3, 2021 | ago | sep | hi 4, 2021 | oct | nov | dic | hi 1, 2022 | ene | feb |
|----|-------------------------------------|--|----------|--------------|--------------|------------|-----|-----|------------|-----|-----|-----|------------|-----|-----|
| 1 | Fase I: Investigación bibliografica | Normas y leyes a nivel nacional | 5 días | jue 01/07/21 | mié 07/07/21 | | | | | | | | | | |
| 2 | | Normas y leyes a nivel regional | 5 días | jue 08/07/21 | mié 14/07/21 | | | | | | | | | | |
| 3 | | Estudios, normas y leyes a nivel internacional | 15 días | jue 15/07/21 | mié 04/08/21 | | | | | | | | | | |
| 4 | Fase II: Análisis bases de datos | Análisis variables independientes | 5 días | jue 05/08/21 | mié 11/08/21 | | | | | | | | | | |
| 5 | Fase III: Análisis técnico | Elaboración base de datos No. 1 | 15 días | jue 12/08/21 | mié 01/09/21 | | | | | | | | | | |
| 6 | | Modelación sistema de almacenamiento de energía con baterías | 10 días | jue 02/09/21 | mié 15/09/21 | | | | | | | | | | |
| 7 | | Elaboración base de datos No. 2 | 5 días | jue 16/09/21 | mié 22/09/21 | | | | | | | | | | |
| 8 | | Análisis flujos de carga | 20 días | jue 23/09/21 | mié 20/10/21 | | | | | | | | | | |
| 9 | | Análisis estabilidad transitoria | 20 días | jue 21/10/21 | mié 17/11/21 | | | | | | | | | | |
| 10 | | Revisión y evaluación de datos | 5 días | jue 18/11/21 | mié 24/11/21 | | | | | | | | | | |
| 11 | Fase IV: Análisis económico | Análisis financiero | 20 días | jue 25/11/21 | mié 22/12/21 | | | | | | | | | | |
| 12 | | Análisis costo - beneficio | 10 días | jue 23/12/21 | mié 05/01/22 | | | | | | | | | | |
| 13 | | Revisión y evaluación de datos | 5 días | jue 06/01/22 | mié 12/01/22 | | | | | | | | | | |
| 14 | Fase V: Resultados | Evaluación del impacto técnico | 10 días | jue 13/01/22 | mié 26/01/22 | | | | | | | | | | |
| 15 | | Evaluación del impacto económico | 10 días | jue 27/01/22 | mié 09/02/22 | | | | | | | | | | |
| 16 | Fase VI: Propuesta | Propuesta lineamientos normativos | 10 días | jue 10/02/22 | mié 23/02/22 | | | | | | | | | | |

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Project.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

12.1. Factibilidad técnica

Desde el punto de vista técnico se cuenta con el equipo de cómputo necesario, las herramientas y licencias necesarias para elaborar la investigación. Adicionalmente se tiene el conocimiento y la experiencia para poder realizar las simulaciones en el software de sistemas eléctricos de potencia PSS®E. Las bases de datos a utilizar son de dominio público. El desarrollo de la investigación es técnicamente factible.

12.2. Factibilidad económica

Los costos asociados a la investigación serán cubiertos por medio de financiamiento propio. Se cuentan con los recursos necesarios para desarrollarla, por lo cual, es factible económicamente.

El detalle de los costos asociados al desarrollo de la investigación se describe en la tabla siguiente:

Tabla VII. **Costos del estudio**

| Descripción | Presupuesto |
|--|--------------------|
| Investigador | Q 32,433.10 |
| Honorarios de asesor experimentado | Q 2,500.00 |
| Matricula anual estudiantil | Q 1,031.00 |
| Curso: Programa académico de graduación 1 | Q 2,000.00 |
| Curso: Programa académico de graduación 2 | Q 2,000.00 |
| Laptop con sistema operativo y software instalado. | Q 8,800.00 |
| Impresora Epson L3150 | Q 770.00 |
| Sistema de inyección de tinta | Q 220.00 |
| Memoria USB para <i>back-up</i> de datos | Q 275.00 |
| Uso de software PSS®E | Q 5,280.00 |
| Telefonía móvil e internet | Q 4,400.00 |
| TOTAL | Q 59,709.10 |

Fuente: elaboración propia.

Para el desarrollo de la investigación se necesita un total de Q 59,709.10; el financiamiento será propio, debido a que se dispone de los recursos necesarios para su desarrollo; por tanto, la investigación es factible.

Tabla VIII. **Recursos y disponibilidad**

| Recurso | Disponibilidad |
|---------------------------|---|
| Humano | Investigador: Ricardo Alejandro Vásquez Morales Asesor: Ing. Axel Ernesto Siguí Gil |
| Financiero | Es necesario contar con la licencia del software PSS®E actualizada; dicha licencia será proporcionada por el área de energía, teniendo un costo de Q50.00 por cada hora que se utilice. |
| Acceso a la información | Toda la información es de dominio público y está a disposición para el desarrollo del trabajo. |
| Fuentes de financiamiento | Financiamiento propio. |

Fuente: elaboración propia.

12.3. Factibilidad social

Para el desarrollo de la investigación no se contempla ninguna modificación o intervención intencionada sobre variables sociales, ya que la misma no se realizará sobre seres humanos. La investigación se efectuará sobre el sistema eléctrico de potencia de Guatemala, utilizando un software de simulación. El desarrollo de la investigación es socialmente factible.

12.4. Factibilidad ecológica

En las distintas etapas del desarrollo de la investigación no se contempla alterar o modificar intencionalmente el entorno ecológico; no se estará creando

ningún impacto ambiental negativo. El desarrollo de la investigación es ecológicamente factible.

13. REFERENCIAS

1. Akeh, E., Good, S. P., Calaf, M. e Higgins C. W. (2019). *Solar PV power potential is greatest over croplands*. Universidad del Estado de Oregon. Recuperado de <https://www.nature.com/articles/s41598-019-47803-3>.
2. Administrador del Mercado Mayorista. (2021). *Capacidad instalada*. Guatemala: AMM. Recuperado de <https://www.amm.org.gt/anuales-vwp.php#>.
3. Alhejaj, M. and F. M. Gonzalez-Longatt, F. (2016). *Investigation on grid-scale BESS providing inertial response support*. Wollongong, NSW, Australia. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7754049>.
4. Amin, M. R., Negnevitsky, M., Franklin, E., Alam, K. S. y Naderi, S. B. (2021). *Application of battery energy storage systems for primary frequency control in power systems with high renewable energy penetration*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Recuperado de https://scholar.google.com.au/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=3LHUD9oAAAAJ&citation_for_view=3LHUD9oAAAAJ:kNdYIx-mwKoC
5. Behabtu, H. A., Messagie, M., Coosemans, T., Berecibar, M., Fante, K. A., Kebede, A. A., y Mierlo, J. V. (2020). *A review of energy storage technologies' application potentials in renewable energy sources grid*

integration. Ethiopia: Jimma University. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/347270076_A_Review_of_Energy_Storage_Technologies'_Application_Potentials_in_Renewable_Energy_Sources_Grid_Integration.

6. Cartagena, P. (2019). *Almacenamiento con baterías, el futuro de los sistemas de energía*. Madrid, España: Real Academia de Ingeniería. Recuperado de http://www.raing.es/sites/default/files/ALMACENAMIENTO_ENERGIA%20FINAL%20B.pdf.
7. Colthorpe, A. (2017). *California battery's black start capability hailed as 'major accomplishment in the energy industry*. USA: California, Recuperado de <https://www.energy-storage.news/news/california-batterys-black-start-capability-hailed-as-major-accomplishment-i>
8. Datta, U., Kalam, A. y Shi, J. (2020). *Battery energy storage system control for mitigating pv penetration impact on primary frequency control and state-of-charge recovery*. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. Australia: Universidad Victoria. Recuperado de https://vuir.vu.edu.au/38151/1/Ep38151Manuscript_Final.pdf.
9. Engels, J. (2020). *Integration of flexibility from battery storage in the electricity market*. (Tesis de doctorado). Universidad Ku Leuven, Lovaina, Bélgica. Recuperado de <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/560885>.
10. Fan, X., Liu, B., Liu, J., Ding, J., Han, X., Deng, Y. y Zhong, C. (2020). *Battery technologies for grid-level large-scale electrical energy storage*. *Taijin University*. Recuperado de <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12209-019-00231-w.pdf>.

11. INCYT URL. (2018). *Perfil energético de Guatemala: bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía*. Instituto de Investigación y Proyección sobre Ciencia y Tecnología de la Universidad Rafael Landívar, Guatemala. Guatemala: URL. Recuperado de <http://www.infoiarna.org.gt/wp-content/uploads/2019/03/Perfil-Energetico-de-Guatemala.pdf>.
12. Johnson, S. C., Papageorgiou, D. J., Mallapragada, D. S., Deetjen, T. A., Rhodes, J. D. y Webber, M. E. (2019). *Evaluating rotational inertia as a component of grid reliability with high penetrations of variable renewable energy*. USA: Austin, Texas, University. Recuperado de <http://www.webberenergygroup.com/publications/evaluating-rotational-inertia-component-grid-reliability-high-penetrations-variable-renewable-energy/>
13. Kadhem, A., Wahab, N. I. y Abdalla, A. (2019). *Wind energy generation assessment at specific sites in a peninsula in Malaysia based on reliability indices*. Malaysia: University Putra. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/334065982_Wind_Energy_Generation_Assessment_at_Specific_Sites_in_a_Peninsula_in_Malaysia_Based_on_Reliability_Indices/link/5d14fcfb299bf1547c8411d3/download.
14. Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (2010). *Use of frequency response metrics to assess the planning and operating requirements for reliable integration of variable renewable generation*. Universidad de California. Estados Unidos de América: Recuperado de <https://gridintegration.lbl.gov/publications/use-frequency-response-metrics-assess>.

15. Lawder, M. T., Suthar, B., Northrop, P. W., Hoff, C. M., Lietermann, O. y Subramanian, V. R. (2014). *Battery energy storage system (bess) and battery management system (BMS) for grid-scale applications*. USA: Departamento de Energía. Recuperado de <https://www.osti.gov/biblio/1136226-battery-energy-storage-system-bess-battery-management-system-bms-grid-scale-applications>
16. Mehigan, L., Kez, D. A., Collins, S., Foley, A., Ó'Gallachóir, B. y Deane, P. (2020). *Renewables in the European power system and the impact on system rotational inertia*. ResearchGate. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/341198052_Renewables_in_the_European_power_system_and_the_impact_on_system_rotational_inertia/link/5ee53b12299bf1faac55ab6a/download.
17. Mejía, D., Velásquez, G., Muñoz, N., Cano, J. y Lemos-Cano, S. (2019). *A bess sizing strategy for primary frequency regulation support of solar photovoltaic plants*. Colombia: Universidad de Antioquia. Recuperado de <https://www.proquest.com/openview/3c61021e7689d1e580dc80fef0f71562/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2032402>.
18. Mohamad, F., Teh, J., Lai, C. y Chen, L. R. (2018). *Development of energy storage system for power network reliability: a review*. Malaysia: University Sains. Recuperado de <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/9/2278>.
19. Nadeem, F., Hussain, S., Tiwari, P., Goswami, A. K., y Ustun, T. S. (2019). *Comparative review of energy storage systems, their roles and impacts on future power systems*. University of Malaysia. Recuperado

de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1962/1/012035/pdf>.

20. NERC (2019). *Reliability guideline: primary frequency control North American reliability corporation*. Atlanta, Estados Unidos de América. Recuperado de https://www.nerc.com/comm/RSTC_Reliability_Guidelines/PFC_Reliability_Guideline_rev20190501_v2_final.pdf.
21. Sabihuddin, S., Kiprakis, A. E. y Mueller, M. (2014). *A numerical and graphical review of energy storage technologies*. Universidad de Edimburgo. Recuperado de https://pdfs.semanticscholar.org/827b/df044db2238a5e269ec703e005d2ea80d877.pdf_ga=2.179793188.1800987565.1632282777-2142178259.1632282777.
22. Sandelic, M., Stroe, D. y Lov, F. (2018). *Battery storage-based frequency containment reserves in large wind penetrated scenarios: A practical approach to sizing*. Department of Energy Technology, Aalborg University Denmark. Recuperado de <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/3065>.
23. Siemens Industry, Inc. (2017) *PSS®E 33.10: program operation manual*. Schenectady. New York, Estados Unidos de América: Siemens Power Technologies International.
24. Thorbergss, E., Knap, V., Swierczynski, M. J., Stroe, D. I., y Teodorescu, R. (2013). *Primary frequency regulation with Li-ion battery energy storage system - Evaluation and comparison of different control strategies. in proceedings of the 35th international*

telecommunications Hamburgo, Alemania. Alemania. Recuperado de <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/absall.jsp?arnumber=6663276>.

25. Ulbig, A., Borsche, T. S. y Andersson, G. (2014). *Impact of low rotational inertia on power system stability and operation*. Cape Town, South Africa. Recuperado de <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1474667016427618?token=ECABC8356081AAC9752BC2F45B0504CC5D543FE7FEB4E1EA3A848732B84A785FA2AA6EF8B5F2CEBD6D1424B17B84584D&originRegion=us-east-1&originCreation=20210922042018>.
26. Yan, R., Saha, T., Modi, N., Masood, N. y Mosadeghy, M. (2015). *The combined effects of high penetration of wind and pv on power system frequency response*. Australia: Queensland, University. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/273401332_The_combined_effects_of_high_penetration_of_wind_and_PV_on_power_system_frequency_response.

14. APÉNDICE

Apéndice 1. Matriz de consistencia

| Problema principal | Objetivo general | Pregunta general |
|--|--|--|
| No se ha realizado un análisis técnico y económico del aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías para mitigar el impacto de la alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas en la regulación primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala | Realizar un análisis técnico y económico del aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías para mitigar el impacto de la alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas en la regulación primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala | ¿Qué se debe de realizar para el aprovechamiento energético de sistemas de almacenamiento de energía con baterías para mitigar el impacto de la alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas en la regulación primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala? |
| Problema secundario | Objetivo específico | Pregunta específica |
| Falta de un análisis del contexto regulatorio de las leyes y normas técnicas que rigen el mercado eléctrico para centrales eólicas y solares fotovoltaicas con sistemas de almacenamiento de energía con baterías y su participación en los servicios complementarios en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala | Analizar el contexto regulatorio de las leyes y normas técnicas que rigen el mercado eléctrico para centrales eólicas y solares fotovoltaicas con sistemas de almacenamiento de energía con baterías y su participación en los servicios complementarios en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala | ¿Qué se debe de analizar con relación a las leyes y normas técnicas que rigen el mercado eléctrico para centrales eólicas y solares fotovoltaicas con sistemas de almacenamiento de energía con baterías y su participación en los servicios complementarios en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala? |

Continuación del apéndice.

| | | |
|---|---|--|
| Desconocimiento del impacto y los beneficios de la alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas con sistemas de almacenamiento de energía con baterías para la regulación primaria de frecuencia en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala. | Determinar el impacto y los beneficios de la alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas con sistemas de almacenamiento de energía con baterías para la regulación primaria de frecuencia en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala. | ¿Cuál es el impacto y los beneficios de la alta penetración de centrales eólicas y solares fotovoltaicas con sistemas de almacenamiento de energía con baterías para la regulación primaria de frecuencia en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala? |
| Desconocimiento cuales son las opciones comerciales de venta de energía y servicios complementarios para centrales eólicas y solares fotovoltaicas que implementen sistemas de almacenamiento de energía con baterías en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala | Analizar las opciones comerciales de venta de energía y servicios complementarios para centrales eólicas y solares fotovoltaicas que implementen sistemas de almacenamiento de energía con baterías en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala | ¿Cuáles son las opciones comerciales de venta de energía y servicios complementarios para centrales eólicas y solares fotovoltaicas que implementen sistemas de almacenamiento de energía con baterías en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala? |
| Inexistencia de un análisis de costo beneficio de la implementación de sistemas de almacenamiento de energía con baterías en centrales eólicas y solares fotovoltaicas para participar en la regulación primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala | Determinar el costo-beneficio de la implementación de sistemas de almacenamiento de energía con baterías en centrales eólicas y solares fotovoltaicas para participar en la regulación primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala | ¿Cuál es el análisis costo beneficio de la implementación de sistemas de almacenamiento de energía con baterías en centrales eólicas y solares fotovoltaicas para participar en la regulación primaria de frecuencia del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala? |

Fuente: elaboración propia.