



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados

**EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE
ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO GUATEMALTECO Y SUS
POSIBLES MODELOS DE NEGOCIO**

Inga. Ixmucané Solimar Cárdenas Morales

Asesorada por el MSc. Ing. Juan Carlos Pozuelos Buezo

Guatemala, enero de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE
ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO GUATEMALTECO Y SUS
POSIBLES MODELOS DE NEGOCIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

INGA. IXMUCANÉ SOLIMAR CÁRDENAS MORALES
ASESORADA POR EL MTRO. JUAN CARLOS POZUELOS BUEZO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRA EN GESTIÓN DE MERCADOS ELÉCTRICOS REGULADOS

GUATEMALA, ENERO DE 2022

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 Cruz Lorente |
| VOCAL V | Br. Fernando José Paz González |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|---|
| DECANA | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| EXAMINADOR | Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí |
| EXAMINADOR | Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque |
| EXAMINADOR | Ing. Benedicto Estuardo Martínez Guerra |
| 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:

EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO GUATEMALTECO Y SUS POSIBLES MODELOS DE NEGOCIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 24 de junio de 2020.

Inga. Ixmucané Solimar Cárdenas Morales

Facultad de Ingeniería

Decanato
24189101-
24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.021.2022

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 Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO GUATEMALTECO Y SUS POSIBLES MODELOS DE NEGOCIO**, presentado por: **Ixmucané Solimar Cárdenas Morales**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, enero de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, enero de 2022

LNG.EEP.OI.021.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO GUATEMALTECO Y SUS POSIBLES MODELOS DE NEGOCIO”

presentado por **Ixmucané Solimar Cárdenas Morales** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala, 19 de octubre de 2021

Como coordinador de la **Maestría en Artes en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO GUATEMALTECO Y SUS POSIBLES MODELOS DE NEGOCIO”** presentado por la Ingeniera **Ixmucané Solimar Cárdenas Morales** quien se identifica con carné 999001631

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 29 de octubre de 2020.

Ingeniero M.Sc.
Edgar Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería USAC
Ciudad Universitaria, Zona 12

Distinguido Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor de trabajo de graduación de la estudiante Ixmucané Solimar Cárdenas Morales, Carné número 9990001631, cuyo título es "**EVALUACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO GUATEMALTECO Y SUS POSIBLES MODELOS DE NEGOCIO**" para optar al grado académico de Maestra en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados, he procedido a la revisión del mismo.

En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que la estudiante Cárdenas Morales, continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,



*Ing. M.Sc. Juan Carlos Pozuelos Bueza
Colegiado 7,702*

M.Sc. Ing. Juan Carlos Pozuelos B.
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|-------------------|--|
| Dios | Ser supremo con un plan perfecto. |
| Mis padres | Por haber me dado la vida, el apoyo y soporte en cada decisión tomada. |
| Mi esposo | Por su apoyo incondicional para el cumplimiento de esta meta y todas las que he emprendido. |
| Mis hijos | Por motivarme e inspirarme a ser mejor cada día. |
| Mis amigos | Por la compañía en este camino juntos, especialmente a Pablo Orellana, Emil Calix, Iván Ávila y Adalberto Muñoz. |

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de
San Carlos de
Guatemala**

Alma mater que me brindó la oportunidad de aprendizaje.

**Facultad de
Ingeniería**

Por darme las herramientas para desarrollar un criterio científico y analítico.

Mis amigos

Por su cariño y apoyo en cada etapa de la vida.

Mi familia

Por su cariño y apoyo.

Mi asesor

Por su importante y acertada guía, y por brindarme acompañamiento durante la realización del trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | VII |
| GLOSARIO..... | IX |
| RESUMEN..... | XV |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | XVII |
| OBJETIVOS..... | XXI |
| RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO..... | XXIII |
| INTRODUCCIÓN..... | XXV |
| | |
| 1. MARCO REFERENCIAL | 1 |
| | |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 3 |
| 2.1. Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en bancos de baterías (BESS)..... | 3 |
| 2.1.1. Tecnologías aptas para regulación primaria | 4 |
| 2.1.2. Tecnologías aptas para regulación secundaria..... | 4 |
| | |
| 3. NORMATIVA Y CONCEPTOS DE MERCADOS ELÉCTRICOS | 5 |
| 3.1. Oferta firme..... | 5 |
| 3.2. Demanda firme | 6 |
| 3.3. Oferta firme eficiente | 7 |
| 3.4. Potencia total comprometida | 7 |
| 3.5. Oferta firme disponible total..... | 8 |
| 3.6. Precio de oportunidad de la energía..... | 8 |
| 3.7. Reserva rodante regulante | 9 |

| | | |
|---------|---|----|
| 3.8. | Reserva rodante operativa | 9 |
| 3.9. | Integración de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica BESS en la matriz energética internacional | 10 |
| 3.9.1. | Experiencias internacionales con BESS..... | 11 |
| 3.9.2. | Experiencias regionales con BESS | 12 |
| 3.10. | Marco regulatorio de las BESS..... | 13 |
| 3.10.1. | Legislación internacional y su aplicación..... | 14 |
| 3.10.2. | Normativo regional de las BESS | 15 |
| 3.11. | Marco operativo de las BESS..... | 16 |
| 3.11.1. | Modelos de negocios para las BESS y su participación en servicios complementarios. | 17 |
| 3.12. | Las BESS y las generadoras renovables | 18 |
| 3.13. | Las BESS como participantes de mercado | 19 |
| 4. | DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN..... | 21 |
| 4.1. | Tipo y diseño de la investigación..... | 21 |
| 4.1.1. | Unidad de análisis | 22 |
| 4.1.2. | Variables | 22 |
| 5. | PRESENTACIÓN DE RESULTADOS | 29 |
| 5.1. | Cuadro lógico de resultados..... | 31 |
| 5.2. | Análisis de la inserción de los sistemas de almacenamientos BESS a utilizar en el Sistema Nacional Interconectado según experiencias internacionales..... | 31 |
| 5.3. | Factores determinantes en la regulación de mercados para la inserción de las BESS en los mercados eléctricos regionales..... | 32 |
| 5.4. | Modelos de negocio existentes en países con casos de éxito y su aplicación en Guatemala..... | 33 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.5. | Resultados obtenidos de la encuesta | 33 |
| 5.6. | Resultados de escenario comparativo de muestra año estacional 2020..... | 37 |
| 6. | DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 43 |
| | CONCLUSIONES..... | 47 |
| | RECOMENDACIONES..... | 49 |
| | REFERENCIAS..... | 51 |
| | APÉNDICES..... | 57 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|----|--|----|
| 1. | Comparación de despacho y posdespacho | 26 |
| 2. | Modelos de negocio | 35 |
| 3. | Conocimiento de las BESS | 35 |
| 4. | Inserción de las BESS | 36 |
| 5. | Factor costos | 36 |
| 6. | Inserción positiva de las BESS | 37 |
| 7. | Costo variable de generación, septiembre 2020..... | 38 |
| 8. | Costo variable de generación, marzo 2020..... | 39 |
| 9. | Variación de la curva convencional con inserción de BESS | 41 |

TABLAS

| | | |
|-------|---|----|
| I. | Desarrollo de energía con bajas emisiones..... | 17 |
| II. | Cuadro lógico general | 31 |
| III. | Cuadro lógico específico | 32 |
| IV. | Cuadro lógico específico de inserción de BESS | 33 |
| V. | Comportamiento costo variable de generación, septiembre 2020..... | 38 |
| VI. | Comportamiento costo variable de generación, marzo 2020 | 39 |
| VII. | Resultados de inclusión de BESS 70 MWh al SIN | 40 |
| VIII. | Resultados de despacho convencional | 40 |
| IX. | Generación renovable proyectada al 2030..... | 41 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------------|------------------------------|
| US\$ | Dólar. Moneda estadounidense |
| GW | Giga watt |
| MW | Mega watt |
| % | Porcentaje |

GLOSARIO

| | |
|-----------------------|--|
| Agentes | Son los generadores, comercializadores, distribuidores, importadores, exportadores y transportistas. |
| Almacenamiento | Acción y efecto de almacenar= |
| AMM | Administrador del Mercado Mayorista. |
| BESS | <i>Battery Energy Storage System</i> , por sus siglas en inglés, o almacenamiento por baterías. |
| CVG | Costo variable de generación. |
| CO₂ | Dióxido de carbono. |
| Contrato firme | Estipula la cantidad de energía que va a ser vendida o comprada. |
| CSP | Es la energía termosolar de concentración en un punto con el que se genera vapor. |
| Energía | Capacidad para realizar un trabajo. |

| | |
|------------------------------------|--|
| Energía eólica | Energía que proviene del viento. |
| ERNC | Energías renovables no convencionales. |
| Frecuencia | Es la medida de número de veces que se repite un fenómeno por unidad de tiempo; se mide en Hertz. |
| GDR | Es la persona, individual o jurídica titular o poseedora de una central de generación de energía eléctrica que utiliza recursos energéticos renovables. |
| Generador | Es la persona, individual o jurídica poseedora de una central de generación de energía eléctrica. |
| Grandes usuarios | Es un consumidor de energía cuya demanda de potencia excede cien kilovatios (KW), o el límite inferior fijado por el Ministerio de Energía y Minas en el futuro. |
| Ley General de Electricidad | Es la ley que norma el desarrollo del conjunto de actividades de generación, transporte, distribución y comercialización de electricidad. |

| | |
|------------------------------|--|
| Norma técnica | Son las disposiciones emitidas por la comisión de conformidad con la ley y su reglamento. |
| Oferta firme | Es la máxima potencia de una unidad generadora, descontando sus consumos internos. |
| Operador | Ente encargado de regular las transacciones del Mercado Mayorista. |
| Perfil energético | Por su tipo de generación puede ser energía generada por fuentes renovables, o por tipo de demanda residencial o industrial. |
| Recurso no generador | Es el nombre que se le da a la nueva figura de participante como Sistema de Almacenamiento en el Mercado Eléctrico. |
| Regulación primaria | Es la regulación inmediata, con tiempo de respuesta menor a treinta segundos, destinados a equilibrar desbalances instantáneos entre generación y demanda. |
| Regulación secundaria | Es la acción manual o automática de corregir la producción de una o más unidades generadoras para establecer un desvío de la frecuencia, producida por un desbalance entre generación y demanda. |

| | |
|--|---|
| Reserva rodante operativa | Es la fracción de la capacidad de una unidad generadora que está sincronizada al sistema de potencia, pero que no está asignada a la producción de energía. |
| Servicios complementarios | Son los servicios necesarios para mantener la seguridad de sus operaciones. |
| Sistema aislado | Es un sistema eléctrico que no se encuentra conectado al sistema eléctrico nacional. |
| Sistema eléctrico nacional | Es el conjunto de instalaciones, dentro del cual se efectúan las diferentes transferencias de energía eléctrica entre diversas regiones del país. |
| Sistema Nacional Interconectado | Es la porción interconectada con el Sistema Eléctrico Nacional. |
| Subsector eléctrico | Está conformado por tres entes: rector, regulador y operador del sector energía. |
| Transición energética | Es una política energética alemana en donde se lleva a cabo la transición de energías generadas por carbón y nuclear, a energías renovables. |

| | |
|--------------------|--|
| Transmisión | Es el transporte de electricidad por medios físicos, líneas de transmisión y subestaciones eléctricas. |
| TRT | Red de Transmisión Regional. |
| UPS | Dispositivo que proporciona energía de forma ininterrumpida a una carga. |
| Usuarios | Es el titular o poseedor del bien que recibe el suministro de energía. |

RESUMEN

Las nuevas tecnologías energéticas, así como el consumo de estas han cambiado con el tiempo; lo cual permite optimizar los recursos disponibles para mejorar las condiciones de los sistemas eléctricos. El objetivo de este trabajo de graduación es realizar un estudio de la utilización de los sistemas de almacenamiento de energía en baterías BESS y sus posibles modelos de negocio en el sistema nacional interconectado guatemalteco.

El cambio climático ha generado políticas energéticas mundiales para mitigar el calentamiento global, reducir la huella de carbono y las emisiones de CO₂. Las reservas de energía se han convertido en el mayor activo de los países. De igual manera, los avances tecnológicos han llevado a encontrar soluciones para generar energía por medio de recursos renovables.

Con este fin, la pregunta de investigación llevó a conocer los modelos de negocio que se pueden utilizar para adaptarlos al mercado eléctrico guatemalteco. Esta se respondió por medio de la recolección documental y planteamiento de escenarios que modelarían su inserción en el SIN, además de obtener datos estadísticos de las generadoras con costos variables más caros en estación seca y estación lluviosa, con el fin de compararlos con los costos variables de generación de las BESS.

Se utilizaron datos obtenidos de los operadores, reguladores nacionales e internacionales en información pública, así como experiencias documentadas por instituciones académicas y privadas; se realizó el análisis bivariado en un tipo de investigación descriptiva. Las respuestas recibidas sirvieron de base para

determinar los modelos de negocio en el mercado eléctrico nacional que se van a utilizar e incluir los sistemas de almacenamiento como un nuevo agente en el mercado eléctrico guatemalteco.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las plantas de generación renovable presentan variabilidad; mayormente se caracterizan porque su energía no es gestionable. No es posible conocer con certeza si aportarán energía en horas de mayor requerimiento térmico y es por esa razón que carecen de oferta firme.

Actualmente, no existe un sistema que permita almacenar la energía excedente producida en las horas de mayor generación para integrarla a la red. Con un sistema de almacenamiento se podría gestionar la energía producida por las generadoras renovables y de esta manera se entregaría a la red cuando el sistema lo requiera, como por ejemplo una planta generadora fotovoltaica podría participar en el mercado eléctrico en horas de demanda máxima con energía almacenada durante el mismo día en momentos de picos de generación.

Hoy en día ya existen tecnologías en funcionamiento en las grandes plantas generadoras eólicas y fotovoltaicas que entregan energía y que con la utilización de los sistemas de almacenamiento obtienen la capacidad de entregar potencia a los sistemas eléctricos nacionales. A nivel internacional, así como en Guatemala, no se cuenta con incentivos para la inserción de las BESS; lo que ha ocurrido en los países en los que ya se encuentran funcionando dentro de los sistemas eléctricos nacionales, es que las nuevas tecnologías se han instalado y puesto en funcionamiento bajo las mismas reglas de mercado que las otras tecnologías existentes.

Las variables son observables y no manipulables, por lo que se determina que, es una investigación transeccional, dado que, se realiza en un periodo

determinado de tiempo y a la vez correlacional. Se utilizó la técnica de investigación documental, entrevista estructurada y libre y análisis bivariado. Es una investigación mixta, pues se utilizaron métodos cualitativos y cuantitativos, para poder analizar los diferentes tipos de tecnologías de almacenamiento y su comportamiento aplicable al sistema eléctrico guatemalteco.

Se realizó un protocolo de requerimientos que se debe cumplir respecto de los modelos de negocio, para integrarlos al sistema nacional interconectado. Además, se utilizó un plan de muestreo por medio de encuestas de Google Forms, para realizar la comparación de los datos.

Al inicio de la recolección de datos en campo comenzó la pandemia ocasionada por la enfermedad Coronavirus Covid-19, lo que limitó la movilización, al decretarse el toque de queda en el país y ordenándose un distanciamiento social a nivel mundial.

Esta situación ocasionó retrasos en la obtención de datos, puesto que los individuos que conformaban la muestra al inicio de la pandemia, al estar trabajando en *home office* necesitaron un tiempo para ajustarse al cambio; esto significó una limitante para realizar las entrevistas, aunque vale la pena mencionar que el internet facilitó el acercamiento, luego de esta etapa de adaptación de las personas, puesto que las entrevistas se han realizado por este medio; la recolección de datos por medio de la encuesta se hizo por internet y se obtuvo acceso a recopilación de información de otros países como México, El Salvador, Australia, Estados Unidos y Alemania.

Se planteó un escenario en donde en conjunto con el plan de expansión y la política energética del Ministerio de Energía y Minas y la información de la capacidad instalada y efectiva, se replantea desplazar las tecnologías con costos

mayores en el SNI, para ser sustituidas por sistemas de almacenamiento en un escenario conservador, y así determinar la viabilidad de su ingreso al sistema; el escenario se planteó en época seca y en época lluviosa

Descripción del problema:

Debido a que, los sistemas eléctricos nacionales son dinámicos y se encuentran en constante cambio y a velocidades altas, la investigación y desarrollo ha permitido la implementación de nuevas tecnologías de generación de energía renovable con menores costos de fabricación y de instalación, lo que prevé un incremento en la penetración de las centrales de energía renovables a nivel mundial.

La falta de visión en las políticas de Estado para considerar las reservas de energía del país, la ausencia de un sistema de gestión de energía para las tecnologías de almacenamiento de energía limita el acceso a los modelos de negocio en el Mercado Eléctrico Nacional. Se deben analizar los distintos modelos de negocio aplicables al sistema eléctrico guatemalteco, lo cual permite plantear las siguientes preguntas:

Pregunta central:

¿Cómo lograr que las generadoras de energías no convencionales obtengan contratos de oferta firme en el mercado eléctrico nacional por medio de sistemas de almacenamiento para evitar la intermitencia de la curva de generación por medio de las BESS?

Preguntas auxiliares:

- ¿Qué tipo de tecnología de almacenamiento de BESS es el más adecuado para aplicar a los sistemas de energías renovables en el Sistema Nacional Interconectado guatemalteco?
- ¿Qué cambios en la regulación son necesarios para la inserción de los sistemas de almacenamiento BESS de parte del ente rector de la energía en Guatemala?
- ¿Qué opciones de negocio son compatibles con las BESS en Guatemala y su parque de generación existente y el proyectado a futuro?

Delimitación del problema:

El mercado eléctrico guatemalteco se encuentra en constante cambio según el avance de la tecnología en generación eléctrica, disminución de costos y sistemas de gestión; sin embargo, la regulación y los modelos de negocios no se han adaptado a los avances y tendencias en nivel mundial, lo que deja en desventaja al sistema eléctrico nacional. Este problema genera la realización de estudios de integración de los sistemas de almacenamiento, para permitir que los generadores de energías renovables no convencionales opten a otros modelos de negocios que además sean un incentivo de inversión, así como la integración de las BESS como un nuevo agente regulado, pudiéndose conocer como recurso no generador NGR.

OBJETIVOS

General

Efectuar un análisis de la utilización de los sistemas de almacenamiento de energía en baterías BESS y sus posibles modelos de negocio en el Sistema Nacional Interconectado guatemalteco.

Específicos

- Determinar el tipo de tecnología de BESS que mejor se adapta a las condiciones operativas del Sistema Nacional Interconectado.
- Determinar los puntos de mejora en la regulación y normativa vigente para facilitar la integración de los sistemas de almacenamiento al Sistema Nacional Interconectado.
- Investigar los modelos de negocio existentes a nivel mundial y su aplicación en Guatemala.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Se realizó una investigación no experimental de tipo exploratorio, por ser un tema que no ha sido investigado en Guatemala, con un enfoque mixto, utilizando la técnica de investigación documental y la entrevista estructurada y libre.

Se desarrollaron protocolos específicos para realizar las entrevistas con los expertos. para mantener uniformidad y ser objetivos cada uno de los resultados, haciéndose las mismas a una muestra de expertos del subsector eléctrico guatemalteco en cada una de sus áreas, así como expertos internacionales que tuvieron a bien participar del estudio.

Dentro de los expertos se encontraban fabricantes de sistemas de almacenamiento con casos de éxitos a nivel internacional como las empresas Neoen, ABB Hitachi, así como transportistas, distribuidores, grandes usuarios; generadores renovables; reguladores y operadores del sistema.

Se desarrolló un protocolo con un plan de muestreo por medio de encuestas enviadas por Google Forms; inicialmente se planeaba realizarlas personalmente, pero la pandemia de COVID 19 hizo que se modificaran los protocolos diseñados con anterioridad.

Se planteó un escenario en donde se obtuvo una referencia de generación renovable, según el plan de expansión y la política energética del Ministerio de Energía y Minas, planificado para el año 2030, lo que da indicios de aumento de generación renovable con una oportunidad significativa de la inserción de las BESS, por lo que a través de la comparación de la base de datos del AMM con

más de 38,000 datos por mes, se logró determinar el porcentaje de ingreso al sistema de las 10 máquinas con costo variable de generación mayor, luego que al compararlas con el costo variable de generación de las BESS se pudo determinar que sí es factible su utilización, por lo que se modelaron dos escenarios: con el despacho de una BESS con capacidad de 70 MWh y con un despacho convencional, para obtener sus curvas relacionadas.

INTRODUCCIÓN

Se considera que este es el primer estudio que se realiza en Guatemala, utilizando los sistemas de almacenamiento y su inserción en Sistema Nacional Interconectado, los cuales se están incrementando a nivel mundial en los sistemas eléctricos nacionales, haciendo posible la penetración de tecnologías renovables variables, logrando además mitigar el impacto de su variabilidad de potencia, por permitir la gestión de su energía, almacenando la misma en algunas horas para entregarla en horas con máximo requerimiento térmico.

Así mismo, su participación se está extendiendo en el campo de la regulación de frecuencia, en donde sin necesidad de estar acoplado a un generador existente puede desempeñar un papel trascendental en la regulación primaria y secundaria de frecuencia.

Los recientes cambios en la regulación regional imponen requisitos de reserva a las nuevas centrales eólicas y solares que quieran conectar a la Red de Transmisión Regional (TRT), por lo que la implementación de las BESS a dichos proyectos puede facilitar el cumplimiento de estos requisitos.

El primer capítulo aborda los diferentes tipos de sistemas de almacenamiento y las tecnologías aplicables a la regulación primaria y secundaria. También se indaga en las diferentes tecnologías de sistemas de almacenamiento y su comportamiento en un sistema dinámico de energía. El segundo da a conocer las normas de coordinación comercial del Administrador del Mercado Mayorista, que llevó a entender los conceptos primordiales de los

mercados eléctricos que determinan el manejo del mercado y que dan base para el perfil de los sistemas de almacenamiento en Guatemala.

Adicionalmente, se abordan los marcos regulatorios internacionales y regionales, información que es de suma importancia para entender los modelos de negocios que ya se han implementado a nivel internacional y que se aplican en los mercados eléctricos nacionales. Así mismo, se explica el marco operativo de suma importancia para su ejecución.

Finalmente se abordan los posibles modelos de mercado y su aplicación, específicamente a los servicios complementarios del Sistema Nacional Interconectado, y se analizan los mecanismos que permitirían la inserción de los BESS por medio de la política energética a futuro con licitaciones para su ingreso y puesta en marcha, acompañando a una generadora renovable; luego, como figura participante del mercado eléctrico, un recurso no generador con su gestión de regulación de energía REM.

1. MARCO REFERENCIAL

En relación con el avance tecnológico respecto del almacenamiento de energía, Wasmayr (2014) y Lawder (2014) consideraron necesario conocer la tecnología actual de almacenamiento de energía en baterías, su evolución y funcionamiento, para conocer su comportamiento, y sus curvas de carga y descarga.

Vale la pena también citar a Dötsch (2009) quien consideró necesario conocer la tecnología actual de la generación de energía eléctrica renovable no convencional, su evolución, su funcionamiento, para conocer cuál será su comportamiento, sus tiempos de arranque y salida; y así lograr su integración con las energías y con sus sistemas de almacenamiento de energía en baterías.

Respecto de su base legal, en 1996 el Congreso de la República de Guatemala creó los marcos regulatorios de las energías renovables no convencionales (ERNC), de la Ley General de la Electricidad y el Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista, para hacer una propuesta al reglamento de la integración de los contratos de oferta firme en las energías convencionales, en contrariedad con las ERNC que utilizan sistemas de almacenamiento de baterías BESS.

El Congreso de la República de Guatemala (1996) estableció que era importante regular el sistema de operación del Mercado Eléctrico Guatemalteco para conocer los paradigmas del ente operador ante las ERNC y su operación al integrarlos con contratos firmes en las energías convencionales.

El Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista (2001), en el artículo 225 establece en relación con la oferta firme eficiente que, en caso los generadores de energía eléctrica resulten con demanda firme inferior a sus potencias firmes, deberán comprar sus excedentes de otros generadores para poder honrar los contratos. Esto que permite otro modelo de negocio para las BESS como unidades independientes que entreguen la oferta firme eficiente en caso sea requerido por los agentes.

2. MARCO TEÓRICO

Con el fin de comprender el tema fundamental del presente trabajo, se abordan a continuación los fundamentos de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en bancos de baterías, sus diferentes tecnologías con el enfoque de la aplicación hacia el mercado eléctrico guatemalteco, el perfil energético, los marcos regulatorios internacionales y regionales, el marco operativo y los posibles modelos de negocios aplicables al sistema eléctrico nacional.

2.1. Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en bancos de baterías (BESS)

Los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en bancos de baterías son utilizados desde hace varios años en diferentes aplicaciones, en donde se necesita un respaldo y una disponibilidad ininterrumpida. Existen diversos tipos de sistemas de almacenamiento de energía, separados según la capacidad de almacenamiento de la energía acumulada por medios químicos.

Por una parte, existe el almacenamiento por medio de plomo ácido, el cual hasta la fecha ha sido el más utilizado. Lamentablemente, también tiene grandes desventajas, como por el ejemplo el vandalismo. La tecnología de litio ofrece mejores oportunidades para los sistemas de almacenamiento con necesidades de alta densidad de energía y potencia. Por otro lado, se encuentra la tecnología de níquel-cadmio, la cual como desventaja tiene su uso a altas temperaturas y su toxicidad al medio ambiente.

Al igual que las tecnologías de almacenamiento de plomo, las baterías de flujo redox tienen baja descarga y respuesta rápida, y son utilizadas en almacenamientos de larga duración.

2.1.1. Tecnologías aptas para regulación primaria

De acuerdo con el AMM (2021), con base en el Acuerdo Gubernativo Número 299-98, se define regulación primaria como “la respuesta de los generadores como resultado de la acción de sus reguladores de velocidad ante cambios en la frecuencia del sistema” (p.66).

Los sistemas de almacenamiento especialmente baterías de litio, cadmio níquel y plomo son las más adecuadas técnicamente para ser utilizadas en gestión de la energía, especialmente para reemplazo en punta. Para el control de frecuencia se recomienda la batería de litio, por lo que el almacenamiento más adecuado es el de este elemento, según el Instituto para Sistemas de Energía de la Universidad de Edimburgo y Comisión Nacional de Energía de Chile. (Comisión Nacional de Energía de Chile, 2017).

2.1.2. Tecnologías aptas para regulación secundaria

Al respecto de la regulación secundaria, el AMM (2001) indica en su artículo 8 que el AMM decidirá las unidades que estarán en condiciones de ser habilitadas por él, para brindar el servicio de regulación secundaria de frecuencia. Además, “la reserva correspondiente formará parte de la reserva rodante operativa y será remunerada con esta” (p. 6).

3. NORMATIVA Y CONCEPTOS DE MERCADOS ELÉCTRICOS

El mercado eléctrico guatemalteco tiene definido por medio de las normas de coordinación comercial el marco regulatorio que rige las transacciones de energía en el Mercado Mayorista, emitidas por el Administrador del Mercado Mayorista AMM, las cuales fueron debidamente aprobadas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica y se definen a continuación las que dan sentido a las transacciones a realizar para la inserción de las BESS en Guatemala.

3.1. Oferta firme

De acuerdo con la Norma de Coordinación Comercial No. 2 NCC2 (2001) Resolución No. 216-01, la oferta firme de cada unidad generadora de los participantes productores se define como “la máxima potencia neta capaz de producir, en función de sus características técnicas, su potencia máxima y disponibilidad, teniendo en cuenta las restricciones propias de la central” (p. 1).

La oferta firme es importante para las generadoras renovables puesto que en la actualidad estas cuentan con contratos solamente de energía mas no de potencia, debido a la variabilidad de generación inherente a su materia prima, ya sea viento o sol, que al no ser constantes no puede entregar oferta firme al sistema.

Las distintas tecnologías de generación tienen su propio sistema de cálculo de la oferta firme; puede verse el caso de las unidades térmicas y las unidades que funcionan a base de combustibles renovables, las centrales geotérmicas, se

solicita ya sea el caso un informe o certificado por una empresa especializada en procesos, que indica que cuentan con la infraestructura y disponibilidad del combustible para generar.

Las centrales geotérmicas hacen un cálculo del requerimiento térmico necesario para generar, y deben fundamentar con una probabilidad de exceder la misma en un 95 %.

En el caso de las centrales eólicas se deben realizar estudios de viento de por lo menos cinco años para sostener una capacidad de generación, además de tomar en cuenta los periodos de tiempo en los que no existe generación por pérdida de viento en la programación diaria.

Las centrales hidráulicas determinan su oferta firme usando como base las etapas de la programación de largo plazo; se toman cinco bloques los que muestran la curva de carga del sistema, usando información histórica de registros hidrológicos o estimados por medio simulaciones. De las series se obtienen las diferencias entre las etapas, la diferencia entre la demanda de energía y la de producción hidroeléctrica se denomina requerimiento térmico de la etapa.

3.2. Demanda firme

De acuerdo con la Norma de Coordinación Comercial No. 3 NCC3, la demanda de potencia calculada por el Administrador del Mercado Mayorista, debe ser contratada por cada distribuidor, gran usuario o exportador.

Es la demanda de potencia calculada por el AMM y debe ser contratada por cada distribuidor, gran usuario y exportador para un período del año en curso y el año calendario siguiente.

3.3. Oferta firme eficiente

De acuerdo con la Norma de Coordinación Comercial No. 2 NCC2 (2001) la oferta firme eficiente se define como “la cantidad máxima de potencia de una unidad, central generadora o transacción internacional que puede comprometerse en contratos para cubrir la demanda firme” (p.5). Es importante para la investigación porque junto con la programación de largo plazo (PLP) se puede cubrir la demanda para el año siguiente y el generador ya tiene la capacidad de realizar contratos de venta de potencia a sus clientes en el mercado eléctrico.

Esta se calcula anualmente en conjunto con la programación de largo plazo usando modelos en donde se hacen simulaciones del año estacional, esto con el propósito de hacer una proyección que tenga la capacidad de cubrir la demanda anual; en este modelo econométrico no se utilizan los valores de fallas ni generación forzada para servicios complementarios. Se utilizan dos años de estudios y los contratos firmes del mercado eléctrico regional, que hayan usado como base el año estacional y los contratos firmes de importación y exportación con países no miembros del MER.

3.4. Potencia total comprometida

De acuerdo con la Norma de Coordinación Comercial No. 3 NCC3 (2001) “el participante productor compromete la sumatoria de la potencia en contratos de abastecimiento para cubrir demanda firme, más la potencia que vende en contratos de respaldo de potencia que utiliza para respaldar exportaciones” (p.2).

Este concepto es importante para el presente trabajo, ya que respalda la necesidad de obtener contratos de potencia para las centrales generadoras renovables o como un sistema individual de almacenamiento de energía.

3.5. Oferta firme disponible total

De acuerdo con la Norma de Coordinación Comercial No. 3 NCC3 (2001) la suma de la oferta firme disponible de sus unidades generadoras tiene asignada oferta para cubrir demanda firme. La oferta firme disponible total indica el valor de oferta que el generador tiene asignada en cada una de sus unidades generadoras, las cuales se encuentran contratadas como reserva de potencia, respaldo de potencia y potencia disponible para sus unidades que no se encuentran asignadas a ningún contrato y que fueron utilizadas por un tiempo menor a una hora a solicitud del AMM.

3.6. Precio de oportunidad de la energía

De acuerdo con la Norma de Coordinación Comercial No. 4 NCC4 (2001) el valor del costo marginal de corto plazo de la energía en cada hora se define como “el costo en que incurre el sistema eléctrico para suministrar un kilovatio-hora (KWh) adicional de energía, a un determinado nivel de demanda de potencia, y considerando el parque de generación y transmisión efectivamente disponible” (p.1).

El precio de oportunidad de energía se establece por medio del AMM aplicando la metodología de los costos variables de generación, declarada por los participantes del mercado eléctrico.

3.7. Reserva rodante regulante

De acuerdo con la Norma de Coordinación Comercial No. 8 NCC8 (2001) “la reserva rodante regulante es la porción de la capacidad de una unidad generadora que se encuentra en sincronismo con el sistema de potencia; sin embargo, no se encuentra asignada a la producción de energía, sino que su función primordial es estar disponible en la regulación primaria y otros requerimientos operativos.

La magnitud de esta reserva es de 3 % de la generación por hora para cada unidad; se debe calcular cada hora sumando a la potencia disponible en reserva rodante regulante; el neteo que se debe realizar debe ser realizado por cada generador.

En el caso que la reserva rodante regulante sea insuficiente para la programación, el AMM cobrará a los participantes generadores con saldos negativos a pagar a los generadores con saldos positivos, distribuyéndolo entre los participantes consumidores para entregar la energía consumida.

3.8. Reserva rodante operativa

La reserva rodante operativa es la porción de la capacidad de una unidad generadora que se encuentra en sincronismo con el sistema de potencia; sin embargo, no se encuentra asignada a la producción de energía sino su función primordial es estar disponible en la regulación secundaria y otros requerimientos operativos.

La reserva rodante operativa es adicional a la reserva rodante regulante y debe ser asignada por el AMM, según criterios técnicos y económicos. Esta

entrega de servicio debe tener estándares por cumplir, los cuales son establecidos por el AMM.

El pago por reserva rodante operativa debe ser efectuado proporcionalmente al consumo por hora y ser remunerada por el participante de mercado que requiera de la misma.

3.9. Integración de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica BESS en la matriz energética internacional

Los sistemas de almacenamiento a nivel internacional tienen un camino recorrido; en varios países se ha logrado su integración a los sistemas eléctricos nacionales. Esto ha ocurrido cuando se tienen las herramientas y las regulaciones para prestar los servicios, así como cuando se recibe una remuneración y se ha creado el marco regulador específico de entrega de energía y potencia. Luego, al utilizar las redes de transmisión, se han creado programas de retiro de carga o inyección de carga, según sea necesario.

El ente operador de cada país es responsable de mantener la estabilidad, disponibilidad de la energía y potencia integrando a los sistemas eléctricos las energías renovables no convencionales. De igual manera, los sistemas de almacenamiento deben también ser incluidos como un agente nuevo (Comisión Nacional de Energía de Chile, 2017).

La integración de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica a nivel internacional ha llevado un proceso debido a la búsqueda de mejorar el uso de las energías renovables, además de haber facilitado las políticas energéticas nacionales.

3.9.1. Experiencias internacionales con BESS

Según Montezuma (2014) Chile ha creado iniciativas de ley a favor de reducir las emisiones de CO₂, aumentar la matriz energética renovable y además, un gran potencial eólico, solar y geotérmico. Esta legislación ha permitido la aprobación e instalación de proyectos de energía eólica y fotovoltaica. Cabe mencionar que, las condiciones atmosféricas de Chile requieren de muchas mediciones de índices solares y de vientos; este es el primer paso que debe darse cuando se realicen dichos proyectos.

A pesar de los distintos retos existentes por la variabilidad de fuentes de energía, hay diversos parques eólicos y fotovoltaicos, por lo que los sistemas de almacenamiento son la opción que ha logrado dar una estabilidad a las energías renovables permitiendo su utilización a gran escala. Así mismo, se indica que las BESS en Suiza, China, Japón y los Estados Unidos son utilizadas mayormente para el bombeo hidráulico. En Japón, particularmente, se tienen instalados sistemas de almacenamiento con tecnología de sulfuro de sodio.

Por otra parte, en España ha servido para mejorar la seguridad y estabilidad del sistema, siendo la mejor opción evaluada después de analizar otros escenarios, tales como conexiones entre países y sistemas de almacenamiento térmicos, por ejemplo. Esto deriva en el sistema de almacenamiento térmico Gemasolar, que es un concentrador de solar de potencia CSP que almacena energía, utilizando para este fin sales fundidas.

Según Montezuma (2014) “Puerto Rico instaló en 1999 el primer BESS diseñado para reserva en giro, luego fue utilizado para regulación de frecuencia y voltaje, reduciendo su tiempo de vida útil” (p.22).

Estados Unidos ha instalado varios tipos de tecnologías BESS para almacenar uno de ellos energía magnética, variedades de UPS de la banca, servidores, y diversos consumidores de la red. Se plantea el uso de las BESS como una excelente alternativa en la reserva primaria y secundaria, utilizando la tecnología de baterías de litio, puesto que entregan energía almacenada durante un período de tiempo de 15 a 20 minutos.

3.9.2. Experiencias regionales con BESS

En la región centroamericana, hasta el año 2020 no se contaba con experiencias regionales con BESS. Actualmente, en El Salvador se cuenta ya con el primer sistema de almacenamiento en baterías de litio en la generadora Capella Solar con una capacidad de 3,3 MWh, según indica personal de Neoen. Para aplicaciones de regulación primaria de frecuencia, se encuentran en evaluación para Nicaragua y Honduras, para los parques eólicos existentes. En estos casos, estos países reportan que no cuentan con reserva rodante rápida en sus plantas de generación existentes. Esto los lleva a hacer un análisis de la aplicación de las BESS en sus sistemas interconectados.

Un punto importante que debe tomarse en cuenta es que aún no se contempla cómo serían remunerados y regulados los sistemas de almacenamiento, aun cuando el potencial de la ejecución de este tipo de proyectos es importante, pues existen esfuerzos para proyectos mini redes con capacidades de almacenamiento bajas. En estos casos, para suplir las deficiencias en calidad de energía que existen en los sistemas, específicamente para el tema de microcortes.

Estos mismos deben ser tomados en cuenta para los grandes usuarios, en donde los procesos de producción se ven afectados por transitorios y

microcortes. Esto derivado de que el marco regulatorio guatemalteco únicamente contempla indicadores y penalizaciones a interrupciones mayores a 3 minutos.

El criterio homologado en la región es que la integración de las BESS comienza a hacer presencia en la región centroamericana, con un impacto positivo a los sistemas eléctricos en donde se ven aplicados.

3.10. Marco regulatorio de las BESS

El marco regulatorio de las BESS, siendo sistemas que se deben integrar a los marcos regulatorios, comienza al definir los sistemas de almacenamiento con una dualidad. Esto le permite almacenar energía del red eléctrica o generadores renovables- para poder luego inyectarla de nuevo a la red para su utilización.

Después de la definición de los sistemas de almacenamiento se debe tomar en cuenta que el operador defina, según el caso de Guatemala en la Ley General de Electricidad, cómo deben ser los procedimientos para efectuar operaciones dentro del Sistema Nacional Interconectado, ya sea de inyección de energía a la red, como de almacenamiento. Estas deben ser las coordinaciones por realizar según tipo de tecnología, tiempo de reacción, criterios técnicos y aplicaciones.

También es importante tener las normas técnicas correspondientes a los equipos y sistemas de distintas tecnologías, sistemas de protecciones, ingreso a la red y tiempos de respuesta al inyectar energía a la red e integrarse el sistema, y reaccionar ante cambios de frecuencia.

El sistema de almacenamiento como agente no se encuentra normado ni incluido en el listado determinado por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, tampoco existe una regulación que las incluya en la Ley General de Electricidad.

3.10.1. Legislación internacional y su aplicación

La legislación internacional se ha ajustado a las necesidades de cada país con los temas de almacenamiento; a continuación, se hace un desglose por país y sus aplicaciones según la Escuela Politécnica Federal de Lusane (2016).

- En Japón se han enfocado a innovación tecnológica y han dado un subsidio a la instalación de baterías; cuentan con 29 GW de almacenamiento.
- Los Estados Unidos cuenta con 32 GW de almacenamiento; se han enfocado en la gestión temporal y arbitraje; potencia de punta y control de frecuencia.
- China cuenta con 32 GW de almacenamiento con meta para el 2020 de 50 GW de almacenamiento; se aplican en gestión temporal y arbitraje, potencia de punta y control de frecuencia.
- El Reino Unido cuenta con 3.6 GW de almacenamiento, con enfoque en respuesta de frecuencia ultra rápida.
- Italia cuenta con 7.7 GW de almacenamiento, con aumento de la demanda en punto.
- Alemania cuenta con 12.6 GW de almacenamiento, de los cuales 1,371 MW son baterías con incentivos en desarrollo y una proyección debido a la transición energética de una matriz energética 80 % renovable.

- España cuenta con 9.1 GW de almacenamiento y con sistemas aislados con 100 % de generación en centrales renovables; su aplicación, en suministro de punta.
- Suiza cuenta con 6.4 GW de almacenamiento con aplicación en transacciones internacionales.
- Noruega cuenta con 2.4 GW de almacenamiento aplicado a un almacenamiento estacional.

3.10.2. Normativo regional de las BESS

Actualmente, no se cuenta con ninguna normativa a nivel guatemalteco, ni a nivel regional, debido a que la integración de las BESS aún se encuentra incipiente. En Guatemala no existe límite de integración para las centrales renovables en el Sistema Nacional Interconectado; además, siendo un país signatario del Protocolo de Kyoto y según el objetivo de desarrollo sostenible de la ONU, específicamente el número 7, en donde la energía accesible y renovable es la meta para que el mismo sea estable y eficiente, se espera un crecimiento de las tecnologías renovables debido además a la disminución de costos asociados a su fabricación e instalación. Además de requerirse reservas de energía adicionales, según estudios del Banco Mundial.

Es importante observar que las políticas energéticas deben ir de la mano del análisis de las tendencias tecnológicas mundiales para lograr mejorar el desarrollo industrial de Guatemala y la región.

Según el perfil energético de Guatemala se debe reducir la dependencia de hidrocarburos lo que inclina a una mejora en las centrales renovables, la cual

entregaría energía a bajo costo; “si se incluyera a las BESS se evitaría la intermitencia, permitiendo la disponibilidad necesaria al usuario final” (Universidad Rafael Landívar, 2019, p. 187).


3.11. Marco operativo de las BESS

En Guatemala, el Administrador del Mercado Mayorista es el operador del Sistema Nacional Interconectado y dentro de sus funciones se encuentran la de proponer al regulador, en este caso la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, las normas o adecuaciones a las normas como el caso de la inserción de las BESS.

Las BESS a su vez deberían estar sujetas al despacho económico y a la coordinación de la operación regida por el AMM, así como lo hace cada uno de los agentes de mercado, en el caso de que las BESS se encuentren como una nueva figura de mercado, NGR.

De las propuestas para las políticas energéticas en el sector energía, puede verse en la tabla siguiente el desarrollo que se espera obtener para el desarrollo con las bajas emisiones, con puntos importantes para aumentar la matriz energética a mayormente renovable.

Tabla I. **Desarrollo de energía con bajas emisiones**

| | |
|--|--|
|  <p>DESARROLLO CON BAJAS EMISIONES [ENERGÍA]</p> | INCREMENTAR EL POTENCIAL DE LAS HIDROELÉCTRICAS EXISTENTES |
| | INCREMENTAR LA GENERACIÓN SOLAR |
| | INCREMENTAR LA GENERACIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA |
| | REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS A TRAVÉS DE ENERGÍA RENOVABLE |
| | DESARROLLO DE MINI Y MICRO HIDROELÉCTRICAS |
| | EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICACIONES EXISTENTES |
| | ESTÁNDARES DE ETIQUETADO PARA ELECTRODOMÉSTICOS |
| | AUDITORÍAS ENERGÉTICAS |
| | ESTUFAS DE BAJO CONSUMO DE LEÑA CAMBIO A TECNOLOGÍA LED DEL SISTEMA DE ALUMBRADO PÚBLICO |
| | EFICIENCIA ENERGÉTICA EN NUEVAS CONSTRUCCIONES |

Fuente: Ministerio de Energía y Minas. *Plan de Expansión del Sistema de Generación y Transporte 2020- 2034*. Consultado el 12 de octubre de 2020. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2020/01/Plan%20de%20Expansio%CC%81n%20del%20Sistema%20de%20Generacio%CC%81n%20y%20Transporte%202020-2034.pdf>.

3.11.1. **Modelos de negocios para las BESS y su participación en servicios complementarios**

Los modelos de negocios para las BESS pueden encontrarse por medio de múltiples aplicaciones que actualmente se están utilizando a nivel internacional. Estas ya se encuentran en diferentes fases, según interés de cada país.

En Guatemala, para alcanzar la reducción de costos de las líneas base y lograr que la matriz energética guatemalteca sea mayormente renovable, es importante la implementación de las BESS. Con esto, se puede optar a contratos de oferta firme que permitan una óptima utilización de las centrales generadoras renovables, no solamente para contratos de energía sino también para contratos de potencia.

Según las experiencias internacionales, los servicios complementarios se han visto beneficiados para ofrecer mejores ingresos en los mercados que se encuentran liberados.

Se ha demostrado que, es posible lograr la gestión estacional de la energía en el área de generación para la transmisión y distribución en los servicios complementarios. Esto por medio de la regulación de frecuencia, regulación de voltaje y la recuperación de los servicios.

3.12. Las BESS y las generadoras renovables

La inserción de las BESS con las generadoras renovables, ya sean generadoras eólicas o fotovoltaicas, es una fortaleza que permitirá en primer lugar tener reservas de potencia para obtener contratos de oferta firme a estas generadoras que en la actualidad obtienen solamente contratos de energía debido a la intermitencia de su generación.

La regulación primaria de frecuencia se activa únicamente ante variaciones de frecuencia del sistema. Esto ocurre cuando se pierde una cantidad de generación importante y el desbalance que deja entre carga y generación hace variar la frecuencia del sistema.

La regulación primaria de frecuencia tiene su campo de acción bien definido, el cual actúa durante los primeros segundos de variación de frecuencia; minutos después debe reestablecerse la reserva empleada para mantener la disponibilidad en caso de existir un nuevo evento de baja o alta frecuencia y mantener la estabilidad del sistema.

3.13. Las BESS como participantes de mercado

La inserción de las BESS como participante del mercado permite el abastecimiento de la reserva rodante regulante y la operativa al sistema, teniendo la versatilidad de participar como una figura nueva en el mercado eléctrico, y como una NGR, figura de recurso no generador; siendo esta una figura que puede estar disponible para entrega al mercado eléctrico que mejoraría el nivel de regulación y frecuencia, con la dualidad de ser tanto un generador como una demanda al sistema.

Las BESS tienen la capacidad de entregar oferta firme a centrales solares y eólicas por medio de la gestión de energía REM; en el caso de las generadoras solares reservan energía generada en el transcurso del día y la entregan en horas de demanda máxima.

En el caso de las generadoras eólicas debe evaluarse la disponibilidad del recurso viento para poder almacenar energía y entregarla el mismo día en las horas de demanda máxima. Existen, así mismo, otras tecnologías en donde la utilización de las BESS puede mejorar su oferta firme existente; este sería el caso en donde no es necesaria la creación de una nueva figura, pues sería parte de una central generadora ya existente en el mercado eléctrico.

Para el modelo en donde se encuentra disponible el servicio de reserva, las BESS pueden ser parte de una central generadora existente o hacerlo por sí sola como la nueva figura NGR, pues en este caso no es un generador ni demanda, sino una figura con dualidad de funciones que necesita recargarse por medio de energía de la red, para poder entregarla según un tiempo determinado de horas, pudiendo ser de una o varias horas después, según lo determinado entre las partes interesadas del sistema.

4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Tipo y diseño de la investigación

El tema investigado se está implementando a nivel internacional y se evaluó su utilización en el sistema eléctrico guatemalteco, pues es una investigación no experimental con un enfoque mixto; es exploratorio porque se determinó durante la fase documental que no existe ninguna norma o regulación para la inserción de las BESS.

Las variables son observables y no manipulables, por lo que se determina que se trata de una investigación transeccional debido a que, se realiza en un periodo determinado de tiempo y a la vez correlacional. Se utilizó la técnica de investigación documental, entrevista estructurada y libre. Es una investigación mixta, pues se utilizaron métodos cualitativos y cuantitativos para poder analizar los diferentes tipos de tecnologías de almacenamiento y su comportamiento aplicable al sistema eléctrico guatemalteco.

Se realizó un protocolo de requerimientos que deben cumplirse en relación con los modelos de negocio para integrarlos al Sistema Nacional Interconectado. Además, se utilizó un plan de muestreo por medio de encuestas de Google Forms para realizar la comparación de los datos.

Al inicio de la recolección de datos en campo, comenzó la pandemia ocasionada por la enfermedad Coronavirus Covid-19, lo que limitó la movilización al decretarse el toque de queda en el país y ordenándose un distanciamiento social a nivel mundial. Esta situación ocasiono retrasos en la obtención de datos,

puesto que los individuos que conformaron la muestra al inicio de la pandemia, al estar trabajando en *home office* necesitaron un tiempo para ajustarse al cambio, lo que evitó obtener tiempo para realizar las entrevistas; aunque vale la pena mencionar que el internet facilitó el acercamiento, luego de esta etapa de adaptación de las personas, puesto que las entrevistas se han realizado por este medio; la recolección de datos por medio de la encuesta se hizo por internet y se obtuvo acceso a recopilación de datos de otros países como México, El Salvador, Australia, Estados Unidos y Alemania.

Se planteó un escenario en donde junto con el plan de expansión y la política energética del Ministerio de Energía y Minas y la información de la capacidad instalada y efectiva, se replantea desplazar las tecnologías con costos mayores en el SNI, para ser sustituidas por sistemas de almacenamiento, en un escenario conservador y así determinar la viabilidad de su ingreso al sistema; el escenario se planteó en época seca y en época lluviosa; puesto que el sistema de generación se modula en forma diferente.

4.1.1. Unidad de análisis

La población en estudio fue el Sistema Nacional Interconectado, en dos meses del año, en época seca y lluviosa; la que indica cómo sería la participación de las BESS en los mercados eléctricos como complemento de las generadoras renovables y su participación como una nueva figura ante el mercado eléctrico en la regulación secundaria de frecuencia.

4.1.2. Variables

Se utilizaron variables observables, las cuales se describen a continuación:

- Tipos de sistemas de almacenamiento: corresponden a los tipos de tecnologías utilizados en los sistemas de almacenamiento. La variable es de tipo nominal policotómica.
- Países con participación en legislación: corresponde a los países que ya cuentan con legislación de las BESS. La variable es de tipo nominal policotómica.
- Participación en mercados de servicios complementarios: corresponde a la participación de las BESS en mercados eléctricos, en un modelo de negocio específico. La variable es de tipo nominal policotómica.
- Posdespachos mensuales: en época seca el mes de marzo y en época lluviosa el mes de septiembre del AMM en el año 2020: la variable es nominal policotómica.

El proyecto se desarrolló a través de las fases siguientes:

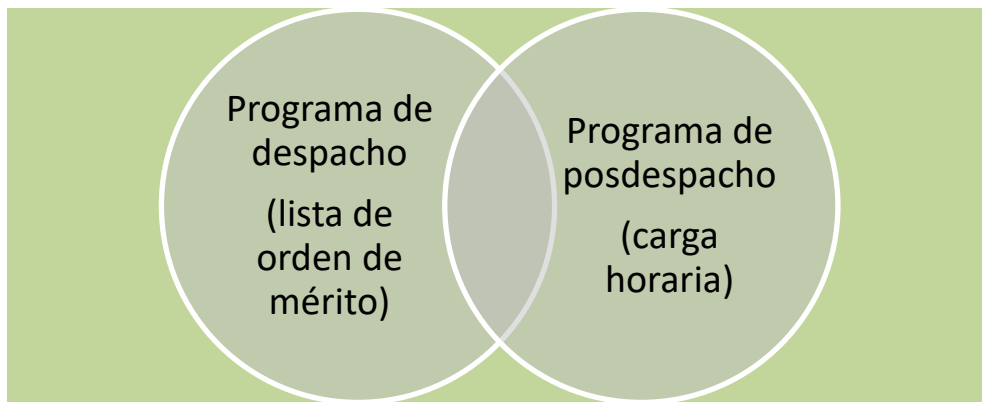
- Fase 1: revisión documental
 - Se realizó la revisión de la documentación y consulta de información en libros, tesis, documentación estatal pública nacional, normativa y de formación internacional para realizar una comparación de los distintos tipos de materiales y su funcionamiento en las aplicaciones requeridas por el sistema nacional interconectado. Así mismo, se revisó la documentación encontrada sobre las experiencias internacionales, en donde ya se encuentra la regulación implantada y se ha logrado la integración de las nuevas tecnologías.

- Se efectuó una investigación documental de las normas técnicas de comercialización del Administrador del Mercado Mayorista, en donde se pudieron documentar los conceptos de mercados eléctricos, para tener una base y poder determinar qué parámetros son los necesarios para facilitar y adecuar la inserción de los modelos de negocio al Sistema Nacional Interconectado.
- Se realizó una investigación documental relacionada con la reglamentación, normativas vigentes y planes de expansión de la generación del ente rector: el Ministerio de Energía y Minas.
- Se llevaron a cabo las entrevistas libres y semiestructuradas con expertos en el tema y con fabricantes vía Web, en donde se pudieron documentar desafíos y retos a nivel técnico y de regulación para la implementación de los diferentes modelos de negocio.
- Se realizaron tres tipos de encuestas de preguntas abiertas y cerradas, con ingenieros de los diferentes sectores eléctricos; se tomaron en cuenta los sectores: regulatorio, operador, transporte, comercializadores, distribuidoras y empresas privadas en Guatemala.
- Se revisaron los planes de posdespacho y despacho del Administrador del Mercado Mayorista, de los meses más representativos del año estacional, como marzo y septiembre del 2020, con una recolección de datos de 38 mil mediciones por medio de Excel, para identificar cuáles son las máquinas más despachadas durante esas épocas del año e identificar el costo marginal de generación de estas.

- Fase 2: plan de muestreo
 - Se realizó una evaluación entre las diferentes tecnologías de sistemas de almacenamiento y sus aplicaciones en el Sistema Nacional Interconectado. De igual manera, se hizo una comparación de las experiencias internacionales en los países en donde ya se encuentran distintos modelos de negocio de los sistemas de almacenamiento en operación, en donde ya existe la regulación y se ha alcanzado la integración de las nuevas tecnologías.
 - Se plantearon dos escenarios en donde se realiza un ejercicio de desplazamiento de las generadoras de energía más caras, tomando como base su costo variable de generación en época seca y lluviosa, para plantear el cambio en el tipo de generación por energía renovable, entregándola en los sistemas de almacenamiento.
- Fase 3: diseño de instrumentos de recolección de información:
 - En esta fase, se realizaron tres cuestionarios con los requerimientos necesarios de mercados eléctricos para implementar las tecnologías, lecciones aprendidas, retos y desafíos de las distintas tecnologías por integrar al Sistema Nacional Interconectado. Este incluye tanto aspectos técnicos como regulatorios, para identificar los modelos de negocio aplicables; estos cuestionarios se enfocaron a diferentes grupos, pues uno era exclusivo para Guatemala, y otro para países en donde ya se encuentra por lo menos alguno de los modelos de negocio. (Este último también traducido al idioma inglés).

- Se realizó una recolección de datos con entrevistas semiestructuradas y libres con información relevante técnica de mercados eléctricos, a profesionales de diferentes sectores en donde se ven involucrados los sistemas de almacenamiento y también en donde pueden tener incidencia para sus diferentes servicios.
- Se recolectaron datos de los meses de marzo y septiembre de 2020 con una comparación de los programas de despachos y el programa de posdespachos del Administrador del Mercado Mayorista, con las bandas máxima, media y mínima, tomando en consideración para el estudio la banda máxima.

Figura 1. Comparación de despacho y posdespacho



Fuente: elaboración propia.

- Fase 4: organización de la información y análisis de resultados
 - En esta fase se llevó a cabo el registro y compilación de los resultados obtenidos del análisis de las encuestas, su clasificación según criterios técnicos y regulatorios; así también se reenforzó el desarrollo de la

investigación debido a cambios ocurridos en la línea de tiempo que permitieron mejorar el desarrollo de la investigación; los resultados de las evaluaciones y aplicaciones según su desempeño técnico y operativo en el Sistema Nacional Interconectado.

- Se analizaron por medio del programa Microsoft Excel, los datos puntuales medidos cada hora cada día durante el mes de marzo y los del mes de septiembre, para reconocer cuáles son las 10 plantas más caras según la comparación de datos entre el despacho y el posdespacho publicado por el Administrador del Mercado Mayorista obteniendo resultados de las 10 plantas generadoras con costos variables mayores, las cuales pueden ser desplazadas por la energía almacenada en los sistemas de almacenamiento generados por medio de energías renovables.
- Resultados esperados:
 - Los resultados esperados en esta investigación mostraron los modelos de negocio que se están aplicando a niveles internacionales y sus diferentes retos y soluciones a los mismos; se encontraron los modelos de negocio aplicables al Sistema Nacional Interconectado guatemalteco, así como los retos a nivel de regulación, operación y legislación, inherentes al mercado eléctrico nacional.
 - La técnica utilizada para la obtención de información y evaluación de tecnologías fue el análisis documental y análisis comparativo de datos, aproximadamente para cada uno de los dos meses analizados. Los protocolos diseñados, encuestas virtuales y las entrevistas libres y

semiestructuradas brindaron la información necesaria para ser interpretadas según los objetivos específicos planteados.

- La técnica de investigación utilizada fue la creación de escenarios: uno con baterías y otro sin baterías; así como el margen de oportunidad de inserción según el costo variable de generación y una simulación de escenario con inserción de BESS en el sistema, y su comparación con la misma sin BESS, en un día normal de carga.

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados producidos se describen a continuación; se investigó la utilización de los diferentes tipos de tecnologías BESS a utilizar según el análisis cualitativo de las entrevistas realizadas a empresas que tienen casos de éxito; se realizaron en una etapa.

En cumplimiento con el segundo objetivo se determinaron los factores precisos en la regulación de mercados para la inserción de las BESS en los mercados eléctricos regionales, con experiencias de casos de éxito, así como los retos que enfrentaría el sistema nacional al integrar los sistemas de almacenamiento.

Se identificaron los posibles modelos de negocio aplicables según los casos de éxito, sus retos y oportunidades, lecciones aprendidas para su aplicación en el Sistema Nacional Interconectado.

Las entrevistas y las encuestas se llevaron a cabo por medios virtuales debido al distanciamiento social que se ha requerido a partir de marzo de 2020 por la pandemia del Covid-19; se lograron algunas ventajas como mayor acceso a un *focus group* especializado en temas regulatorios y de gestión de mercados eléctricos, sin dejar a un lado el regulador y el operador del sistema, así como los fabricantes.

La comparación de datos se realizó utilizando el programa Excel de Microsoft, consiguiendo los valores de las máquinas más utilizadas en los dos

meses estacionales y el porcentaje de las veces que ingresaron al Sistema nacional interconectado, con los valores de moda, media y mediana.

La base de datos recopilada expuso información respecto del desempeño requerido, pues indica cuáles son las diez plantas con mayores porcentajes de despacho en cada mes y su costo variable de generación por hora, por día y durante un mes en época lluviosa y seca, para ser utilizadas por un sistema de almacenamiento con costo variable de generación menor al de las máquinas despachadas según los históricos.

Se realizó un análisis comparativo simulando la inclusión de un sistema de almacenamiento con capacidad de 70 MWh para un día de despacho, en donde se compra energía para cargar el sistema de almacenamiento al costo bajo según el precio de oportunidad y se vende en el horario de demanda máxima con una diferencia a favor de las BESS de US\$ 26.66 por MWh sobre el precio de POE en un día sin inclusión de las mismas, generando una disminución de costos y el aumento de utilización de energía renovable, porque la energía entregada provenía de una generadora renovable .

Análisis documental: en esta etapa se consultó la documentación recolectada y por medio del análisis y observación se compararon para obtener el material que permita realizar los protocolos de investigación. Se realizó una primera lectura y los conceptos incluidos en la misma, con lo que se diseñó una tabla con información basada en ejes básicos, organizados por unidades de análisis del texto.

5.1. Cuadro lógico de resultados

En este cuadro se resume el cumplimiento de los objetivos planteados, los cuales están concatenados con las preguntas de investigación y los resultados obtenidos.

5.2. Análisis de la inserción de los sistemas de almacenamientos BESS a utilizar en el Sistema Nacional Interconectado según experiencias internacionales

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en relación con la inserción de sistemas de almacenamiento BESS al Sistema Nacional Interconectado

Tabla II. Cuadro lógico general

| Pregunta | Objetivo | Resultados |
|---|--|--|
| ¿Qué aspectos se pueden tomar en cuenta para la utilización de las tecnologías de BESS? | Realizar un análisis de la utilización de los sistemas de almacenamiento de energía en baterías BESS y sus posibles modelos de negocio en el Sistema Nacional Interconectado guatemalteco. | La tecnología utilizada en cada aplicación es la batería de iones de litio, por su versatilidad y mejor capacidad de respuesta. Tesla no tiene supresión de incendios. Su sistema de manejo o BMS permite modificar los parámetros según la solicitud del operador del sistema. Los costos son directamente proporcionales al número de ciclos. Los equipos a utilizar en la región deben estar parametrizados para trabajar con 60 Hz, y no con 50 Hz.. |

Fuente: elaboración propia.

5.3. Factores determinantes en la regulación de mercados para la inserción de las BESS en los mercados eléctricos regionales

En la tabla siguiente se dan a conocer los factores determinantes dentro del proceso de regulación de mercados en los cuales se hará la inserción de las BESS.

Tabla III. Cuadro lógico específico

| Pregunta | Objetivo | Resultados |
|--|---|---|
| ¿Qué retos encontraron en temas regulatorios en la región para la inserción de las tecnologías BESS? | Identificar qué factores son los determinantes para la inserción de BESS en los mercados eléctricos regionales y el guatemalteco. | Utilizando la aplicación detrás del medidor no fueron necesarios los ajustes regulatorios. Es necesario trabajar de cerca con el operador para hacer los ajustes de parámetros. No existe la figura sistema de almacenamiento en la regulación. No existe un modelo para la remuneración de la entrega del servicio de las BESS. Se debieron hacer modificaciones a los mercados eléctricos como el caso de Australia, en tiempos cortos de medición. |

Fuente: elaboración propia.

5.4. Modelos de negocio existentes en países con casos de éxito y su aplicación en Guatemala

En la tabla siguiente se describen los modelos de negocio exitosos en otros países, que pueden ser aplicados en Guatemala.

Tabla IV. Cuadro lógico específico de inserción de las BESS

| Pregunta | Objetivo | Resultados |
|--|---|--|
| ¿Qué modelos de negocio aplican al sistema eléctrico guatemalteco utilizando los sistemas de almacenamiento como opción? | Identificar qué modelos de negocio son los más adecuados para la inserción BESS en el mercado eléctrico guatemalteco. | <p>Inserción de BESS como almacenamiento para reservas.</p> <p>BESS para control de frecuencia.</p> <p>Participación de BESS en reserva rodante operativa.</p> <p>Inserción de BESS antes y después del medidor como dos figuras diferentes. En la optimización de reserva de cada país.</p> <p>BESS en conjunto con generación distribuida.</p> <p>Almacenamiento en sistemas de transmisión.</p> <p>Servicios complementarios.</p> |

Fuente: elaboración propia.

5.5. Resultados obtenidos de la encuesta

En la investigación para la inserción de los sistemas de almacenamiento en el Sistema Nacional Interconectado y sus modelos de negocio se planteó realizar una encuesta para la obtención de datos.

La técnica de recolección de datos utilizada fue una encuesta digital dirigida a una muestra de ingenieros electricistas que forman parte de las diferentes áreas del subsector eléctrico guatemalteco, dando así diferentes enfoques y puntos de vista al tema a investigar, así como ingenieros de México, Estados Unidos, Alemania y El Salvador, en donde ya existen casos de éxito, y se analizó la inserción de las BESS en nuevos modelos de negocio, además de los ya existentes.

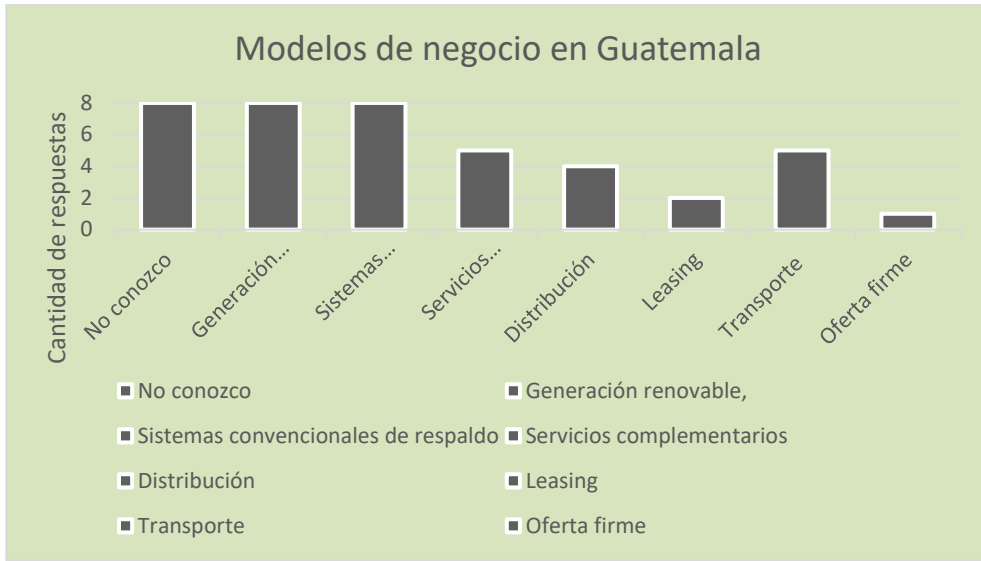
La muestra utilizada para llegar a la obtención del objetivo corresponde a los siguientes sectores:

- Transporte
- Generación
- Distribución
- Fabricantes
- Regulador
- Operador
- Contratistas

En esta encuesta se definieron preguntas que debían dar a conocer el conocimiento o no de los sistemas de almacenamiento BESS; los retos y dificultades a los que se enfrentarían al momento de su inserción en Guatemala, lecciones aprendidas, tipos de tecnologías utilizadas y puntos de mejora.

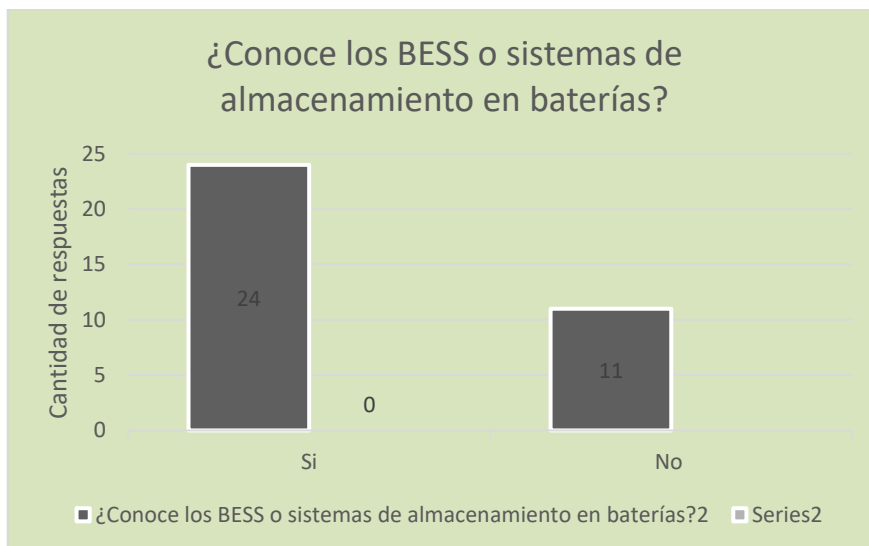
La definición de preguntas de la encuesta y las muestras fueron tomadas en los meses de junio a septiembre del 2020 durante la pandemia, y se cerró la toma de datos en septiembre.

Figura 2. Modelos de negocio



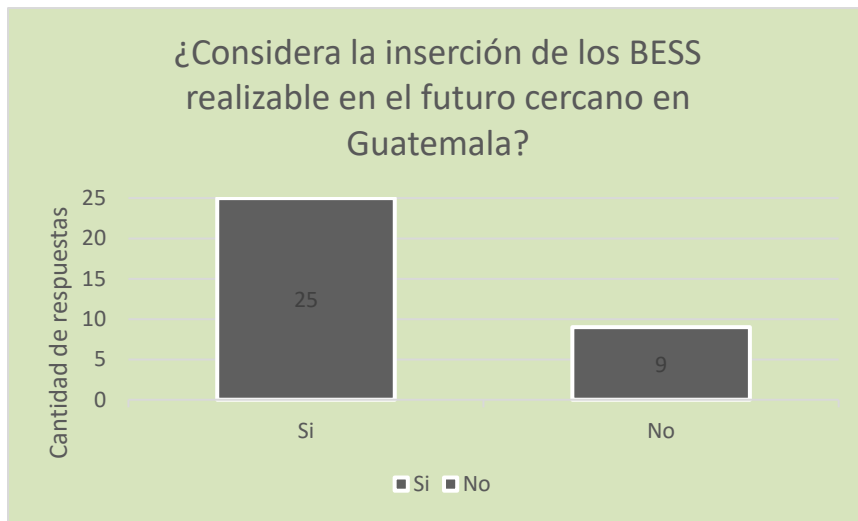
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Conocimiento de las BESS



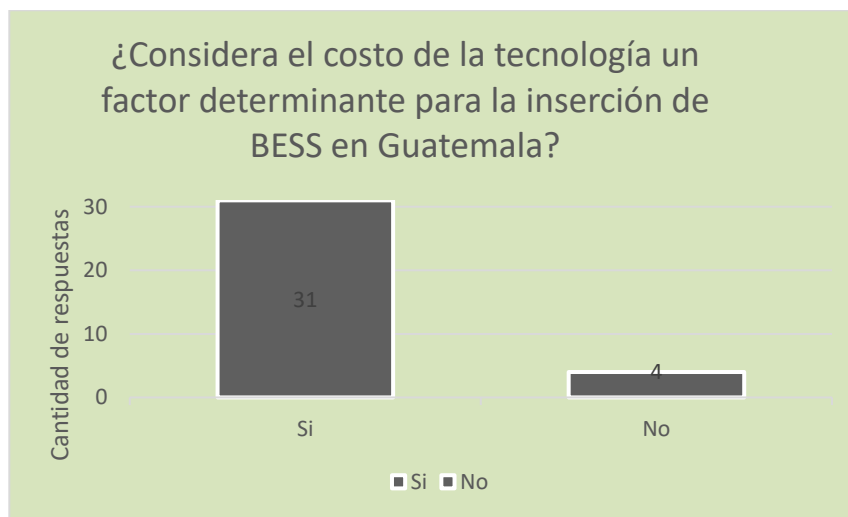
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. **Inserción de las BESS**



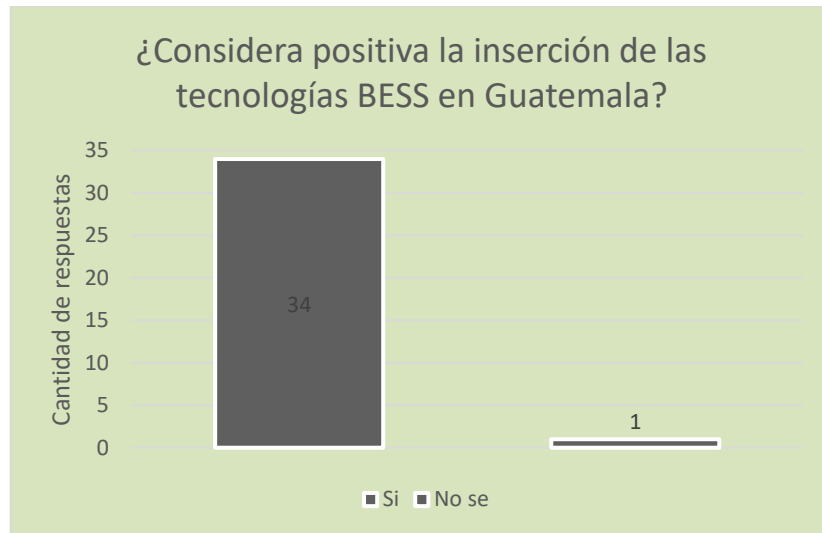
Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **Factor costos**



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Inserción positiva de las BESS**

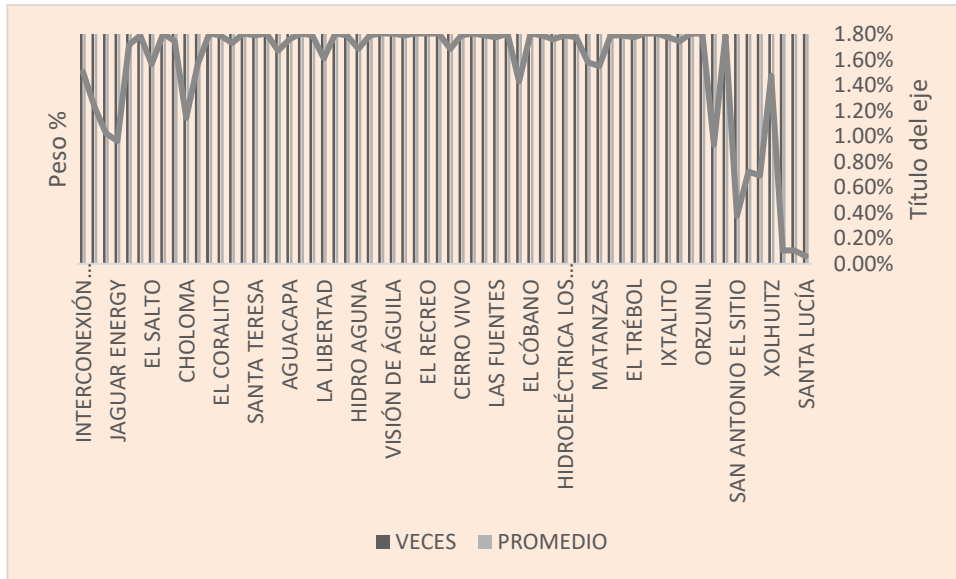


Fuente: elaboración propia.

5.6. **Resultados de escenario comparativo de muestra año estacional 2020**

En las gráficas siguientes se presentan los resultados después de haber realizado la comparación durante el año estacional 2020.

Figura 7. Costo variable de generación, septiembre 2020



Fuente: elaboración propia.

Tabla V. Comportamiento costo variable de generación, septiembre 2020

| | |
|----------------------------|----------|
| Media | 14.56 |
| Error típico | 0.20 |
| Mediana | 10.89 |
| Moda | 21.32 |
| Desviación estándar | 16.06 |
| Coefficiente de asimetría | 16.65 |
| Rango | 3.72 |
| Mínimo | 138.23 |
| Máximo | 1.00 |
| Suma | 139.23 |
| Cuenta | 96576.10 |
| Nivel de confianza (95.0%) | 0.39 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Costo variable de generación, marzo 2020



Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. Comportamiento costo variable de generación, marzo 2020

| | |
|-----------------------------|---------|
| Error típico | 0.20 |
| Mediana | 10.89 |
| Moda | 21.32 |
| Desviación estándar | 16.06 |
| Varianza de la muestra | 257.89 |
| Coefficiente de asimetría | 3.71 |
| Rango | 138.23 |
| Mínimo | 1.00 |
| Máximo | 139.23 |
| Suma | 96576.1 |
| Cuenta | 6633.00 |
| Nivel de confianza (95.0 %) | 0.39 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Resultados de inclusión de BESS 70 MWh al SIN**

| Escenario con BESS de 70 MWh | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|------|--------|--------|-------|----------|
| Pot | Max | AGU-H | REC-H | SJO-C | JEN-C1 | BESS | GEN | DEM | \$ | POE |
| 18:16 | 18:30 | 77.4 | 24.6 | 119 | 66.6 | 20 | 1575.8 | 1675.9 | 38.73 | SAN JOSÉ |
| 18:31 | 18:45 | 77.4 | 24.6 | 112.3 | 65.5 | 20 | 1575.8 | 1673.8 | 38.73 | SAN JOSÉ |
| 18:46 | 19:00 | 77.4 | 24.6 | 106.7 | 65.5 | 20 | 1575.8 | 1672.6 | 38.73 | SAN JOSÉ |
| 19:01 | 19:15 | 77.4 | 24.6 | 68 | 65.5 | 20 | 1575.8 | 1639.8 | 38.21 | EDC-1 |
| 19:16 | 19:30 | 77.4 | 24.6 | 73 | 65.5 | 20 | 1575.8 | 1637.7 | 38.21 | EDC-2 |
| 19:31 | 19:45 | 77.4 | 24.6 | 72.3 | 65.5 | 20 | 1575.8 | 1637.4 | 38.21 | EDC-3 |
| 19:46 | 20:00 | 77.4 | 24.6 | 51.1 | 65.5 | 20 | 1575.8 | 1608.3 | 38.21 | EDC-4 |

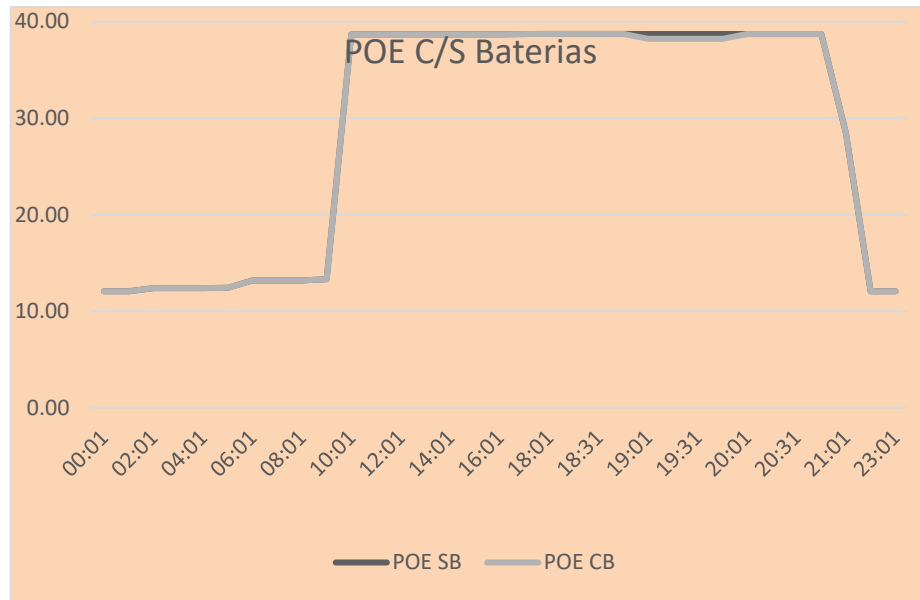
Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Resultados de despacho convencional**

| Escenario con BESS de 70 MWh | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-----------|
| Pot | Max | AGU-H | REC-H | SJO-C | JEN-C1 | GEN | DEM | \$ | POE |
| 18:16 | 18:30 | 77.4 | 24.6 | 119 | 86.6 | 1575.8 | 1675.9 | 38.73 | SAN JOSÉ |
| 18:31 | 18:45 | 77.4 | 24.6 | 112.3 | 76.4 | 1570.8 | 1673.8 | 38.73 | SAN JOSÉ |
| 18:46 | 19:00 | 77.4 | 24.6 | 106.7 | 83.9 | 1572.5 | 1672.6 | 38.73 | SAN JOSÉ |
| 19:01 | 19:15 | 77.4 | 24.6 | 98.5 | 85 | 1569.7 | 1639.8 | 38.72 | ACTUN CAN |
| 19:16 | 19:30 | 77.4 | 24.6 | 96 | 92.5 | 1567.6 | 1637.7 | 38.72 | ACTUN CAN |
| 19:31 | 19:45 | 77.4 | 24.6 | 87.8 | 100 | 1567.3 | 1637.4 | 38.72 | ACTUN CAN |
| 19:46 | 20:00 | 77.4 | 24.6 | 81.8 | 85 | 1538.2 | 1608.3 | 38.72 | ACTUN CAN |

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Variación de la curva de despacho convencional con inserción de BESS**



Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Generación renovable proyectada al 2030**

| Planta | Potencia MW | Recurso |
|--------------|-------------|---------|
| Solar SRO 1 | 30 | PV |
| Solar SRO 2 | 20 | PV |
| Solar SRO 3 | 30 | PV |
| Solar SRO 4 | 20 | PV |
| Solar SRO 5 | 10 | PV |
| Solar SUR 1 | 20 | PV |
| Solar SUR 2 | 50 | PV |
| Solar SUR 3 | 100 | PV |
| Solar SUR 4 | 30 | PV |
| Eólica Jut 1 | 50 | EOL |
| Eólica Jut 2 | 25 | EOL |
| Eólica Jut 3 | 50 | EOL |

Continuación de la tabla IX.

| | | |
|--------------|-----|-----|
| Eólica Jut 4 | 60 | EOL |
| Eólica Jut 5 | 60 | EOL |
| Eólica HUE | 40 | EOL |
| Eólica GUA | 25 | EOL |
| Eólica ESC | 20 | EOL |
| Suma | 640 | |

Fuente: elaboración propia.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir de las entrevistas realizadas al grupo de fabricantes y según el cuadro lógico correspondiente, se presentaron resultados interesantes en donde el tipo de tecnología que se debe utilizar debido a la respuesta rápida de los sistemas de almacenamiento son las baterías de iones de litio por su versatilidad y su mejor capacidad de respuesta, razón por la cual se está utilizando a nivel internacional con casos de éxito; puede verse que los otros tipos de tecnologías utilizados no son relevantes para el estudio.

La importancia de la implementación de un sistema de supresión de incendios identificados brinda una información importante para la seguridad de los sistemas como unidades independientes, así como un sistema complementario de las generaciones intermitentes solar y eólica.

El cuadro lógico muestra que los parámetros que se deben modificar según la solicitud del sistema son para definir entre el grupo de las partes interesadas que serán utilizadas en aplicaciones de regulación de frecuencia con grandes capacidades, pero cortas duraciones. De la misma forma que la duración del sistema de almacenamiento y sus costos son directamente proporcionales a su número de ciclos, repercutiendo en la vida útil y su retorno de inversión.

En los resultados obtenidos resalta la importancia de la regulación y el papel del regulador; se evidencia la necesidad de conocer las partes interesadas del subsector eléctrico, desde la parte regulatoria y operativa, dado que esto daría una transparencia y visibilidad a cada una de ellas, con el fin de mantener la robustez del sistema.

La integración de las BESS sugiere un desafío a los sistemas actuales según lo encontrado en la investigación, pues su comportamiento es diferente a los generadores de energía eléctrica convencionales, por su versatilidad, capacidad de adaptación, cortos tiempos de respuesta y variedad de aplicaciones antes y después del medidor.

Se evidencia la ausencia de la figura almacenamiento de energía, la que requiere su incorporación al mercado eléctrico guatemalteco con mecanismos de planificación a largo plazo, compensación, adquisiciones y luego la integración para adaptar los reglamentos y la metodología tarifaria para remunerar las actividades económicas de las BESS.

Se evidencia la necesidad de crear herramientas financieras y modelos de predicción, y con esto obtener criterios de comparación de eficiencia comparativa y financiera, que al mismo tiempo sea flexible y que vaya evolucionando en el tiempo. Existe la tendencia del desarrollo de microrredes que se encuentren administradas por inteligencia artificial, así como un usuario más activo y consciente del suministro de energía.

Los modelos de negocios que se encontraron en países con casos de éxito han sido varios como control de frecuencia, participación de BESS en reserva rodante operativa y almacenamiento de reservas; en los servicios complementarios y en conjunto, después del medidor con la generación distribuida, además como almacenamiento para líneas de transmisión que suavizan la curva de demanda.

Según el fabricante Neoen, que en su proyecto capella solar en El Salvador se encuentra trabajando como control de frecuencia, así como apoyo para las fallas del sistema y su caso de éxito más emblemático Hornsdale, con 1,600 MW

de reserva que ha dado soporte a fallas, se logró la modificación de los mercados eléctricos de Australia.

Los modelos de negocio viables que se evaluaron para Guatemala son el modelo en el que la BESS actúa como reserva para las generadoras renovables, eólica y solar y la figura de un participante de mercado que puede ser llamado sistema de almacenamiento.

De la comparación de los datos de despacho y posdespacho del AMM se puede determinar que sí existe una oportunidad importante de inserción de los sistemas de almacenamiento, tomando en cuenta que el costo variable de generación de los mismos se encuentra dentro de un rango de los generadores renovables; para esta investigación se tomó el valor de \$1.25, valor promedio entre los generadores eólicos y geotérmicos, determinando según los datos una reducción significativa de costos y aumento de uso de la generación renovable.

CONCLUSIONES

1. Con los resultados obtenidos de la modelación de la inserción de los sistemas de almacenamiento de energía en baterías BESS en el SNI se determinó su viabilidad de inclusión sin perjuicio al desempeño del sistema. Aunado a su factibilidad de ser un nuevo agente participante del mercado eléctrico mayorista o prestando el servicio de complemento a los generadores de energías renovables.
2. Las baterías de iones de litio por su facilidad de instalación, transporte y disponibilidad en el mercado, aunado a su alto rendimiento y soporte de muchos ciclos de descarga, entre otros, es la que mejor se adapta a las condiciones de operación del SNI.
3. Derivado de las irregularidades que se presentan en el SIN y que pueden ser resueltas con la inclusión de las BESS, existe la oportunidad de negocio al instalar estos equipos y cobrar por el servicio que presten.

RECOMENDACIONES

1. El Ministerio de Energía y Minas (MEM) debe evaluar la integración de un nuevo agente en el mercado eléctrico nacional, a efecto de cumplir con las funciones de reserva y regulación de frecuencia o como parte integral de las generadoras de energías renovables.
2. En la Ley General de Electricidad debe incluirse la creación del nuevo agente participante en el mercado mayorista, a efecto le permita fungir como regulador de frecuencia o proveedor de reserva de energía con las responsabilidades y beneficios correspondientes.
3. La Escuela de Estudios de Postgrados de la Facultad de Ingeniería debe continuar con la línea de investigación de la aplicación de inserción de las BESS para los usuarios finales, antes de la medición de la distribuidora.

REFERENCIAS

1. Administrador del Mercado Mayorista (2001). *Norma de Coordinación Comercial No 2. RESOLUCION No. 216-02*. Guatemala. Recuperado de [https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb_dl=211NCC-2%20actualizado % 2008-2019.pdf](https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb_dl=211NCC-2%20actualizado%202008-2019.pdf).
2. Administrador del Mercado Mayorista (2001). *Norma de coordinación comercial No 8. Resolución No 216-04*. Guatemala. Recuperado de [https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb_dl=17NCC-8%20actualizado% 2008 -2021.pdf](https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb_dl=17NCC-8%20actualizado%202008-2021.pdf).
3. Beltrán, J. L. (2012). *Estrategia de control de modelo predictivo para el despacho y almacenamiento de energía renovable en sistemas híbridos*. México: Tecnológico de Monterrey. Recuperado de <https://www.ehu.eus/documents/3444171/4484750/31.pdf>.
4. Congreso de la República de Guatemala (1996). *Decreto Número 93-96. Ley General de Electricidad*. Guatemala, Centroamérica. Recuperado de https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb_dl=6AMM-ley-general-electricidad.pdf.
5. Comisión Nacional de Energía de Chile. (2017). *Reglamentos de coordinación y operación. Sistemas de almacenamiento*. Chile. Recuperado de <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2017/08/Mesa-N%C2%B0-2-Reglamento-Cy-O-Sistemas-de-Almacenamiento-1.pdf>.

6. Detwiler, P. K. (2020). *The big picture: energy storage to date, applications and its growing role on the grid today*. EUCI Westchester. Recuperado de https://www.euci.com/event_post/0920-battery-storage/.
7. DI Roland Wasmayr, D. J. (2014). *Integration von Speichern in elektrische Versorgungsnetze*. TuGraz University of Technology, Zugangsdaten. Recuperado de https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov_2014/files/lf/LF_Wasmayr.pdf.
8. Dötsch, C. K., Kanngießner, A. y Wolf, D. (2009). *Speicherung elektrischer Energie – Technologien zur Netzintegration erneuerbarer Energien*. Fraunhofer-Institut für Umwelt. Uwf UmweltWirtschaftsForum. Recuperado de *SpeicherungelektrischerEnergie–Technologienzur NetzintegrationerneuerbarerEnergien*.
9. Dunn, B. (2011). Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. *Science*. 334, 334(6058), pp. 928–935. Recuperado de <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1212741>.
10. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. (2016). *Study of the drivers and asset management of pumped-storage power plants historial and Suiza*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/303892878_Study_of_the_drivers_and_asset_management_of_.
11. Flores Gallo, L. (2008). *Cálculo de la reserva rodante en el despacho programado*. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.

Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/1742>.

12. Gabash, A. Li, P. (2013). *Flexible optimal operation of battery storage systems for energy supply networks*. Transactions on Power Systems: Publisher. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/250305402_Flexible_Optimal_Operation_of_Battery_Storage_Systems_for_Energy_Supply_Networks.
13. Gómez, E. (2016). *Operaciones en empresas de servicio*. Escuela de Organización Industrial. Recuperado de <https://www.eoi.es/blogs/emiliogomez/2016/02/18/operaciones-en-empresas-de-servicio/>.
14. Institute for Energy Systems (2016). *A numerical and graphical review of energy storage technologies*. Universidad de Edimburgo. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Numerical-and-Graphical-Review-of-Energy-Storage-Sabihuddin-Kiprakis/aa0f8624b5bd6092ba2537f5c019bf140e0c23cc>.
15. IPMA (2008). *Bases para la competencia en dirección de proyectos*. España: IPMA. Recuperado de <https://www.aepro.com/es/27-publicaciones/varios-libros/37-ncb-30-bases-para-la-competencia-en-direccion-de-proyectos5.html>.
16. Joseph, A. y Shahidehpour, M. (2006). *Battery storage systems in electric power systems*. Instituto de Tecnología de Illinois. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/224651702_Battery_storage_systems_in_electric_power_systemsdoi:doi:10.1109/pes.2006.1709235.

17. Kelly/Detwiler, P. (2020). *Fundamentals of battery storage*. EUCI Las Vegas. Recuperado de <https://www.euci.com/pdf/0920-battery-storage.pdf?ref=1600447867>.
18. Lawder, M. T. Suthar, B. Paul W. C. Northrop, S.; C. Hoff; M, y Leitermann, O. *Battery energy storage system (BESS) and Battery Management System Department of Energy, Environmental and Chemical Engineering*. Washington University in Saint Louis, Saint Louis, MO, USA. Recuperado de <https://www.osti.gov/biblio/1136226-battery-energy-storage-system-bess-battery-management-system-bms-grid-scale-applications>.
19. Montezuma Santacruz, N. (2014). *Problema de predespacho de unidades con representación de almacenamiento a base de baterías*. Santiago de Chile: CONICYT/FONDAP/FONDECYT. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/115539>.
20. Nair, N. y Garimella, N. (2010). *Battery energy storage systems: assessment for small-scale renewable energy integration*. *Energy and buildings*. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778810002185>.
21. Rinland, D. N. (2018). *Generación solar fotovoltaica con almacenamiento de baterías*. Buenos Aires: Instituto Tecnológico de Buenos Aires. Recuperado de <https://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/1735>.
22. Rout, T. M., Maharana, M., Chowdhury, A y Samaj, S. (2018). *A comparative study of stand-alone photo-voltaic system with battery storage system and battery supercapacitor storage system*. 2018.

ICEE: Publisher, Chennai, India. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/84423464th>.

23. Sarasua, A., Molina, M., Pontoriero, G., Héctor, D. y Mercado, P. (2008). *Integración de energía eólica y sistemas de almacenamiento en sistemas de suministro de energía eléctrica*. Buenos Aires: Universidad Nacional de San Juan. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/94610>.
24. Universidad Rafael Landívar. (2018). *Perfil energético de Guatemala*. Ciudad de Guatemala: Universidad Rafael Landívar; INCYT; VRIP. Recuperado de https://incyt.url.edu.gt/wp-content/uploads/2018/01/1438128273_perfil_energetico_.pdf.
25. Vivanco Vergara, M. E. (2017). *Los manuales de procedimientos como herramientas de control interno de una organización. Universidad y sociedad*. Cuba: Universidad de Cienfuegos. Recuperado de <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/637>.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Entrevista estructurada**

Nombre de la empresa: -----. Fecha: ----- Puesto: -----

Nombre del entrevistado: -----. Correo electrónico: -----

Preguntas generales y de casos de éxito

- 1 ¿Por qué la regulación del almacenamiento de energía es una prioridad?
- 2 ¿Cuáles fueron las regulaciones más impactantes para el almacenamiento en su jurisdicción?
- 3 ¿Cuáles fueron los impactos en el mercado?
- 4 ¿Qué es lo que le sorprendió?
- 5 En retrospectiva, ¿qué haría usted de manera diferente?
- 6 ¿Cómo comenzó el proceso de desarrollo de las regulaciones?
- 7 ¿Cuáles fueron los desafíos y dificultades que encontró?
- 8 ¿Qué tipo de tecnología utilizaría para RRO?
- 9 ¿Qué tipo de tecnología utilizaría para RRR?

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Encuesta en español hacia otros países

1. ¿En qué país se encuentra?
2. ¿Conoce los BESS o sistemas de almacenamiento en baterías?
3. ¿Considera el costo de la tecnología como un factor determinante para la inserción de BESS en su país?
4. ¿Qué modelos de negocio conoce en donde se pueden aplicar los BESS? Mencíónelos.
5. ¿Considera la inserción de los BESS realizable en el futuro cercano en su país?
6. ¿Considera positiva la inserción de las tecnologías BESS en su país?
7. ¿Considera favorables las políticas regulatorias de su país a la inserción de los BESS?
8. ¿Considera que existen puntos críticos en tema regulación que los BESS pueden mejorar? Descríbalos.
9. ¿Considera que existen puntos críticos en tema técnico que los BESS pueden mejorar? Descríbalos.
10. ¿Qué temas considera importantes a tomar en cuenta para la inserción de BESS en su país?
11. ¿Cuáles son los desafíos regulatorios que enfrenta actualmente la inserción de los BESS? Descríbalos.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Costo de valor de generación banda máxima septiembre
2020**

| UBICACIÓN | VECES | PROMEDIO | Peso % |
|-------------------------------|-------|----------|--------|
| INTERCONEXIÓN GUA-MEX | 100 | 100.20 | 1.51 |
| GENERADORA DEL ATLÁNTICO | 82 | 65.39 | 1.23 |
| ACTÚN CAN GAS | 68 | 46.56 | 1.02 |
| JAGUAR ENERGY | 64 | 44.2 | 0.96 |
| SAN JOSÉ | 114 | 37.99 | 1.72 |
| JURÚN MARINALÁ | 119 | 25.51 | 1.79 |
| EL SALTO | 104 | 28.47 | 1.57 |
| LOS ESCLAVOS | 120 | 21.32 | 1.81 |
| GUAYACÁN | 116 | 18.36 | 1.75 |
| CHOLOMA | 76 | 17.97 | 1.14 |
| HIDROELÉCTRICA LAS UVITAS | 104 | 16.94 | 1.57 |
| SANTA MARÍA | 120 | 16.26 | 1.81 |
| EL CORALITO | 119 | 15.72 | 1.79 |
| LA PERLA | 115 | 14.3 | 1.73 |
| PALÍN 2 | 120 | 14.27 | 1.81 |
| SANTA TERESA | 119 | 13.44 | 1.79 |
| SECACAO | 120 | 13.19 | 1.81 |
| HIDROELÉCTRICA KAPLAN CHAPINA | 111 | 13.18 | 1.67 |
| AGUACAPA | 117 | 13.03 | 1.76 |
| PANÁN | 120 | 12.51 | 1.81 |
| EL CAFETAL | 119 | 12.36 | 1.79 |
| LA LIBERTAD | 107 | 12.18 | 1.61 |
| HIDROXACBAL | 120 | 12.12 | 1.81 |
| EL MANANTIAL | 119 | 11.85 | 1.79 |
| HIDRO AGUNA | 112 | 11.56 | 1.69 |
| CANDELARIA | 119 | 11.54 | 1.79 |
| FINCA LORENA | 120 | 11.04 | 1.81 |
| VISIÓN DE ÁGUILA | 120 | 10.97 | 1.81 |
| RENACE 4 | 119 | 10.9 | 1.79 |
| RENACE | 120 | 10.88 | 1.81 |
| EL RECREO | 120 | 10.79 | 1.81 |
| PASABIEN | 120 | 10.49 | 1.81 |
| LAS VACAS | 112 | 10.42 | 1.69 |
| CERRO VIVO | 119 | 10.41 | 1.79 |
| HIDROELÉCTRICA XACBAL DELTA | 120 | 10.13 | 1.81 |

Continuación del apéndice 3.

| | | | |
|--------------------------------------|-----|-------|------|
| POZA VERDE | 119 | 10.05 | 1.79 |
| LAS FUENTES | 118 | 9.83 | 1.78 |
| OXEC | 120 | 9.73 | 1.81 |
| BOBOS | 95 | 9.3 | 1.43 |
| EL CÓBANO | 120 | 8.97 | 1.81 |
| HIDROCANADÁ | 119 | 8.8 | 1.79 |
| HMA | 117 | 8.74 | 1.76 |
| HIDROELÉCTRICA LOS PATOS | 119 | 8.39 | 1.79 |
| MONTECRISTO | 118 | 7.95 | 1.78 |
| SAN ISIDRO | 105 | 7.41 | 1.58 |
| MATANZAS | 103 | 7.35 | 1.55 |
| HIDROELÉCTRICA EL SALTO- MARINALÁ | 119 | 7.24 | 1.79 |
| RAAXHÁ | 119 | 7.21 | 1.79 |
| EL TRÉBOL | 118 | 4.3 | 1.78 |
| CHIXOY | 120 | 4.1 | 1.81 |
| OXEC II | 120 | 3.66 | 1.81 |
| IXTALITO | 118 | 3.46 | 1.78 |
| SDMM | 116 | 2.79 | 1.75 |
| ORTITLÁN | 120 | 1.18 | 1.81 |
| ORZUNIL | 120 | 1 | 1.81 |
| ARIZONA | 62 | 70.57 | 0.93 |
| PALO VIEJO | 119 | 9.28 | 1.79 |
| SAN ANTONIO EL SITIO | 25 | 1.55 | 0.38 |
| LAS CUMBRES | 48 | 1.68 | 0.72 |
| VIENTO BLANCO | 46 | 1.9 | 0.69 |
| XOLHUITZ | 98 | 2.87 | 1.48 |
| TEXTILES DEL LAGO | 7 | 79.55 | 0.11 |
| TERMICA | 7 | 82.55 | 0.11 |
| SANTA LUCÍA | 4 | 50.49 | 0.06 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Costo de valor de generación banda máxima marzo 2020

| UBICACIÓN | VECES | PROMEDIO | Peso % |
|---------------------------|-------|----------|--------|
| PUERTO QUETZAL | 2 | 96.1 | 0.03 |
| JURÚN MARINALÁ | 122 | 38.77 | 1.57 |
| GENERADORA DEL ATLÁNTICO | 65 | 65.39 | 0.83 |
| COSTA SUR | 116 | 49.73 | 1.49 |
| INTERCONEXIÓN GUA-MEX | 117 | 61.11 | 1.50 |
| JAGUAR ENERGY | 124 | 39.05 | 1.59 |
| SAN JOSÉ | 124 | 37.77 | 1.59 |
| LA LIBERTAD | 61 | 24.85 | 0.78 |
| SAN ISIDRO | 124 | 12.18 | 1.59 |
| EL SALTO | 76 | 28.38 | 0.98 |
| LOS ESCLAVOS | 91 | 21.25 | 1.17 |
| CONCEPCIÓN | 124 | 19.22 | 1.59 |
| HIDROELÉCTRICA LAS UVITAS | 95 | 16.94 | 1.22 |
| GUAYACÁN | 104 | 16.92 | 1.34 |
| SANTA ANA | 124 | 16.55 | 1.59 |
| CHOLOMA | 95 | 16.41 | 1.22 |
| SANTA MARÍA | 44 | 16.21 | 0.57 |
| EL CORALITO | 112 | 15.72 | 1.44 |
| LA PERLA | 124 | 14.3 | 1.59 |
| PALÍN 2 | 124 | 14.23 | 1.59 |
| PANTALEÓN | 124 | 13.82 | 1.59 |
| HIDROELÉCTRICA KAPLAN | | | |
| CHAPINA | 92 | 13.69 | 1.18 |
| SANTA TERESA | 123 | 12.35 | 1.58 |
| EL PILAR | 7 | 13.02 | 0.09 |
| AGUACAPA | 119 | 12.99 | 1.53 |
| SECACAO | 124 | 12.88 | 1.59 |
| PANÁN | 124 | 12.5 | 1.59 |
| EL CAFETAL | 124 | 12.36 | 1.59 |
| HIDRO AGUNA | 123 | 12.2 | 1.58 |
| HIDROXACBAL | 101 | 12.09 | 1.30 |
| EL MANANTIAL | 122 | 11.85 | 1.57 |
| SDMM | 124 | 11.14 | 1.59 |
| VISIÓN DE ÁGUILA | 108 | 11.06 | 1.39 |
| CANDELARIA | 124 | 10.94 | 1.59 |
| RENACE 4 | 114 | 10.9 | 1.46 |

Continuación del apéndice 4.

| | | | |
|----------------------------------|-----|-------|------|
| EL RECREO | 88 | 10.59 | 1.13 |
| POZA VERDE | 124 | 10.54 | 1.59 |
| PASABIEN | 124 | 10.49 | 1.59 |
| CERRO VIVO | 124 | 10.41 | 1.59 |
| TRINIDAD | 124 | 9.99 | 1.59 |
| HIDROELÉCTRICA XACBAL DELTA | 98 | 10.1 | 1.26 |
| PALO GORDO | 124 | 10.06 | 1.59 |
| LAS VACAS | 123 | 9.89 | 1.58 |
| LAS FUENTES | 120 | 9.83 | 1.54 |
| EL CÓBANO | 124 | 9.12 | 1.59 |
| OXEC | 93 | 9.09 | 1.19 |
| BOBOS | 124 | 8.44 | 1.59 |
| HIDROELÉCTRICA EL SALTO-MARINALÁ | 120 | 8.36 | 1.54 |
| HMA | 121 | 8.11 | 1.55 |
| MONTECRISTO | 93 | 7.95 | 1.19 |
| PALO VIEJO | 109 | 7.66 | 1.40 |
| HIDROCANADÁ | 95 | 7.47 | 1.22 |
| RAAXHÁ | 124 | 7.45 | 1.59 |
| MATANZAS | 110 | 7.35 | 1.41 |
| LA UNIÓN | 124 | 7.27 | 1.59 |
| MAGDALENA | 124 | 6.26 | 1.59 |
| EL TRÉBOL | 124 | 4.3 | 1.59 |
| TULULÁ | 123 | 4.16 | 1.58 |
| IXTALITO | 102 | 4.05 | 1.31 |
| OXEC II | 93 | 3.78 | 1.19 |
| XOLHUITZ | 118 | 3.25 | 1.52 |
| MADRE TIERRA | 124 | 2.77 | 1.59 |
| LAS CUMBRES | 116 | 1.57 | 1.49 |
| SANTA LUCÍA | 124 | 1.2 | 1.59 |
| ORTITLÁN | 124 | 1.14 | 1.59 |
| ORZUNIL | 124 | 1 | 1.59 |
| ARIZONA | 24 | 81.05 | 0.31 |
| FINCA LORENA | 122 | 11.05 | 1.57 |
| TEXTILES DEL LAGO | 1 | 95.05 | 0.01 |
| VIENTO BLANCO | 68 | 1.9 | 0.87 |
| SAN ANTONIO EL SITIO | 54 | 1.55 | 0.69 |
| CHIXOY | 120 | 40.10 | 1.54 |
| RENACE | 124 | 10.89 | 1.59 |

Continuación del apéndice 4.

| | | | |
|--------------------------|-------------|-------|-----------------|
| HIDROELÉCTRICA LOS PATOS | 70 | 12.75 | 0.90 |
| | <u>7786</u> | | <u>100.00 %</u> |

Fuente: elaboración propia.