

Universidad Técnica Nacional

Sede del Pacífico

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de licenciatura
en Ingeniería Eléctrica

Estudio de viabilidad sobre el almacenamiento de energía en patio
de interruptores de la planta hidroeléctrica Brasil de la CNFL

Jonathan Campos Muñoz

Juan Pablo Elizondo Varela

Puntarenas, abril de 2022



Ingeniería Eléctrica
Sede del Pacífico



ACTA DE APROBACIÓN

En la ciudad de Puntarenas, a los 10 días del mes de mayo del año 2022 al ser las 14 horas y 30 minutos, estando presentes en el Campus Juan Rafael Mora Porras de la Sede del Pacífico de la Universidad Técnica Nacional, las siguientes personas:

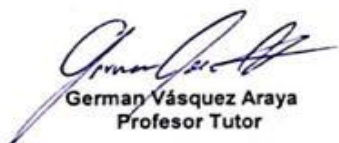
Profesor Tutor: German Vásquez Araya
Profesor Lector Interno: José Alberto Vásquez Araya
Profesor Lector Externo: Miguel Muñoz Quesada
Presidente del Tribunal Examinador: Carlos Ruiz Rodríguez

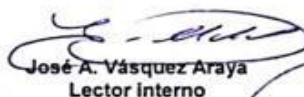
En su condición de miembros del Tribunal Evaluador, para evaluar el Proyecto de Graduación para optar por el grado de **Licenciatura en Ingeniería Eléctrica**, de las personas estudiantes, **Jonathan Campos Muñoz** cédula de identidad **114220853** y **Juan Pablo Elizondo Varela** cédula de identidad **604270005**.

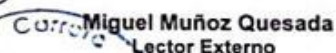
Reunido el Tribunal Evaluador los aspirantes procedieron a presentar y defender su Proyecto de Graduación titulado **"Estudio de viabilidad sobre el almacenamiento de energía en patio de interruptores de la planta hidroeléctrica Brasil de la CNFL."**

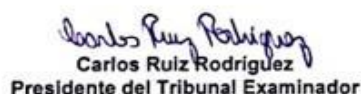
Concluida la presentación y defensa del Proyecto de Graduación, el Tribunal Evaluador consideró que, de conformidad con la normativa en la materia, las personas estudiantes obtuvieron una calificación de 9.0, cumpliendo con las exigencias requeridas para la aprobación del Proyecto y le es conferido el grado de **Licenciados en Ingeniería Eléctrica**.

No () Si () mención honorífica


German Vásquez Araya
Profesor Tutor


José A. Vásquez Araya
Lector Interno


Miguel Muñoz Quesada
Lector Externo


Carlos Ruiz Rodríguez
Presidente del Tribunal Examinador



Estudiantes:


Jonathan Campos Muñoz
Cédula 114220853


Juan Pablo Elizondo Varela
Cédula 604270005

San Rafael de Heredia, 28 de abril de 2022

Señor
Universidad Técnica Nacional
Sede del Pacífico

Estimado señor:

En mi calidad de filóloga, hago constar que he revisado el trabajo para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Eléctrica, bajo el título:

Estudio de viabilidad sobre el almacenamiento de energía en patio de interruptores de la planta hidroeléctrica Brasil de la CNFL, elaborado por los estudiantes Jonathan Campos Muñoz y Juan Pablo Elizondo Varela.

La revisión se hizo en la parte morfosintáctica, forma, estilo, redacción, puntuación y ortografía; por lo cual este trabajo está listo en tales aspectos para ser presentado ante la Universidad.

Atentamente,


Alejandra Hernández Arguedas
Filóloga
Cédula 4 193 626
Carné 66820 del Colegio de
Licenciados y Profesores en Letras,
Filosofía, Ciencias y Artes
Teléfono 86478512
Correo alesaru1987@gmail.com

Alejandra Hernández Arguedas
Filóloga
Teléfono 22 37 51 56
San Rafael de Heredia

Sustentante 1. Jonathan Campos Muñoz

DEDICATORIA

A mis padres, María Elena Muñoz Segura y Héctor Campos Campos, quienes siempre me han brindado el apoyo incondicional, así como a todas las personas de las cuales he recibido colaboración.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, quien me ha dado las fuerzas y sabiduría para llevar a cabo este proyecto y desarrollarme profesionalmente.

A mi profesor tutor y profesores lectores, por su guía, especialmente a Miguel Muñoz Quesada, quien me ha apoyado e incentivado durante el camino.

A la Compañía Nacional de Fuerza y Luz S. A., por facilitar la información y permitir desarrollar este estudio dentro de dicha empresa.

A mi familia y mi novia, quienes me han brindado su apoyo y no han dejado de confiar en mí durante el camino.

Sustentante 2: Juan Pablo Elizondo Varela

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico a mi familia, en especial a mis padres María Varela Soto y Odel Elizondo Mesén, por el amor y apoyo incondicional que siempre me han brindado, quienes en los buenos y malos momentos ahí estuvieron para ayudarme y cuidarme como los padres ejemplares que son.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, por darme la vida, salud y sabiduría para llevar a cabo este trabajo y por guiarme a lo largo de la vida.

A mis padres, por confiar y ser el pilar en mi vida al inculcarme valores, principios y consejos que hoy me hacen una persona de bien.

A mi tutor, por orientarnos con su conocimiento en los momentos que necesitamos consejo.

A mis amigos, que siempre me apoyaron a seguir adelante para terminar este proyecto; gracias a las horas de trabajo duro y porque a pesar del cansancio, siempre estuvieron ahí para continuar, aconsejarme y tenderme la mano.

TABLA DE CONTENIDO

1	CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1	Introducción	2
1.2	Justificación e importancia del proyecto	3
1.3	Planteamiento del problema	4
1.4	Antecedentes	5
1.4.1	Almacenamiento energético	5
1.4.2	Factores que afectan la elección de la batería	7
1.4.3	Análisis de tecnologías en baterías	10
1.5	Objetivos	15
1.5.1	Objetivo general	15
1.5.2	Objetivos específicos	15
1.6	Alcance	16
1.7	Limitaciones	17
1.8	Viabilidad	17
1.9	Cronograma de ejecución	18
2	CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	20
2.1	Almacenamientos en el área de generación Costa Rica	21
2.2	Tecnologías electroquímicas	21
2.2.1	Baterías de ácido-plomo	22
2.2.2	Baterías de sodio-azufre	22
2.2.3	Baterías de sodio-cloruro de níquel	23
2.2.4	Baterías de níquel-cadmio	23
2.2.5	Baterías de hidruro de níquel-metal	23
2.2.6	Baterías de iones de litio	24
2.2.7	Batería de fosfato de hierro (LFP)	24
2.2.8	Beneficios del almacenamiento	24
2.2.8.1	Usuarios de electricidad	25
2.2.8.2	Generadores de energías renovables	25
2.2.8.3	Compañías de transmisión y distribución	25

2.3	La importancia del almacenamiento de energía	26
2.4	Importancia de la batería solar	26
2.4.1	Soluciones de almacenamiento de baterías comerciales e industriales	27
2.5	Costos de energía en los distintos periodos	27
2.5.1	Cargo por demanda	28
2.5.2	Definición de horario	28
2.5.3	Tarifas	28
2.5.4	Tarifa T-CB: de ventas a ICE distribución y a la CNFL	29
2.5.5	Tarifa de transmisión de electricidad (T-TE)	30
3	CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO	31
3.1	Tipo de investigación	32
3.2	Alcance de la investigación	32
3.3	Fuentes de información	32
3.4	Variables	33
3.5	Sujeto de información	33
3.6	Estrategia metodológica	34
4	CAPÍTULO 4: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	35
4.1	Demandas de circuitos pertenecientes al patio de interruptores Brasil	36
4.1.1	Circuito Brasil–Lindora	37
4.1.2	Circuito Ciudad Colón	40
4.1.3	Circuito Fórum	41
4.1.4	Circuito Reforma	42
4.2	Generación en la planta hidroeléctrica Brasil 2016-2020	43
4.2.1	Comportamiento de la potencia generada por la planta Brasil versus la demanda del patio de interruptores Brasil	47
4.3	Elección de la capacidad de almacenamiento	50
4.3.1	Carga de circuitos en el PI Brasil versus la generación de la planta Brasil	50
4.3.2	Demanda de potencia desde las barras del ICE en la subestación Lindora	53
4.3.3	Ubicación y espacio físico de almacenamiento en el patio de interruptores Brasil	55
4.3.4	Diagrama unifilar de la conexión del sistema de almacenamiento	58
4.3.5	Definición de la capacidad de almacenamiento	58
4.4	Análisis de los beneficios de implementar un sistema de almacenamiento	59

4.5	Respaldo de los circuitos del PI Brasil	60
4.6	Estudio y análisis de las salidas de línea de los circuitos del PI Brasil y de las salidas de la PH Brasil	60
4.7	Tecnología por utilizar del sistema de almacenamiento	63
4.8	Estudio de viabilidad del proyecto	64
4.8.1	Costos del kWh instalado	65
4.8.2	Cotización ECO WAT consulting	65
4.8.3	Estudio del coste del kWh instalado en sistemas de baterías de iones de litio	66
4.8.4	Costos de kWh instalado según Tesla	70
4.8.5	Análisis de precio de la tarifa T-CB	70
4.9	Análisis financiero	74
4.9.1	Contenido de datos en el análisis económico real actual	74
4.9.2	Contenido de datos en el análisis económico optimista hacia el futuro	79
4.9.3	Análisis económico por medio de software	82
5	CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
5.1	Conclusiones	86
5.2	Recomendaciones	87
6	ANEXOS	89
7	BIBLIOGRAFÍA	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Almacenamiento de energía eléctrica instalada a nivel mundial	6
Figura 2 Profundidad de descarga	9
Figura 3 Profundidad de descarga	12
Figura 4 Almacenamiento por medio de baterías Fuente: Merino, 2020.	13
Figura 5 Proyección de crecimiento del almacenamiento 2017-2030.....	14
Figura 6 Proyección en baterías de litio	15
Figura 7 Cronograma de desarrollo del proyecto	19
Figura 8 Diagrama del patio de interruptores Brasil	36
Figura 9 Demanda promedio del circuito Brasil-Lindora 2019	38
Figura 10 Energía del periodo nocturno enviada y recibida de Brasil-Lindora	39
Figura 11 Energía del periodo valle enviada y recibida de Brasil-Lindora.....	39
Figura 12 Energía del periodo punta enviada y recibida de Brasil-Lindora.....	40
Figura 13 Demanda promedio del circuito Ciudad Colón 2019.....	41
Figura 14 Demanda promedio del circuito Fórum 2019	42
Figura 15 Demanda promedio del circuito Reforma 2019.....	43
Figura 16 Energía mensual generada por la PH Brasil en periodo punta.....	44
Figura 17 Energía mensual generada por la PH Brasil en periodo valle.....	45
Figura 18 Energía mensual generada por la PH Brasil en periodo nocturno	46
Figura 19 Consumo anual de energía del PI Brasil	47
Figura 20 Energía excedente en el periodo nocturno del PI Brasil	51
Figura 21 Análisis de datos por medio del método de distribución normal	52
Figura 22 Desviación estándar de datos de la energía nocturna exportada.....	52

Figura 23 Diagrama de la subestación Lindora	54
Figura 24 Potencia promedio comprada al ICE en periodo punta.....	55
Figura 25 Ubicación satelital del PI Brasil	56
Figura 26 Patio de interruptores Brasil	56
Figura 27 Costado norte del PI Brasil	57
Figura 28 Diagrama unifilar	58
Figura 29 Energía en MWh asociada a las fallas que afectan los circuitos del PI Brasil	61
Figura 30 Cantidad de horas fuera de línea de la PH Brasil en 2019	62
Figura 31 Resumen de las características de las baterías	63
Figura 32 Comparativo de tecnologías de acumuladores electroquímicos	64
Figura 33 Proyecciones de alto, medio y bajo costo para cuatro horas.....	67
Figura 34 Proyecciones de costos para baterías de 2, 4 y 6 horas de duración	68
Figura 35 Tabla de proyección de costos de instalación del kWh.....	69
Figura 36 Costo de energía según la tarifa T-CB 2016-2022.....	71
Figura 37 Costo de potencia según tarifa 2016-2022	72
Figura 38 Crecimiento histórico de la demanda de generación 1976-2020	73
Figura 39 Flujo de caja proyectado con datos reales actuales para determinar la viabilidad del proyecto (5 MW)	76
Figura 40 Flujo de caja proyectado con datos reales actuales para determinar la viabilidad del proyecto (30 MW)	77
Figura 41 Flujo de caja proyectado con datos económicos optimistas para determinar la viabilidad del proyecto (5 MW)	80
Figura 42 Flujo de caja proyectado con datos económicos optimistas para determinar la viabilidad del proyecto (30 MW)	81

Figura 43 Previsión del VAN	82
Figura 44 Datos de predicción del VAN	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tarifa T-CB I semestre 2022.....	29
Tabla 2 Cargo fijo en colones.....	30
Tabla 3 Análisis de la frecuencia de generación de la PH Brasil 2016-2020.....	49

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ARESEP: Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos.

CNFL: Compañía Nacional de Fuerza y Luz.

ICE: Instituto Costarricense de Electricidad.

ICT: Instituto Costarricense de Turismo.

PH Brasil: Planta hidroeléctrica Brasil.

PI Brasil: Patio de interruptores de la planta hidroeléctrica Brasil.

RESUMEN

En el presente documento se planteó un proyecto de almacenamiento por medio de baterías con energía de la planta hidroeléctrica Brasil de Santa Ana, la cual es parte de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz S. A., con el fin de poder almacenar energía en el horario nocturno, generada por esta planta y despacharla a un mayor precio en el periodo punta hacia la subestación Lindora de la misma empresa, ya que en ese periodo la demanda es muy alta y generalmente se compra energía que se descarga desde las barras del ICE para abastecer a una gran cantidad de clientes. Por lo tanto, al emplear el aporte de la energía almacenada en las baterías durante el periodo nocturno, se pretende reducir los costos por compra de energía.

De este modo, se analizó la viabilidad de instalación de un sistema de almacenamiento con respecto a la generación de la planta hidroeléctrica en mención, ubicándolo en el patio de interruptores Brasil. Para ello, se llevó a cabo una serie de estudios basados en datos históricos de energía generada por la planta, así como el análisis del consumo de los circuitos ramales del patio de interruptores. También, se efectuó un estudio económico de los costos de instalación y desarrollo del proyecto, obteniendo resultados que se mostrarán en el presente documento.

En cuanto a la organización del proyecto, en el capítulo 1 se formuló la introducción, el problema, los objetivos, el alcance, las limitaciones y la viabilidad de llevar a cabo la propuesta. En el capítulo 2, se realizó una exposición teórica, enfocada en mostrar los distintos tipos y tecnologías de almacenamiento en baterías electroquímicas. Luego, se describieron las ventajas, importancia y algunas soluciones comerciales e industriales a nivel mundial.

Posteriormente, en el capítulo 3, se explicó la metodología utilizada durante esta investigación, en relación con el tipo, alcance y estrategia empleada para su elaboración. Adicionalmente, en el capítulo 4 se detallaron historiales de demanda y generación eléctrica vinculados con la PH Brasil y el patio de interruptores, para determinar la capacidad, ubicación y tecnología por utilizar en el sistema de almacenamiento. Por último, en el capítulo 5 se llevó a cabo un análisis financiero basado en datos reales y proyección, todos relacionados en un flujo de caja, a partir de lo cual se determinó que el sistema no es viable debido al costo actual del kWh de almacenamiento instalado y la inversión inicial tan elevada.

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Introducción

En Costa Rica, la generación de energía es producida en su mayoría a base de energías renovables, un ejemplo de esto se aprecia en los datos arrojados por el Centro Nacional de Control de Energía (CENCE) del año 2019 (citado por ICT, s.f.), los cuales indican que el país cerró ese año con más del 99 % de energía producida mediante fuentes renovables procedentes del agua, viento, geotermia, biomasa y sol. Esta forma de producción de energía ya era tendencia en el año 2015, momento desde el cual se ha venido superando el 98 % de generación eléctrica con recursos limpios.

También, en relación con lo expuesto, cabe destacar que la Compañía Nacional de Fuerza y Luz S. A. (CNFL) es una empresa pública del sector eléctrico que genera y distribuye energía eléctrica en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica. Esta compañía produce un porcentaje de la energía que distribuye por medio de nueve plantas hidroeléctricas y una planta eólica, la energía restante es comprada al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

Entre las plantas hidroeléctricas, se encuentra la planta Brasil, la cual se ubica en Brasil de Santa Ana, San José. La planta en mención tiene una capacidad de 24,5 MW de generación y su habitual producción se basa en las horas punta y valle; sin embargo, de acuerdo con la temporada, las horas de generación aumentan considerablemente.

No obstante, el objetivo del proyecto desarrollado consiste en realizar el estudio de viabilidad de instalar un sistema de almacenamiento de energía en el patio de interruptores de la planta hidroeléctrica Brasil (PI Brasil) de la CNFL, siendo el almacenamiento uno de los negocios en aumento a nivel mundial; además, se pretende que el sector eléctrico tenga a su disposición nuevas herramientas que permitan favorecer aún más la penetración de las energías renovables.

Para el desarrollo del proyecto, inicialmente se procede con la recopilación de datos que contienen información clave, la cual se analiza mediante gráficos que demuestran el comportamiento tanto de la generación de la planta hidroeléctrica Brasil como la demanda de los circuitos conectados al patio de interruptores que la misma alimenta, y también la demanda que se tiene en la subestación Lindora, para determinar los factores y variables que influyen en la toma de decisiones con respecto a la ubicación del sistema de almacenamiento, tipo de baterías, modo de aplicación, capacidad de almacenamiento, entre otros.

Luego de analizar todas las posibles opciones y haber determinado la mejor aplicación del sistema de almacenamiento, se realiza un análisis de costos y beneficios con el cual se busca determinar la viabilidad que conlleva para la empresa CNFL implementar el sistema de almacenamiento propuesto. Para esto, se utilizan datos actuales del precio del dólar, costo del kWh de almacenamiento, costos de la energía y potencia según el periodo de generación, entre otros factores que afectan directamente la inversión y los ingresos que son la clave para la recuperación y la rentabilidad del proyecto. Tras el análisis de los resultados, se llega a una importante conclusión, pues se determina la no viabilidad de implementar el sistema de almacenamiento tal y como se desarrolla a lo largo de la investigación.

1.2 Justificación e importancia del proyecto

La planta hidroeléctrica Brasil de la CNFL genera energía habitualmente en el periodo punta y de acuerdo con su recurso hídrico, luego esta energía se distribuye mediante el PI Brasil que alimenta diferentes circuitos ramales. Cuando la planta se encuentra fuera de horario de generación, ya sea por falta de recurso hídrico, mantenimiento o alguna falla, se debe abastecer la carga mediante energía proveniente de la subestación Lindora, la cual es

alimentada por el ICE, al que se le compra la energía requerida durante el periodo que la planta Brasil está sin generar.

En algunos lapsos que la planta Brasil está generando, la energía es mayor a la requerida por los circuitos conectados en su patio de interruptores, creando un excedente que se debe trasladar a la subestación Lindora, propiedad de la CNFL, pero en este trayecto se generan pérdidas.

Por lo tanto, se plantea instalar un sistema de almacenamiento de energía utilizando baterías en el patio de interruptores Brasil con una configuración especial de forma que se distribuya en los circuitos, para guardar la energía excedente que se transmite hasta Lindora y utilizarla en el periodo que la planta Brasil no genera, disminuyendo así el intercambio de energía entre Lindora y Brasil, lo cual reduce también las pérdidas originadas en ese proceso.

Además, con este sistema de almacenamiento se minimiza el trasiego de energía y, con ello, el pago de peajes por utilizar líneas de transmisión del ICE, ya que se almacenaría en el patio de interruptores Brasil o en sus circuitos ramales para despacharla cuando sea requerida.

Asimismo, el almacenamiento de energía generada en períodos nocturnos se transforma en un beneficio económico, ya que la energía almacenada se podría vender en periodos punta, es decir, cuando la facturación de venta de energía tiene un costo más elevado, obteniendo un mayor beneficio económico de la energía para la CNFL.

1.3 Planteamiento del problema

Las empresas generadoras y distribuidoras de electricidad deben buscar la mejora continua, incluso cuando no exista un problema, como se plantea en la presente investigación, donde se visualiza una posible optimización de la energía en el patio de interruptores Brasil.

Al respecto, actualmente el patio es alimentado por una planta hidroeléctrica del mismo nombre y por un circuito bidireccional, esta planta cuenta con una generación máxima de 24,5 MW y el patio brinda alimentación a tres circuitos por medio de los cuales la CNFL distribuye y abastece a los clientes que se encuentran conectados aguas abajo; los circuitos alimentados son: Fórum, Ciudad Colón y Reforma.

Con base en lo anterior, y tomando en cuenta que la generación de la planta Brasil es comúnmente superior al consumo de los circuitos mencionados, estos excedentes de energía son enviados o trasladados a la subestación Lindora de la CNFL, lo cual provoca pérdidas de potencia en las líneas de distribución. Además, en los periodos que la planta no genera, la energía se toma desde la subestación Lindora para distribuirla en los circuitos del patio de interruptores Brasil y, así, abastecer los clientes conectados a los circuitos del PI Brasil.

Cabe mencionar que en algunos casos se generan costos por pagos de peajes de transmisión, derivados del trasiego de energía mediante las líneas de transmisión desde la subestación Lindora hacia otras subestaciones y circuitos de la CNFL, debido a que estas líneas pertenecen al ICE, el cual genera un costo por este servicio.

Finalmente, es necesario referirse a la generación en periodo nocturno, especialmente durante la época lluviosa, la cual se podría aprovechar de una mejor forma, ya que es vendida a costo de periodo nocturno.

1.4 Antecedentes

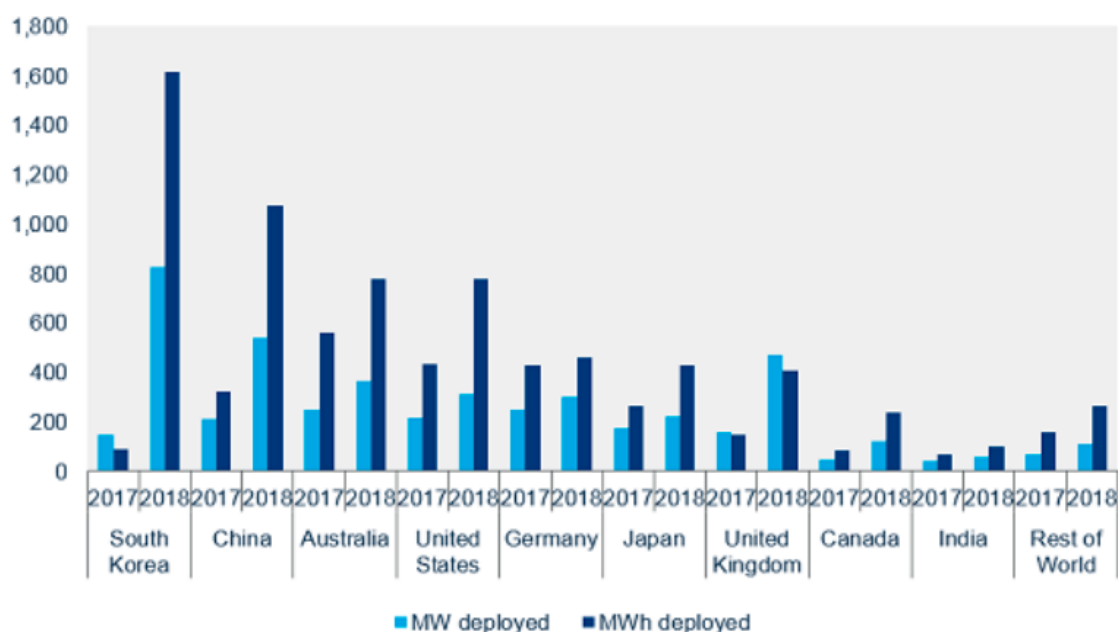
1.4.1 Almacenamiento energético

Con el objetivo de analizar el estado actual y las tendencias de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, se lleva a cabo un análisis de las distintas aplicaciones y tecnologías utilizadas en estas, para así comprender a grandes rasgos el tema de estudio.

Primeramente, se destaca que los sistemas de almacenamiento se han convertido en una alternativa con bases sólidas debido a diferentes factores como la ampliación de energías renovables, la alta inversión de capital en infraestructura de red y las iniciativas de redes inteligentes. Estos sistemas en la actualidad son accesibles y están preparados para estar integrados en el sistema eléctrico.

Al respecto, existe una cantidad considerable de opciones potenciales de almacenamiento de energía para el sector eléctrico y cada una cuenta con distintas características de funcionamiento, operación y durabilidad.

Figura 1
Almacenamiento de energía eléctrica instalada a nivel mundial



Fuente: Fernández y Álvaro, 2019.

Ahora bien, en la figura 1 se observa el almacenamiento de energía eléctrica instalada a nivel mundial entre los años 2017 y 2018, donde queda claro que el desarrollo ocurre

mayoritariamente en cuatro países: Corea del Sur, China, Australia y Estados Unidos. Asimismo, se refleja el crecimiento considerable de capacidad instalada entre estos dos años a nivel mundial.

1.4.2 Factores que afectan la elección de la batería

Los sistemas de almacenamiento por medio de baterías cuentan con diferentes componentes electroquímicos y características, los cuales deben ser analizados para su aplicación mediante distintos puntos de vista, con la finalidad de lograr una conclusión a partir del análisis de cada uno de estos. En relación con lo expuesto, los más importantes por ser analizados para la obtención de sistemas de baterías son los siguientes puntos:

Autodescarga: Esta se basa en la carga que pierde la batería en su vida o proceso de trabajo correspondiente. Depende en gran cantidad de la tecnología de la batería y la temperatura.

Capacidad específica: Es la cantidad de carga eléctrica capaz de almacenar la batería y se expresa en amperios-hora (Ah).

Ciclos de vida: El ciclo de vida de una batería depende del número de ciclos completos que soporta en carga y descarga durante su vida útil. Cabe destacar dentro de este punto que algunas baterías son para aplicaciones más robustas como almacenamiento para distribución, donde es mejor que cuenten con un sistema de ciclado profundo. Estas son aquellas baterías que cuentan con electrodos en su interior de aleación de antimonio para su mayor actividad y resistencia (Auto Solar, 2021).

Ambiente y temperatura: Se deben tomar en cuenta la región y el lugar como tal al instalar la batería, porque el ambiente en donde se encuentre puede afectar su vida útil,

considerando factores como la temperatura, humedad y espacio; además, cada batería y su tecnología cuentan con características ya estipuladas por el fabricante.

Coste: El coste siempre se ha definido como un elemento primordial para la selección de la batería, aunque no debería serlo.

Curvas de carga y descarga: Las curvas de carga y descarga suministradas por el fabricante deben ser analizadas con base en la necesidad presente para su aplicación (Castro et al., 2019).

Densidad de energía: La energía específica corresponde a la energía que puede almacenar la batería en relación con su masa o volumen. Determina el espacio que ocupa la batería, el cual puede estar limitado.

Efecto memoria: El efecto memoria en las baterías está apoyado en el funcionamiento que se le dé al equipo, de manera que, si se genera un uso inadecuado como cargas y descargas incompletas, se limita la vida útil del acumulador.

Eficiencia energética (%): Es la energía necesaria para la carga de la batería y la energía eléctrica proporcionada por la batería, donde idealmente debería ser en un 100 %; sin embargo, por distintas razones se generan pérdidas y casi nunca su cumple con ese porcentaje.

Fabricante: Se elige el fabricante de acuerdo con la necesidad presente y los parámetros de cada batería, analizando cada caso por separado, ya que las baterías difieren entre los fabricantes.

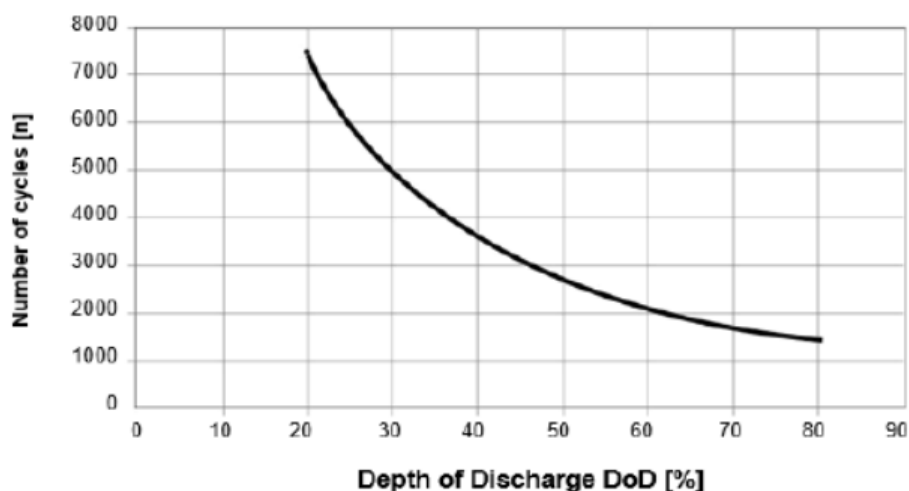
Garantías: Existen dos tipos de garantías, la de funcionamiento y la del fabricante. La primera garantía también depende del fabricante y su confiabilidad con base en pruebas de laboratorio realizadas en los productos.

Impedancia interna: Esta impedancia depende de la resistencia interna como lo son los electrodos, el electrolito y los terminales.

Potencia específica (W/kg): También llamada densidad de potencia, indica la potencia instantánea que puede suministrar una batería por unidad de masa.

Profundidad de descarga (%): Esta depende de la capacidad entregada por una batería durante su descarga y la capacidad nominal de la misma. Se puede decir que cuanto más grande es la profundidad de descarga, más corta es la vida útil estimada, como se puede observar en la figura 2, basada en la cantidad de ciclos en función de la profundidad de descarga.

Figura 2
Profundidad de descarga



Fuente: Castro et al., 2019.

Seguridad: Al utilizar sistemas de almacenamiento como lo son las baterías, se trabaja con elementos químicos y, por consiguiente, sustancias peligrosas tales como los gases

altamente explosivos y el ácido sulfúrico corrosivo. Con base en lo anterior, es necesario tomar medidas de seguridad con respecto al equipo por adquirir y su manejo.

Tensión: teniendo la necesidad de un sistema de almacenamiento, la tensión es uno de los parámetros más importantes por tomar en cuenta, pues a mayor potencial por cada celda, permitiría un menor número de celdas a conectar en serie para conseguir una tensión nominal mayor en la batería, mientras que en paralelo se consigue suministrar una menor corriente a igual potencia.

Vida útil: La vida útil de una batería ya está predefinida por su fabricante, basada en el tiempo que tarda una batería en disminuir su capacidad al 80 % del total (Castro et al., 2019).

1.4.3 Análisis de tecnologías en baterías

El editor de producción de título mundial Marck Hutchins (2020), de la Universidad de Tianjin en China, realiza una investigación en la cual se enfoca en analizar la tecnología utilizada en las baterías que almacenan energía para ser empleada en la red eléctrica. En esta investigación analiza una gran variedad de tecnologías que existen para la aplicación en baterías de almacenamiento, así como también el nivel de seguridad y rentabilidad mientras se ofrecen los servicios.

Señala que el crecimiento de las energías renovables a nivel mundial se vincula de forma directa con los sistemas de almacenamiento de energía, estos sistemas aplicados a la red eléctrica pueden solucionar las intermitencias en los sistemas de generación mediante energía eólica y solar. De este modo, almacenar la energía ofrece una disponibilidad inmediata para cubrir la demanda.

También, indica que, dentro de la gran variedad de tecnologías, una de las más conocidas es la de ion-litio, pero muchas de las demás tecnologías ofrecen distintas ventajas para las redes eléctricas a nivel mundial.

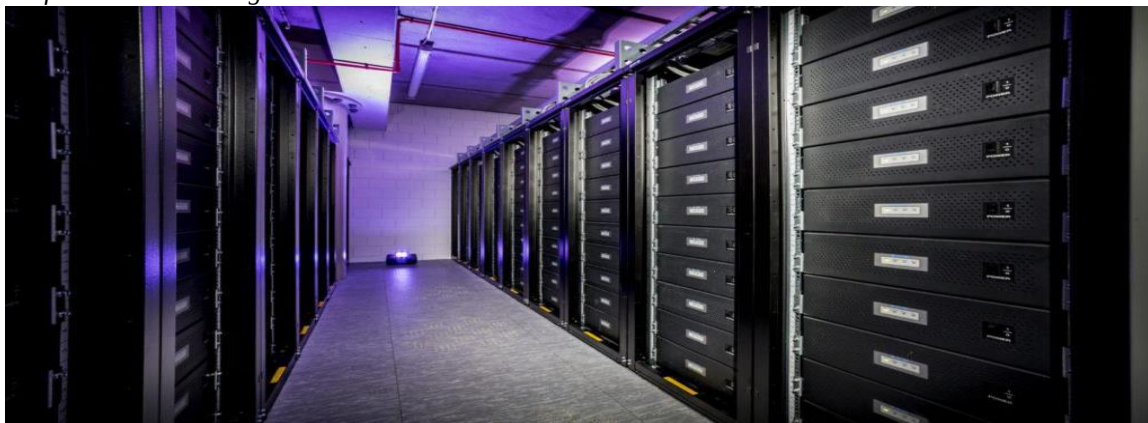
Asimismo, en esta investigación se destacan tres de las principales funciones que deben aportar las baterías a la red eléctrica, las cuales se indican a continuación:

- Salvar picos y nivelación de carga: para equilibrar las brechas en la demanda.
- Regulación del voltaje y la frecuencia: para lograr un equilibrio en tiempo real con una carga no uniforme en la red.
- Almacenamiento de energía de emergencia: proporcionando energía de reserva y previniendo cortes de energía.

De igual modo, en la investigación se menciona que las baterías con rápida respuesta, alta potencia, eficiencia, vida útil y costo bajo son aptas para distribuirse por toda la red eléctrica, siendo viables para un almacenamiento distribuido.

Se concluye que se debería enfatizar en crear nuevos sistemas de baterías que ofrezcan un balance entre costos y eficiencia; además, expresan que comparar las diferentes tecnologías es de suma importancia para determinar la mejor opción según el uso que se les va a dar (Hutchins, 2020).

Figura 3
Profundidad de descarga



Fuente: Hutchins, 2020.

En la actualidad, el almacenamiento de electricidad es un tema que a nivel social y mundial es de gran interés. De esta manera, es muy frecuente encontrar investigaciones enfocadas en el tema de almacenamiento de energía.

Son muchas las tecnologías de almacenamiento electroquímico a nivel de comercio, pero actualmente se están desarrollando tecnologías que las superan.

En cuanto a esto, las baterías de plomo-ácido regulado por válvula son las más comercializadas a nivel industrial. Esta tecnología es muy madura, pero presenta algunas limitaciones que la están sacando de la competencia con respecto a las demás, las cuales son los pocos ciclos de vida útil, la profundidad de descarga y los problemas ambientales generados por sus componentes tóxicos.

Con base en lo indicado por el Global Energy Storage Data Base del Departamento de Energía de los Estados Unidos (citado por Merino, 2020), en enero de 2016 había en el mundo 887 MW de potencia instalada de almacenamiento estacionario con tecnologías electroquímicas, teniendo un total de 1 700 MWh de energía de capacidad; no obstante, ya

en el verano del mismo año se contaba con 971 proyectos de almacenamiento estacionario que sumaban un total de 2 994 MW de potencia.

De esta potencia instalada, más del 65 % era Li-ion, teniendo el resto de las tecnologías porcentajes por debajo del 10 %. El dominio del Li-ion tiene su explicación en la madurez de la tecnología y la masiva instalación de baterías para servicios de regulación de frecuencia y calidad de red (el almacenamiento de electricidad distribuido).

Figura 4

Almacenamiento por medio de baterías



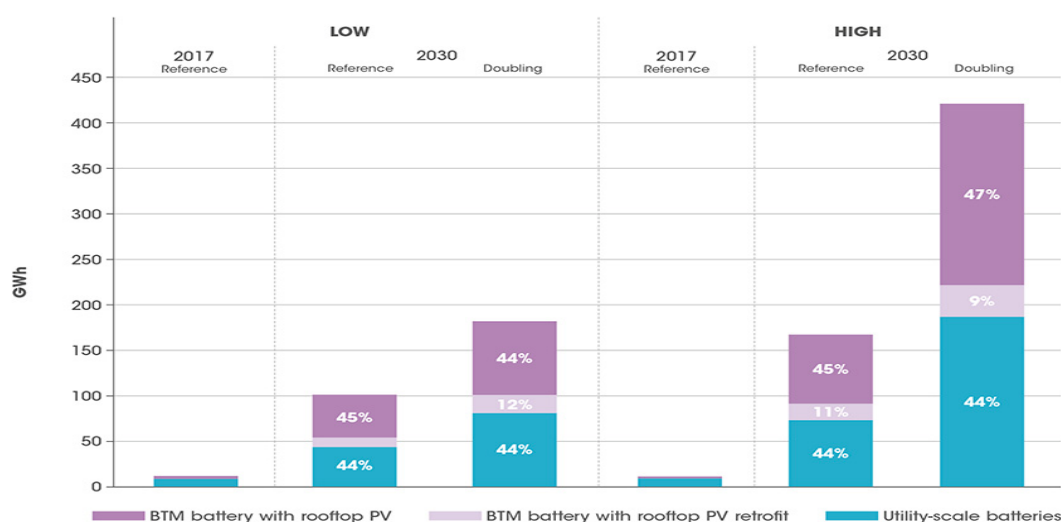
Fuente: Merino, 2020.

Por su parte, la Agencia Internacional de Energías Renovables (citada por Merino, 2020) considera que el almacenamiento de energía a gran escala es vital para satisfacer los picos en que se genera más energía de la que se consume. Al respecto, uno de los proyectos de mayor capacidad es el de la empresa Tesla para almacenar energía en baterías de ion-litio, que ronda en una capacidad de 130 MWh en Hornsdale, Australia. En Estados Unidos también se desarrolla un proyecto que se acerca a los 40 MWh en el cual se demuestra que

se reduce la congestión en la red y se ahorra en el consumo de combustibles fósiles un aproximado a los 2 millones de dólares.

En relación con lo expuesto, se considera un incremento de 40 % cada año hasta el año 2025 en el mercado de sistemas de almacenamiento de energía (Merino, 2020).

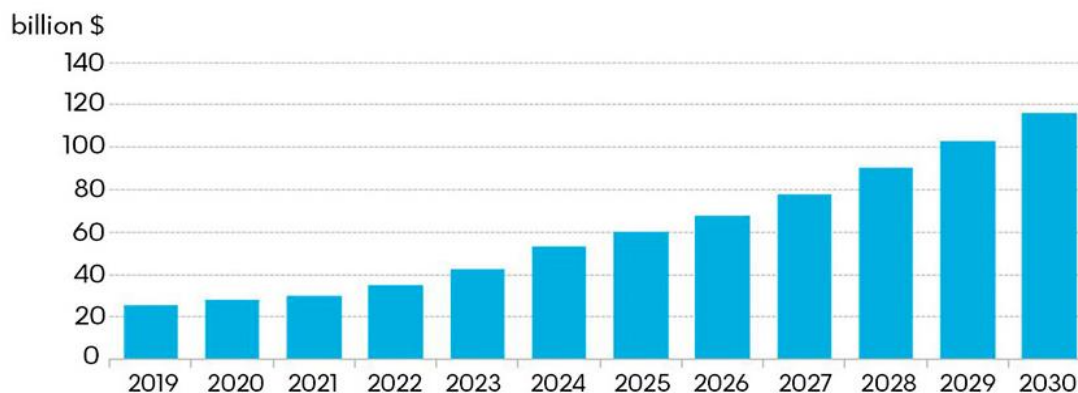
Figura 5
Proyección de crecimiento del almacenamiento 2017-2030



Fuente: Merino, 2020.

En junio de 2019, el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos publica un informe de manera que se proyectan los costos de almacenamiento de energía a gran magnitud, analizando los costos y eficiencia de las baterías ion-litio. Todos los estudios realizados arrojan como resultados una posible reducción en los precios de los sistemas (Merino, 2020).

Figura 6
Proyección en baterías de litio



Fuente: Merino, 2020.

De acuerdo con la figura 6, se proyecta que los sistemas de almacenamiento con baterías de ion-litio aumentarían considerablemente con el paso de los años, lo que genera mayor demanda del mercado e ingresos económicos por la venta de equipos. Asimismo, con base en lo anterior, se puede proyectar una disminución en los costos de los equipos de almacenamiento.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Analizar la viabilidad del almacenamiento de la energía generada por la planta hidroeléctrica Brasil, por medio de acumuladores de energía, de manera que se pueda suplir la demanda de los circuitos del patio de interruptores Brasil.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar la carga de los circuitos por ser alimentados mediante el sistema de almacenamiento, para dimensionar la capacidad de este.

- Identificar la generación de energía de la planta hidroeléctrica Brasil en sus distintos periodos y estaciones climáticas, mediante el análisis de datos históricos de generación en los últimos cinco años.
- Ejecutar un análisis de los beneficios de implementar un sistema de almacenamiento, mediante el estudio ingenieril de datos históricos y el sistema eléctrico de generación y distribución asociados.
- Definir la estructura de instalación del sistema de almacenamiento, de manera que su aplicación sea óptima en términos de economía y calidad de la energía.
- Realizar un análisis costo-beneficio de implementar el sistema de almacenamiento, para la CNFL.

1.6 Alcance

El desarrollo del proyecto tiene como finalidad el análisis de viabilidad de instalación de un sistema de almacenamiento ubicado en el patio de interruptores Brasil, esto mediante el estudio de datos de generación de la planta Brasil, así como la investigación de pérdidas en las líneas que conectan la subestación Lindora con el patio de interruptores Brasil, además de la investigación de consumos de los circuitos pertenecientes al patio de interruptores Brasil. Todos los análisis mencionados se pretenden llevar a cabo por medio de datos reales históricos, con el fin de contar con la veracidad de los datos obtenidos.

Asimismo, se busca lograr resultados con una viabilidad económicamente rentable, donde se pueda proponer la instalación de este sistema de almacenamiento con beneficios proyectados para la CNFL, de manera que se pueda pagar la inversión en años próximos y empezar a obtener ganancias económicas, además de que este sistema robustezca los activos

para el servicio al cliente, lo cual genera una mayor disponibilidad y calidad de energía hacia los clientes.

1.7 Limitaciones

Algunas limitaciones presentes son las variables en la generación de energía de la planta hidroeléctrica Brasil, tales como la disponibilidad del recurso hídrico, el cual varía de acuerdo con la estación climática y las salidas de línea a causa de fallas, de la misma forma la variación en el consumo de los clientes abastecidos por medio los circuitos del patio de interruptores Brasil.

Otros factores limitantes son la no existencia de este tipo de proyectos en desarrollo u operación por parte de distribuidoras, así como el poco equipo de almacenamiento en funcionamiento en Costa Rica. Además, a nivel país no se cuenta con proveedores nacionales de equipos robustos de almacenamiento como Power Pack, reduciendo las posibilidades de obtener asesorías técnicas sobre los sistemas que ofrecen físicamente, lo cual es una condición que limita a buscar la información solo mediante la web y los catálogos recibidos de proveedores.

1.8 Viabilidad

El estudio por realizar se fundamenta en datos reales tomados de los sistemas propios de la CNFL; al respecto, se cuenta con el apoyo de las autoridades correspondientes para intervenir en la base de datos de la empresa. Sin embargo, considerando que la base del proyecto es el estudio de viabilidad de aplicar un sistema de almacenamiento, es necesario resaltar que en la actualidad no se cuenta con un estudio detallado.

En cuanto a la viabilidad del desarrollo de este proyecto, es de gran importancia llevar a cabo el estudio al ser de gran valor técnico e ingenieril para la CNFL, pues los resultados que se puedan obtener sirven de insumo para proyectos similares futuros; además, si se demuestra que el desarrollo en campo del proyecto genera beneficios económicos para la CNFL, se consideraría la implementación de este.

Con respecto a la obtención de datos para ser analizados durante el estudio, se cuenta con el apoyo y la aprobación del personal de la CNFL, quienes están dispuestos a facilitar la información necesaria para la investigación y que podría utilizarse en la elaboración de la propuesta.

Económicamente, realizar el estudio no representa mayores costos en equipo y personal para la toma de datos, debido a que en la actualidad existen registros históricos, los cuales deben ser analizados.

1.9 Cronograma de ejecución

A continuación, se presenta el cronograma establecido para el desarrollo del proyecto.

Figura 7
Cronograma de desarrollo del proyecto

Objetivo	Tema	Fecha de entrega	Peso en de tarea en %
1	Analizar la viabilidad del almacenamiento de energía generada por la planta hidroeléctrica Brasil, por medio de acumuladores de energía, de manera que se pueda suplir la demanda de los circuitos del patio de interruptores Brasil.	30/3/2022	100,00%
1.1	Determinar la carga de los circuitos a ser alimentados mediante el sistema de almacenamiento, para dimensionar la capacidad de este.	30/8/2021	15,00%
1.1.1	Definir los datos históricos para determinar las carga a respaldar.	15/8/2021	7,50%
1.1.2	Obtener y analizar los históricos de demandas de los circuitos .	30/8/2021	7,50%
1.2	Identificar la generación de energía de la planta hidroeléctrica Brasil en sus distintos periodos y estaciones climáticas, mediante análisis de datos históricos de generación en los últimos cinco años.	17/10/2021	15,00%
1.2.1	Obtener y analizar los datos históricos de los últimos cinco años.	15/9/2021	3,75%
1.2.2	Considerar el aporte de energía generada por esta planta en los distintos periodos, y su relación con los consumos de los circuitos del PI Brasil.	30/9/2021	3,75%
1.2.3	Definir el tipo y capacidad del sistema de almacenamiento, así como la aplicación.	13/10/2021	3,75%
1.2.4	Determinar el periodo de carga y descarga de las baterías.	17/10/2021	3,75%
1.3	Ejecutar un análisis de los beneficios de implementar un sistema de almacenamiento, mediante el estudio ingenieril de datos históricos y el sistema eléctrico de generación y distribución asociados.	24/11/2021	15,00%
1.3.1	Investigar los costos de energía en los distintos periodos.	1/11/2021	3,75%
1.3.2	Analizar y cuantificar los datos de energía comprada al ICE.	10/11/2021	3,75%
1.3.3	Generar una propuesta de como mitigar el costo de la energía comprada.	18/11/2021	3,75%
1.3.4	Estudiar las salidas de línea de los circuitos pertenecientes al PI Brasil.	24/11/2021	3,75%
1.4	Definir la estructura de instalación del sistema de almacenamiento, de manera que su aplicación sea óptima en términos de economía y calidad de la energía.	20/12/2021	15,00%
1.4.1	De acuerdo con el análisis de uso de la aplicación del almacenamiento se debe de definir la colocación del sistema con respecto a los aspectos técnicos de importancia.	30/11/2021	5,00%
1.4.2	Analizar las pérdidas de energía desde la subestación Lindora hacia el PI Brasil y viceversa.	10/12/2021	5,00%
1.4.3	Estudiar el impacto positivo de respaldar los circuitos del PI Brasil con energía almacenada.	19/12/2021	5,00%
1.5	Realizar un análisis costo-beneficio de implementar el sistema de almacenamiento, para la CNFL.	15/1/2022	15,00%
1.5.1	Cotizar los precios de sistemas de almacenamiento requeridos.	5/1/2022	3,75%
1.5.2	Elegir la opción que cumpla con las características deseadas y costos accesibles.	10/1/2022	3,75%
1.5.3	Proyectar los beneficios a obtener a largo plazo a partir de la instalación de un sistema de almacenamiento.	12/1/2022	3,75%
1.5.4	Determinar el tiempo de recuperación de la inversión, con respecto a la vida útil de los equipos.	15/1/2022	3,75%
1.5.5	Envío para revisión por el tutor .	15/1/2022	
1.6	Desarrollo de conclusiones y recomendaciones	30/2/2022	15,00%
1.6.1	Determinar las conclusiones del proyecto	20/2/2022	7,50%
1.6.2	Determinar las recomendaciones del proyecto	30/2/2022	7,70%
1.7	Envío para revisiones finales	30/2/2022	10,00%

Fuente: Creación propia

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Almacenamientos en el área de generación Costa Rica

El almacenamiento es una práctica utilizada en distintas labores, una de estas se basa en almacenar energía y despacharla cuando se requiera.

Algunas formas de almacenar energía son las siguientes: por energía potencial (gravitacional, química, elástica, etc.), por energía cinética, o por medio de calor o frío. Entre los tipos de almacenamiento, los más antiguos son los sistemas de turbo-bombeo y los volantes de inercia, mientras que otros han surgido durante los últimos años (baterías).

A nivel mundial se utiliza en gran medida el almacenamiento de energía y Costa Rica no es la excepción, logrando avances en la optimización de la tecnología de las baterías.

Al respecto, el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) se emplea para aprovechar la energía excedente que no se vende en el Mercado Eléctrico Regional (MER) o se mantiene almacenada en las represas hidroeléctricas. En cuanto a esto, el CENCE necesita limitar las plantas de generación del ICE debido a que no puede controlar a las empresas generadoras privadas. Ahora bien, se proyecta un aumento en la generación distribuida, lo cual dispara la frecuencia de estos eventos, percibiendo así una disminución en las ventas de energía.

2.2 Tecnologías electroquímicas

Esta tecnología consiste en almacenar energía en celdas electroquímicas, las cuales también son capaces de entregar energía a base de reacciones químicas de reducción y oxidación entre los electrodos.

Cuando se tienen varias celdas conectadas eléctricamente, se obtiene una batería. Además, dependiendo de las distintas configuraciones que se les den a las celdas, se originan diferentes tipos de tensión de salida.

Asimismo, las baterías deben cumplir varias especificaciones eléctricas que con el pasar del tiempo han ido cambiando para la mejora de estas.

Para comprender de mejor manera los tipos de almacenamientos electroquímicos presentes en el mercado, a continuación, se citan diversos tipos de baterías.

2.2.1 Baterías de ácido-plomo

Las baterías de ácido-plomo (Pb-ácido) utilizan tecnologías más antiguas en relación con los sistemas de almacenamiento de energía. Su composición se basa en dos electrodos y un electrolito que interactúan en reacciones de oxidación y reducción (Quirós et al., 2018).

2.2.2 Baterías de sodio-azufre

De acuerdo con Quirós et al. (2018), otra tecnología es la de sodio azufre (NaS), la cual opera en altas temperaturas entre 300 y 350 °C, con el fin de mantener los electrodos en estado líquido. Igualmente, está compuesta por dos electrodos, uno de sodio fundido (ánodo) y el otro de azufre fundido (cátodo), que interactúan por medio de un electrolito sólido.

Es importante mencionar que este tipo de baterías se caracteriza por dos ventajas, una es que posee grandes capacidades de energía, además es capaz de brindar una respuesta rápida y precisa. Asimismo, la densidad de energía por kilogramo es alta (117 Wh/kg), lo cual hace que las instalaciones de las baterías NaS sean más pequeñas y fáciles de instalar.

También, el tiempo de descarga es aproximado a seis horas y cuenta con una alta eficiencia que oscila entre el 75 y 85 % y con capacidad de efectuar hasta 4 500 ciclos en un aproximado de quince años de vida.

2.2.3 Baterías de sodio-cloruro de níquel

Según Quirós et al. (2018), estas baterías son conocidas en el mercado como baterías ZEBRA (actividad de investigación de la batería de cero emisiones, por sus siglas en inglés).

Se conforman de un electrodo negativo de sodio fundido (Na), un electrodo positivo de níquel y cloruro de sodio (Ni-NaCl), un electrolito cerámico de beta alúmina y un segundo electrolito líquido compuesto de tetracloroaluminato de sodio (NaAlCl_4).

El buen comportamiento de los electrolitos a altas temperaturas es favorable, ya que la batería debe operar a temperaturas entre 270 y 350 °C, lo cual hace necesario que la batería se instale con un equipo de regulación de temperatura interna.

2.2.4 Baterías de níquel-cadmio

Esta batería es de las más estudiadas y aplicadas. En cuanto a su principio de funcionamiento, es similar al de las otras tecnologías de este tipo. La separación de los electrodos es mediante una membrana permeable que realiza la función de electrolito, a base de hidróxido de potasio acuoso (Quirós et al., 2018).

2.2.5 Baterías de hidruro de níquel-metal

Son baterías con funcionamiento electroquímico, las cuales aprovechan las reacciones de carga y descarga que ocurren entre el electrodo positivo: hidróxido de óxido de níquel y el electrodo negativo: una aleación de absorción de hidrógeno (NHMx), mediante un electrolito constituido de hidróxido de potasio acuoso (KOH) (Quirós et al., 2018).

2.2.6 Baterías de iones de litio

Quirós et al. (2018) indican que esta batería cuenta con una antigüedad aproximada de tres décadas, convirtiéndose rápidamente en una opción de almacenamiento atractiva para el mercado, por lo cual es de las opciones más utilizadas en aplicaciones de almacenamiento gracias a su alta densidad energética y eficiencia, que supera un 90 %.

Su desarrollo permite que se comercialice en equipos electrónicos como celulares, computadoras, tabletas, entre otros. Además, en los últimos años su campo se ha expandido, al ser con frecuencia utilizada en vehículos eléctricos y en sistemas de almacenamiento comerciales e industriales.

2.2.7 Batería de fosfato de hierro (LFP)

La batería LFP contiene un cátodo de LiFePO_6 y usualmente emplea un ánodo de grafito y un electrolito de carbonatos de litio. Su característica principal es tener una gran densidad de potencia, pero una baja densidad energética, por lo general para regular la frecuencia (Quirós et al., 2018).

2.2.8 Beneficios del almacenamiento

Los sistemas de almacenamiento pueden generar beneficios más allá de la visualización de su utilidad común, convirtiéndose en una tecnología con un papel importante en varios campos. Al respecto, Mayoral (2019) explica:

La tecnología de almacenamiento de energía puede desempeñar un papel prominente en la cadena completa desde la generación, transmisión y distribución hasta el usuario final. La utilización del almacenamiento de energía a gran escala puede ayudar a pasar de la generación centralizada a la distribuida, lo que ofrece varios beneficios, como

aumentar el acceso a la energía y la disponibilidad en áreas remotas, calidad, confiabilidad, seguridad energética y mejor rendimiento.

Asimismo, Mayoral (2019) señala que los beneficios de utilizar sistemas de almacenamiento se clasifican en tres: usuarios de electricidad, generadores de energías renovables y compañías de transmisión y distribución, los cuales se detallan a continuación.

2.2.8.1 Usuarios de electricidad

- Mejora la calidad y aumenta la fiabilidad de la energía, por lo tanto, se tiene menos costo por interrupción y mantenimiento en cualquier proceso.
- Reducción de la carga máxima y, por consecuencia, se tiene una reducción en los cargos por demanda.
- Posibilita la utilización de energías renovables (Mayoral, 2019).

2.2.8.2 Generadores de energías renovables

- Utilización mejorada de la capacidad.
- Reducción de horas de análisis de la red.
- Regulación del voltaje y frecuencia en el punto de inyección.
- Nivelación de la carga y una mejor capacidad de pronosticar los requerimientos necesarios por los sistemas de redes (Mayoral, 2019).

2.2.8.3 Compañías de transmisión y distribución

- Reduce la necesidad de reserva de contingencia.
- Capacidad para diversificar los recursos de generación.

- Regulación de tensión y frecuencia de red (Mayoral, 2019).

2.3 La importancia del almacenamiento de energía

Los sistemas de almacenamiento de energía son un gran avance tecnológico para la humanidad al desempeñar un papel importante en la unificación, distribución y ampliación de la capacidad de los sistemas de generación distribuida. Por medio de estos sistemas es posible disminuir y optimizar el uso de la generación, porque se puede generar la energía, cargar a los acumuladores y despachar cuando exista más necesidad o sea de mayor costo, además de contribuir con la disminución de los impactos ambientales (WEG.NET, s.f.).

2.4 Importancia de la batería solar

Corta de picos: Se refiere a nivelar los picos en el uso de electricidad por parte de los consumidores de energía industriales y comerciales. Los picos de consumo de energía son relevantes en términos de estabilidad de la red, pero también afectan los costos de adquisición de energía.

Este proceso contempla el almacenamiento de energía en las instalaciones cargando las baterías cuando las tarifas eléctricas están en su punto más bajo (periodo nocturno) para despachar en horas que dicha tarifa se encuentra a más alto costo (periodo punta). Además, se utilizan esas mismas baterías para evitar pagar precios máximos durante las horas del día en que la electricidad es más cara. Cabe destacar que la reducción de picos permite evitar o reducir los cargos por demanda típica de las tarifas eléctricas comerciales e industriales en América Central. Al respecto, los cargos por demanda son comunes y especialmente pronunciados en Costa Rica.

Cambio de carga: Esta estrategia cambia el consumo de energía de un momento a otro para evitar pagar altos precios, lo cual es particularmente útil en Costa Rica, Honduras y Nicaragua, donde las diferencias en el precio de la energía entre horas del día son muy significativas. En las soluciones más sofisticadas, el cambio de carga también tiene en cuenta la energía solar o los generadores.

2.4.1 Soluciones de almacenamiento de baterías comerciales e industriales

A medida que el número de paneles solares en uso aumenta drásticamente en Centroamérica, la energía renovable ejerce una presión adicional sobre la red. La estructura de las tarifas de la factura de servicios públicos ya refleja elementos clave, los cuales hacen que el costo de la electricidad sea uno de los más altos del mundo. Las tarifas comerciales e industriales que incluyen cargos por demanda y distintos precios de la energía en las horas pico y en las horas de menor actividad contribuyen a precios altísimos.

De este modo, la energía solar, aunque es fundamental para controlar los costos y crear energía sostenible, presiona aún más el sistema energético. Pueden resultar tasas de demanda más caras y diferencias extremas entre los costos de energía punta y no punta (Avolta Energy, 2020).

2.5 Costos de energía en los distintos periodos

Con el fin de comprender los tipos de facturación aplicados en el país, así como algunas definiciones específicas, es necesario conocer el procedimiento y precios que deben ser tomados en cuenta para el análisis de costos de compra de energía de la CNFL al ICE y venta a los diferentes clientes. Por lo tanto, a continuación, se muestran las siguientes definiciones según el ICE (2021).

2.5.1 Cargo por demanda

La demanda para facturar es la potencia más alta registrada para cualquier intervalo de quince minutos del mes por facturar y del período horario correspondiente (ICE, 2021).

2.5.2 Definición de horario

En cuanto al horario, el ICE (2021) detalla lo siguiente:

Período punta: Se define como el comprendido entre las 10:01 y las 12:30 horas y entre las 17:31 y las 20:00 horas. La demanda para facturar es la máxima potencia registrada durante el mes, exceptuando la registrada los sábados y domingos.

Período valle: Es el comprendido entre las 6:01 y las 10:00 horas y entre las 12:31 y las 17:30 horas. La demanda para facturar es la máxima potencia registrada durante el mes.

Período nocturno: Se refiere al comprendido entre las 20:01 y las 6:00 horas del día siguiente. La demanda para facturar es la máxima potencia registrada durante el mes. Estos periodos no aplican para la tarifa residencial horaria.

2.5.3 Tarifas

La CNFL es una empresa distribuidora de energía a clientes residenciales, comerciales e industriales de la GAM, para lo cual compra aproximadamente un 89 % al ICE, ya que el otro 11 % se obtiene por medio de las plantas de generación pertenecientes a la compañía, de manera que la compra de energía al ICE es facturada mediante la tarifa T-CB.

Con base en lo anterior, para el desarrollo del modelo económico del proyecto, se tomó como referencia el precio del kWh con la tarifa T-CB porque cada kWh generado por

una planta o comprado en otro periodo de menor valor es un ahorro en el pago de la factura de la CNFL al ICE.

2.5.4 Tarifa T-CB: de ventas a ICE distribución y a la CNFL

En relación con esta tarifa, el ICE (2021) indica:

A. Aplicación: Se utiliza para el suministro de energía y potencia en media tensión a la CNFL y al servicio de distribución del ICE.

B. Características del servicio:

Medición: Un sistema integral compuesto por los sistemas de medición, a media tensión, monofásico o trifásico (tres o cuatro hilos), ubicados en los puntos de entrega (barras de media tensión de subestaciones de transmisión del ICE) a la CNFL y al servicio de distribución del ICE.

Disponibilidad: En barras de media tensión de subestaciones de transmisión del ICE.

Tabla 1
Tarifa T-CB I semestre 2022

	2022						
	<i>Enero</i>	<i>Febrero</i>	<i>Marzo</i>	<i>Abril</i>	<i>Mayo</i>	<i>Junio</i>	<i>Julio</i>
Energía Punta	46,73	46,73	46,73	47,16	47,16	47,16	43,50
Energía Valle	38,29	38,29	38,29	38,64	38,64	38,64	35,67
Energía Noche	32,51	32,51	32,51	32,81	32,81	32,81	30,28
Potencia Punta	2478,51	2478,51	2478,51	2501,48	2501,48	2501,48	2309,09
Potencia Valle	2478,51	2478,51	2478,51	2501,48	2501,48	2501,48	2309,09

Fuente: ARESEP, 2021.

2.5.5 Tarifa de transmisión de electricidad (T-TE)

Respecto a esta tarifa, el ICE (2021) establece:

Aplicación: Para el transporte de electricidad al sistema de distribución del ICE, empresas distribuidoras y clientes directos del servicio de generación del ICE que retiren energía del sistema de transmisión.

Cargo variable: ₡ 7.27 por cada kWh que retiren del servicio de transmisión del ICE.

Tabla 2
Cargo fijo en colones

Empresa	Costo (₡)
ICE	1 421
CNFL	1 141

Fuente: ICE, 2021.

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación

El presente trabajo es una investigación aplicada con enfoque tecnológico, ya que se buscó abordar problemas en específico y darles una posible solución, de esta manera lo indica Murillo (2008): “[...] se caracteriza porque busca la aplicación o utilización de los conocimientos adquiridos, a la vez que se adquieren otros, después de implementar y sistematizar la práctica basada en investigación” (p. 5).

Por lo tanto, se puede afirmar que este tipo de investigación se ajustó al desarrollo de este proyecto en el cual se analizó con base en datos teóricos y aplicados a la ingeniería.

Además, teniendo como subtipo de investigación el tecnológico, la investigación aplicada generó una influencia positiva en la parte práctica.

3.2 Alcance de la investigación

Para una mejor comprensión de la metodología planteada, fue necesario establecer el alcance de la investigación, el cual abarcó la recolección de datos obtenidos mediante mediciones y registros históricos que posteriormente se analizaron con el fin de solucionar la problemática estudiada y determinar la viabilidad que ofrece aplicar el sistema de almacenamiento propuesto.

3.3 Fuentes de información

Es preciso mencionar que los datos empleados como fuentes de información en esta investigación se obtuvieron de fuentes primarias, secundarias y terciarias.

En el caso de las fuentes primarias, derivaron de archivos creados durante el desarrollo del proyecto; respecto a las fuentes secundarias, procedieron de investigaciones

halladas en la web y, finalmente, en cuanto a las terciarias, muchas veces fueron la consolidación de las anteriores o información de manuales.

Se hace énfasis en las informaciones primarias, ya que fueron necesarias para conocer los comportamientos de la potencia y energía, así como otros temas de interés para el trabajo. Además, según Miranda y Acosta (2008), las fuentes primarias “son aquellas que contienen información nueva y original, que no ha sido sometida a ningún tratamiento posterior” (p. 12).

Basándose en lo señalado por el autor, los datos de fuentes primarias que tuvieron un lugar primordial en el desarrollo de la investigación fueron los proporcionados por el personal de la empresa CNFL, lugar donde se desarrolló el análisis de viabilidad.

3.4 Variables

Entre las variables planteadas, se encuentran: factores climáticos, períodos pico de consumo energético, tipo de carga eléctrica, costos de energía, tecnología de almacenamiento, pérdidas de energía, entre otras, siendo estas partes importantes en el desarrollo de la investigación, ya que tuvieron la capacidad de influir y guiar en el proceso de análisis de la viabilidad, para así lograr la conclusión del objetivo general.

3.5 Sujeto de información

El propósito de este apartado es determinar quiénes son las personas físicas o jurídicas objeto de estudio.

Así, en el caso de este proyecto, el objeto de estudio fue la empresa CNFL, específicamente la generación y distribución de la planta hidroeléctrica Brasil, la cual se ubica en Santa Ana, San José, Costa Rica.

3.6 Estrategia metodológica

En cuanto a las estrategias usadas durante el desarrollo de este proyecto para cumplir con los objetivos formulados en el mismo, se citan las siguientes:

1. Análisis del tema de investigación: Es muy importante analizar los factores y variables que pueden afectar el desarrollo de la investigación; por consiguiente, se realizó un análisis para determinar el tema del proyecto.

2. Identificar la problemática: Tener bien definido el problema por solucionar fue vital para darle el enfoque a la investigación e identificar lo que se pretende solucionar.

3. Análisis del problema: Identificado el problema, se analizó de forma más minuciosa para determinar las variables que afectan el mismo y las posibles soluciones.

4. Elaboración de los objetivos: Fue indispensable definir el objetivo general y los específicos, los cuales guiaron el proyecto y se probaron en las conclusiones.

5. Metodología: En lo que concierne a este apartado, se llevó a cabo la recolección de información y análisis de esta, y como herramienta principal se trabajó con los cálculos y datos técnicos.

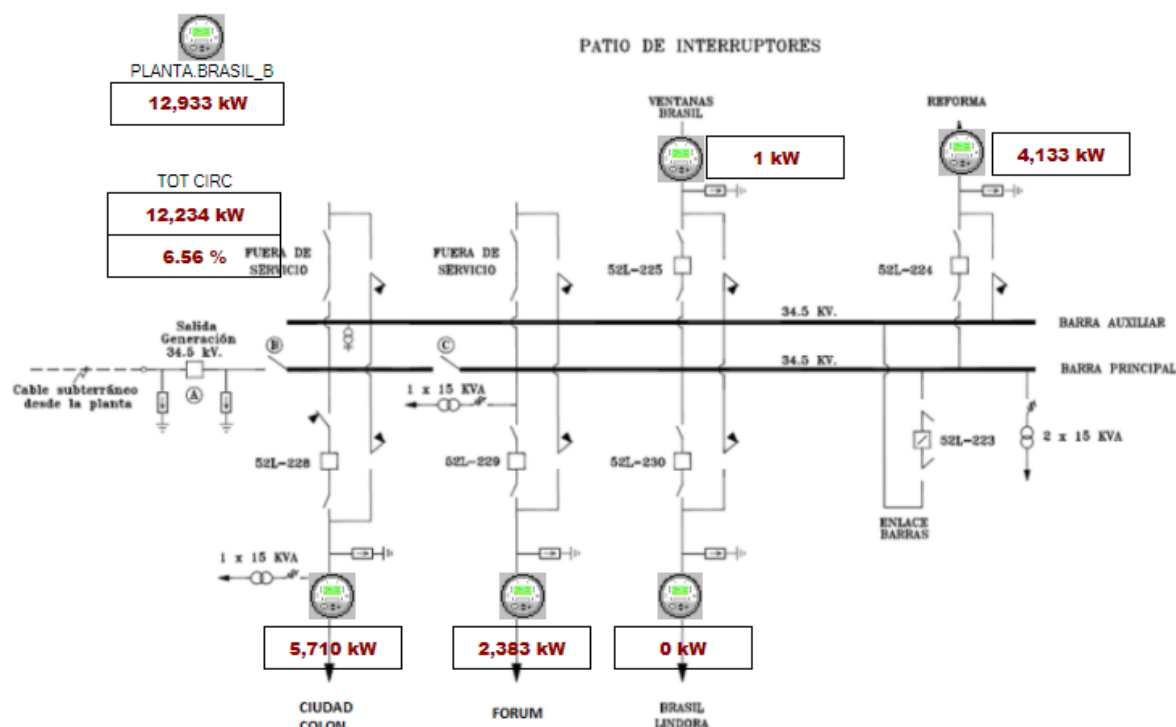
CAPÍTULO 4: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Demandas de circuitos pertenecientes al patio de interruptores Brasil

El patio de interruptores Brasil está compuesto por tres circuitos (Ciudad Colón, Reforma y Fórum) de entrega de energía a clientes de la CNFL, además del circuito Ventanas, el cual no está en uso. Así mismo, este patio se alimenta por medio de la generación de la central generadora de Brasil. Por otra parte, también se cuenta con el circuito Brasil-Lindora, el cual es bidireccional.

Figura 8

Diagrama del patio de interruptores Brasil



Fuente: Sistema de medición y calidad de la energía de la CNFL.

Se realizó un análisis de datos de las demandas de todos los circuitos del patio de interruptores Brasil, con el fin de tener una referencia de las cargas de la época seca y

lluviosa. De este modo, se analizaron las cargas de clientes residenciales, comerciales e industrias conectados a dichos circuitos.

Cabe mencionar que se tomó el año 2019 como base para efectuar el análisis de estos datos, lo anterior según una investigación del histórico de los circuitos de los últimos cuatro años, llevada a cabo por medio del personal del Centro de Control de Energía (CCE) de la CNFL. No se consideraron los otros años porque en el 2017 y 2018 ocurrieron varios eventos y respaldos de cargas, lo que alteró los consumos reales del patio de interruptores; mientras que el 2020 fue afectado por el inicio y desarrollo de la pandemia del COVID-19, lo cual causó una variación en los consumos típicos.

La energía requerida por estos circuitos es suplida por la generación de la planta hidroeléctrica Brasil, la misma tiene una capacidad de generar 24.5 MW como máximo. No obstante, debido a que esta planta no tiene generación constante y se trabaja de acuerdo con el recurso hídrico presente, cuando se encuentra fuera de servicio o la generación es menor a la demanda de los circuitos, se recibe la energía proveniente desde la subestación Lindora, siendo esta energía descargada y comprada de las barras de alta tensión del ICE.

A continuación, se muestran gráficos relacionados a los promedios de consumo de estos circuitos.

4.1.1 Circuito Brasil–Lindora

Este circuito fue el más significativo para el análisis de viabilidad, al presentar la particularidad de que la demanda se comporta de forma bidireccional entre el patio de interruptores Brasil y la subestación Lindora. Así, se envía la energía que no se consume en los circuitos del PI Brasil a la subestación mencionada, para ser distribuida en otros circuitos; mientras que se recibe la energía necesaria para solventar las cargas de los demás circuitos

del patio de interruptores Brasil, cuando la planta no puede abastecer el 100 % o por alguna causa no se encuentre generando.

Figura 9

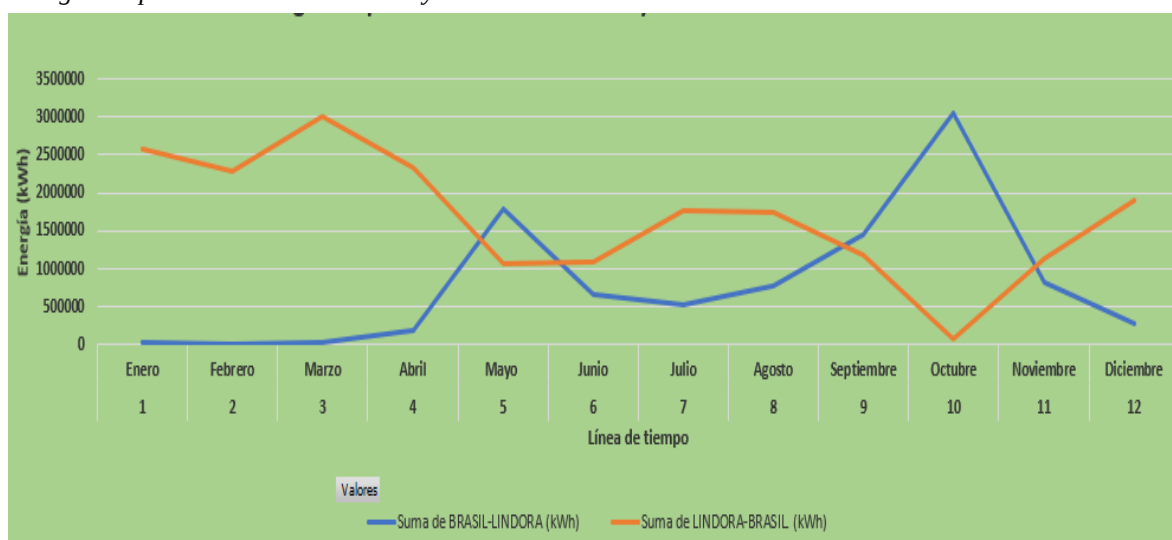
Demanda promedio del circuito Brasil-Lindora 2019



Fuente: Sistema de medición y calidad de la energía CNFL.

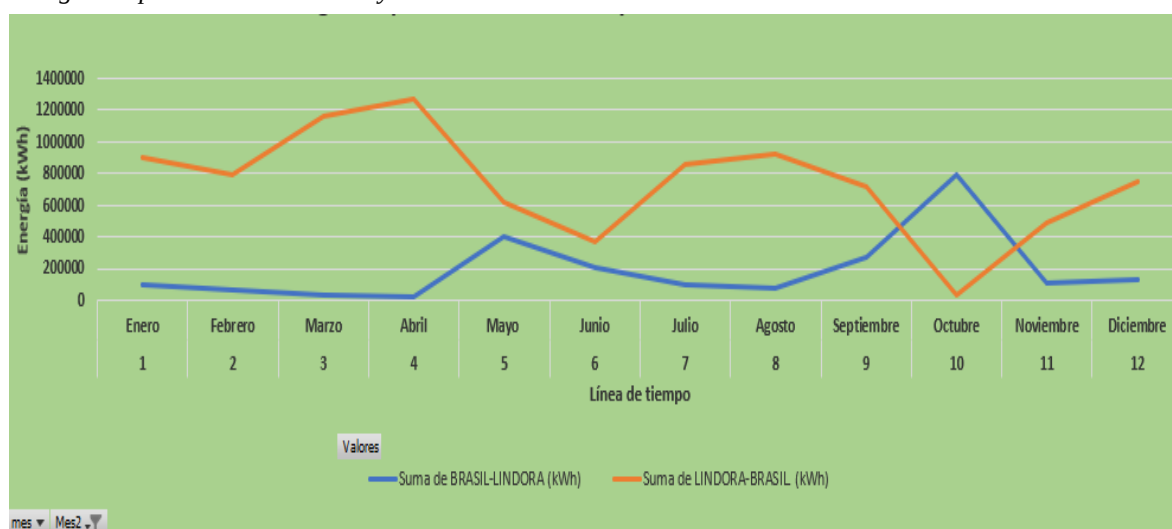
Se observa que, en el primer cuatrimestre del año 2019, el circuito Brasil-Lindora presentó un comportamiento donde la energía exportada se encontraba muy por debajo de la energía importada; así mismo, para el segundo cuatrimestre experimentó un comportamiento descendente de la energía importada y un incremento en la energía exportada; ya para el último cuatrimestre aumentó de manera notable el envío de energía, siendo evidentemente superior a la ingresada. El comportamiento de este año fue típico de este circuito, de acuerdo con la influencia de las lluvias sobre la generación de la planta Brasil en las distintas estaciones del año.

Como parte del análisis de este circuito y su trasiego de energía, se realizó un estudio del mismo año 2019 en términos de energía y de acuerdo con los tres periodos.

Figura 10*Energía del periodo nocturno enviada y recibida de Brasil-Lindora*

Fuente: Sistema de medición y calidad de la energía CNFL.

Para el periodo nocturno, fue mayor la energía que se importó de Lindora hacia Brasil a la energía que se exportó de Brasil a Lindora; en este caso solo los meses de mayo y octubre lograron superar la energía exportada a la importada.

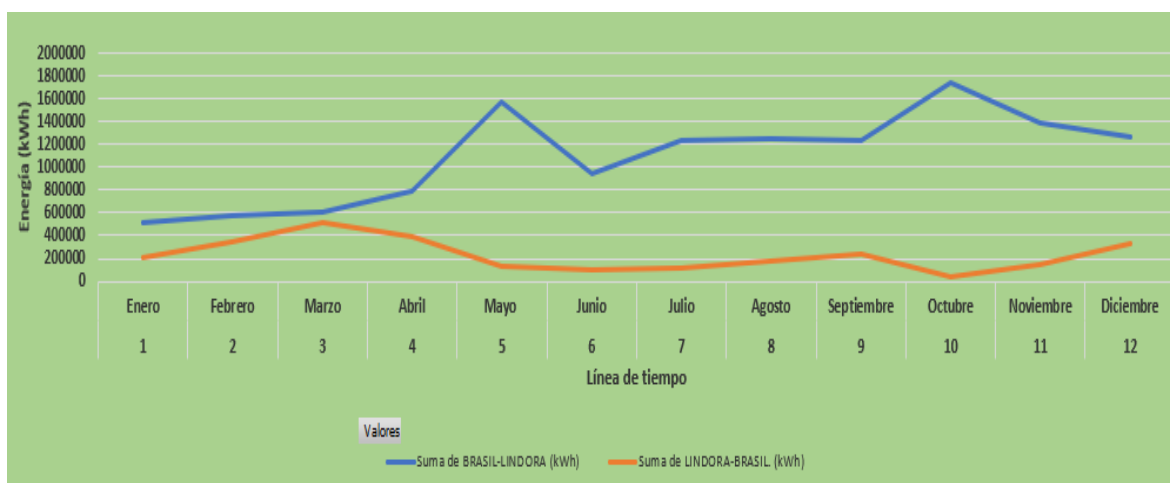
Figura 11*Energía del periodo valle enviada y recibida de Brasil-Lindora*

Fuente: Sistema de medición y calidad de la energía CNFL.

En el periodo valle predominó la importación de energía desde la subestación Lindora, de manera que solo el mes de octubre superó la energía enviada a la recibida.

Figura 12

Energía del periodo punta enviada y recibida de Brasil-Lindora



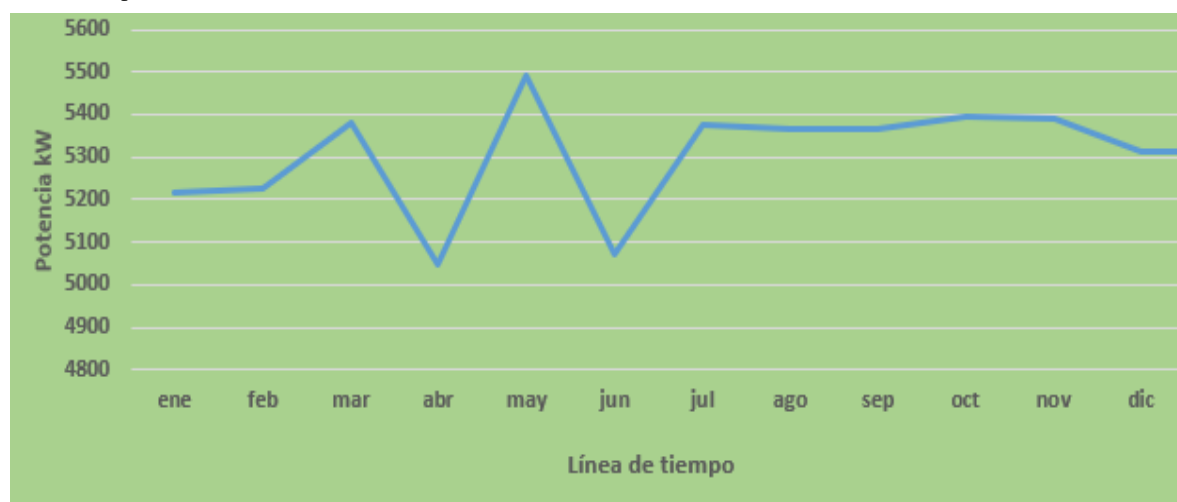
Fuente: Sistema de medición y calidad de la energía CNFL.

En el periodo punta se observó un comportamiento predominante de exportación de energía, debido a que la planta de generación se encontraba normalmente generando dentro de este periodo; además, la generación de la planta fue mayor a la consumida por los circuitos del patio de interruptores Brasil, por lo que como se aprecia fue superior el envío de energía hacia Lindora y lo recibido fueron valores muy bajos.

4.1.2 Circuito Ciudad Colón

El circuito Ciudad Colón fue el que mostró más alto consumo, siendo el de mayor cantidad de clientes, aproximadamente 8 027 clientes residenciales, 957 comerciales y 11 industriales, convirtiéndose así en el circuito de más importancia.

Figura 13
Demanda promedio del circuito Ciudad Colón 2019



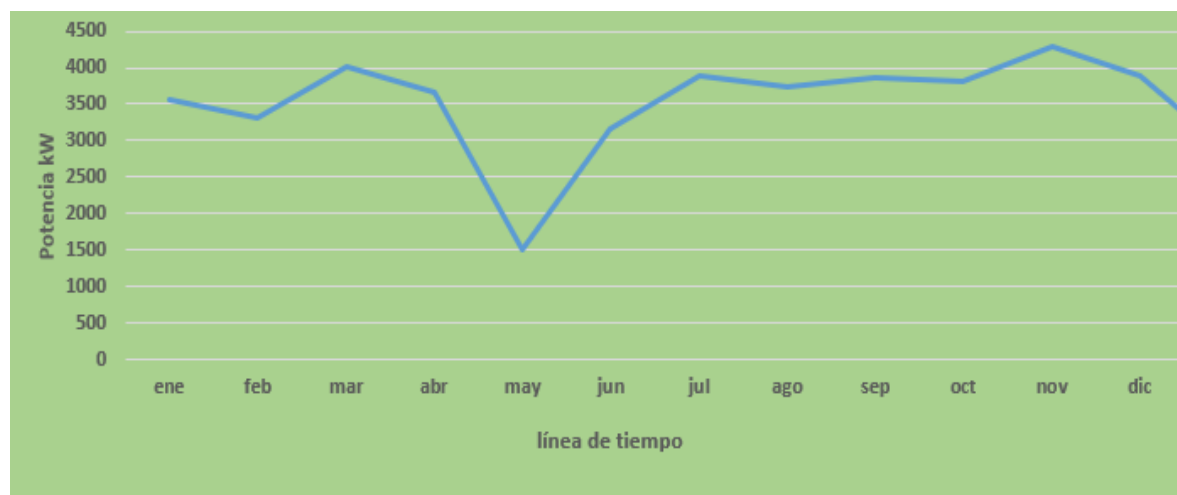
Fuente: Sistema de medición y calidad de la energía CNFL.

En el gráfico anterior, se observa el promedio de potencia consumida por el circuito Ciudad Colón en el año 2019, demostrando que el consumo promedio se mantuvo aproximadamente entre los 5 000 kW y los 5 500 kW.

4.1.3 Circuito Fórum

Este circuito cuenta con un aproximado de 712 clientes residenciales, 202 comerciales y 12 industriales, siendo el circuito del PI Brasil de más baja clientela, pero no menos importante.

Figura 14
Demanda promedio del circuito Fórum 2019



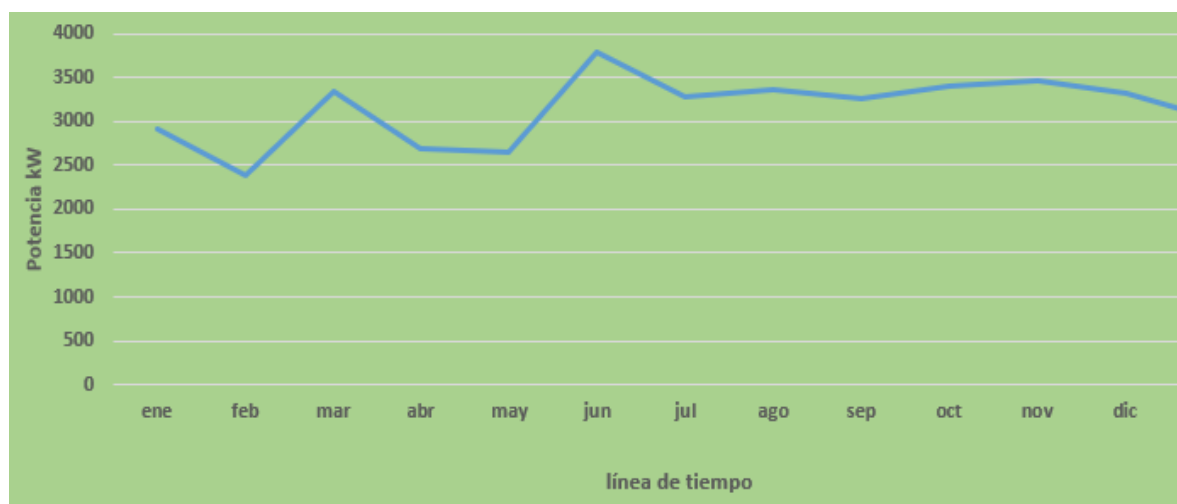
Fuente: Sistema de medición y calidad de la energía CNFL.

Según se representa en la figura 14, el comportamiento de demanda promedio del circuito Fórum fue cercano a los 3 000 kW a excepción del mes 5 (mayo), donde se dio una baja en el consumo.

4.1.4 Circuito Reforma

El circuito Reforma tiene un aproximado de 4 703 clientes residenciales, 396 comerciales y 9 industriales, lo cual significa que es un circuito para considerar como importante por la cantidad y tipo de clientes que posee.

Figura 15
Demanda promedio del circuito Reforma 2019



Fuente: Sistema de medición y calidad de la energía CNFL.

Este circuito presentó una demanda promedio entre los 2 500 kW y los 4 000 kW para el año 2019 según se aprecia en el gráfico anterior.

4.2 Generación en la planta hidroeléctrica Brasil 2016-2020

La planta hidroeléctrica Brasil es una de las plantas de mayor importancia, ya que se encuentra entre las tres plantas que más generación aportan a la factura de compra de energía por parte de la CNFL al ICE.

Cabe mencionar que las plantas de la CNFL comúnmente mantienen una generación tipo “filo de agua”, la cual se basa en colocar la máxima energía en las horas punta, debido a que los embalses son de bajo almacenamiento. En consecuencia, la planta Brasil mantiene una generación maximizada en las horas punta principalmente; por su parte, cuando se cuenta con recurso hídrico, se aprovecha para generar en horas valle, horas en las cuales también se trata de colocar energía de acuerdo con el comportamiento de la máxima demanda del ICE;

además, se genera en algunas horas nocturnas cuando existe bastante recurso hídrico, como lo es en la temporada lluviosa.

Como parte de la investigación y la recopilación de datos con respecto a la energía consumida por los circuitos conectados al patio de interruptores Brasil, se obtuvieron los registros del comportamiento de generación de energía y potencia de la planta hidroeléctrica Brasil pertenecientes a los últimos cinco años (2016-2020). Estos datos se analizaron mediante la representación gráfica de energía y potencia versus tiempo, haciendo el análisis de energía en los tres distintos periodos de estos años con el fin de observar el comportamiento de generación según cada periodo.

Figura 16

Energía mensual generada por la PH Brasil en periodo punta



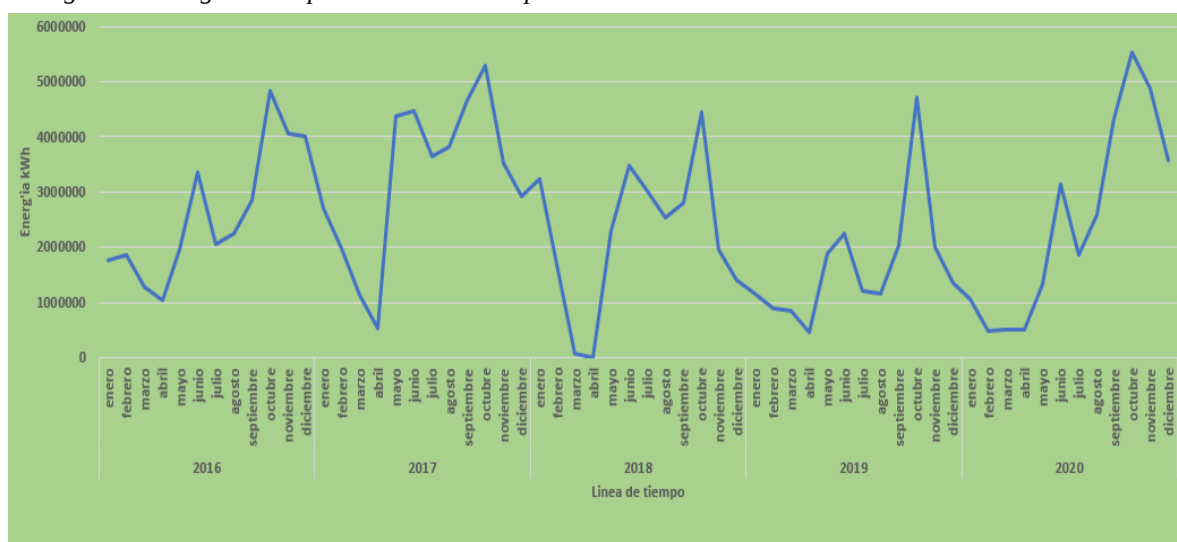
Fuente: Sistema de medición y calidad de la energía CNFL.

En el gráfico anterior se muestra la generación de energía de la planta Brasil en periodo punta de los años en estudio (2016, 2017, 2018, 2019 y 2020). Esta generación mensual se presentó por lo general entre los 2.5 GWh a los 4 GWh. De acuerdo con el gráfico,

fueron notables los bajos niveles de energía para los primeros meses del año, donde comúnmente se dan valores de 2,5 GWh, y los valores muy bajos en abril de 2017 y marzo-abril de 2018, debido a mantenimientos programados de la planta; así como picos de alta generación para los meses con más precipitaciones del año, como lo son septiembre y octubre.

En términos generales, esta planta experimentó comportamientos estables de generación de energía en los periodos punta, ya que la presencia de generación en este periodo fue muy constante, cuando las condiciones climáticas y el estado de operatividad de la unidad lo permitían, debido a que desde el Centro de Despacho de Generación, y en coordinación con la planta, se optimizó la generación, realizando la práctica de embalsar para generar en estas horas de mayor valor de la tarifa, de manera que solo por una falla fuera del alcance de estos controles o por falta total del recurso hídrico, lo que no es común, se dejará de generar en este periodo.

Figura 17
Energía mensual generada por la PH Brasil en periodo valle

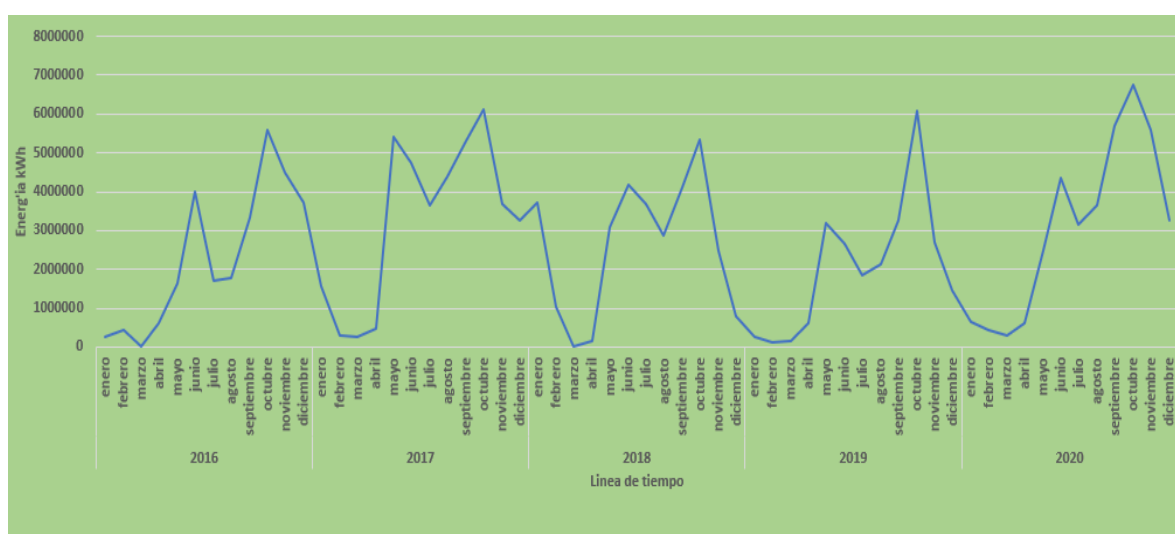


Fuente: Sistema de medición y calidad de la energía CNFL.

El periodo valle presentó una mayor fluctuación en los datos de energía mensuales que el periodo punta, pues, aunque también se rige de acuerdo con la época seca y lluviosa, así como se aprecia la influencia de los mantenimientos de la unidad generadora, se observó más desde 1 GWh y hasta aproximadamente los 5 GWh durante los cinco años consecutivos en estudio.

Figura 18

Energía mensual generada por la PH Brasil en periodo nocturno



Fuente: Sistema de medición y calidad de la energía CNFL.

La energía mensual generada en periodo nocturno, de acuerdo con los años en estudio, presentó un comportamiento casi definido. De este modo, en enero se registró una generación cercana a 1 GW en su mayoría, ya para los siguientes dos meses bajó considerablemente, pero empezó a subir en el mes de abril hasta darse un pico en el mes de junio que se aproximó a los 4 GWh en su mayoría, sin embargo, de nuevo se experimentó una tendencia a la baja en julio y agosto entre los 2 GWh y los 3 GWh, pero subió considerablemente en los meses

de septiembre, octubre y noviembre, siendo octubre el mes con más generación y superando los 5 GWh en todos los casos.

Además, a partir de los anteriores gráficos y su análisis, se llevó a cabo un estudio más detallado sobre la generación de esta planta en términos de potencia, para lo cual se elaboró una tabla resumen donde se exponen datos aproximados del comportamiento típico de la generación durante los años en estudio, asimismo los datos se dividieron por meses correspondientes a la estación seca, la estación de transición de época seca a lluviosa y la estación lluviosa.

4.2.1 Comportamiento de la potencia generada por la planta Brasil versus la demanda del patio de interruptores Brasil

Figura 19

Consumo anual de energía del PI Brasil



Fuente: Creación propia.

Durante el año 2019, en los circuitos del PI Brasil se consumió un aproximado de 99.992.917 kWh, siendo aportado el 84,83 % por la planta Brasil y el restante 15,07 % se importó desde la subestación Lindora (energía comprada al ICE).

Por otra parte, y después de obtener los datos de consumo de los circuitos del PI Brasil y la generación de PH Brasil, quedó claro que en las horas punta se cubrió la demanda de estos circuitos con la planta e inclusive se generó un excedente hacia la subestación Lindora prácticamente durante todo el año, solo se requirió energía cuando la planta está fuera de servicio por mantenimiento programado o por salidas de línea provocadas por fallas, lo que es un porcentaje muy bajo (ver figura 29).

De acuerdo con lo anterior, lo más viable es exportar la energía que se almacene y se pretenda vender en periodo punta a la subestación Lindora para ser distribuida en los circuitos de esta, donde comúnmente se requiere energía según el gráfico de la figura 20.

Tabla 3*Análisis de la frecuencia de generación de la PH Brasil 2016-2020*

Enero-febrero-marzo				Abril-mayo-junio-julio			Agosto-septiembre-octubre-noviembre-diciembre		
Año	Punta	Valle	Nocturno	Punta	Valle	Nocturno	Punta	Valle	Nocturno
2016	14 MW de forma constante	14 MW poco frecuente	Normalmente 0 MW, eventualmente 14 MW	14 MW de forma constante	Frecuentemente 14 MW	Muy baja frecuencia	24 MW de forma constante	Frecuentemente entre 14 y 24 MW	Normalmente 0 MW, eventualmente 14 MW
2017	14 MW de forma constante	14 MW poco frecuente	Normalmente 0 MW, eventualmente 14 MW	24 MW de forma constante	14 MW de forma constante	14 MW poco frecuente	24 MW de forma constante	Frecuentemente entre 14 y 24 MW	Frecuentemente entre 14 y 24 MW
2018	Constantemente entre 18 y 24 MW	Frecuentemente 14 MW	Muy baja frecuencia	24 MW de forma constante	Frecuentemente entre 14 y 24 MW	Entre 14 y 24 MW poco frecuente	Constante entre 14 y 24 MW	Frecuentemente entre 14 y 24 MW	14 MW poco frecuente
2019	Constantemente entre 14 y 24 MW	14 MW poco frecuente	Normalmente 0 MW	Entre 4 y 24 MW constantemente	Poco frecuente entre 14 y 24 MW	14 MW poco frecuente	Constantemente 24 MW	Constantemente 24 MW en octubre, frecuente el resto de los meses	Poco frecuentemente entre 14 y 24 MW
2020	Constantemente entre 18 y 22 MW	Entre 14 y 24 MW poco frecuente	Normalmente 0 MW, eventualmente 14 MW	Entre 14 y 24 MW constantemente	Frecuentemente entre 14 y 24 MW	14 MW frecuentemente	Constantemente 24 MW	Frecuentemente entre 14 y 24 MW	Frecuentemente entre 14 y 24 MW

Fuente: Creación propia.

4.3 Elección de la capacidad de almacenamiento

Con el fin de dimensionar la capacidad del sistema de almacenamiento de energía, se consideraron tres criterios principales: la disponibilidad de energía excedente para almacenar, la demanda de energía en la subestación Lindora y el espacio físico en el PI Brasil.

4.3.1 Carga de circuitos en el PI Brasil versus la generación de la planta Brasil

Con base en el análisis de los circuitos conectados al patio de interruptores Brasil, así como de la generación de la planta hidroeléctrica Brasil, se obtuvo como resultado que el consumo máximo de este patio fue alrededor de 15 MW en periodo punta, lo cual fue superado por la generación de la planta (24,5 MW), ya que en la mayoría de estos periodos se encontraba generando energía y superando el consumo de los circuitos, por lo que el excedente se enviaba hacia la subestación Lindora.

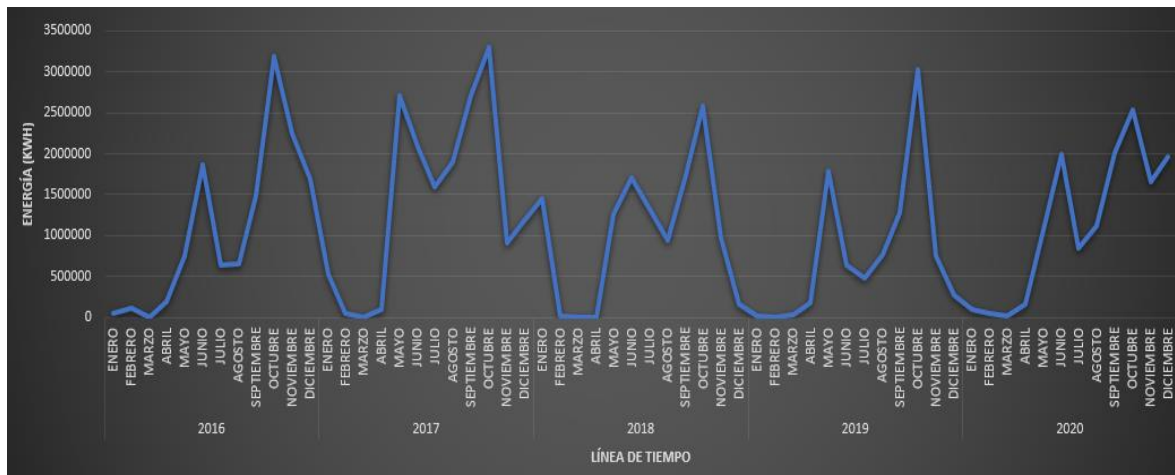
Como parte del análisis de capacidad de almacenamiento del sistema, se utilizaron únicamente los datos de la energía producida en periodo nocturno, exportada desde el patio de interruptores Brasil a la subestación Lindora, durante los últimos cinco años a partir del 2016 hasta el 2020. Ahora bien, basándose en el criterio del costo con el que se vende la energía en el periodo punta, es decir, al costo más alto del mercado por lo que se descarta almacenarla, no se utilizaron los datos de este periodo; además, de igual modo no se consideró el periodo valle pues la diferencia de costo o arbitraje tarifario no es tan significativa.

Cabe mencionar que esta energía que no se consume en el patio de interruptores Brasil se exporta para ser consumida en los circuitos de la subestación Lindora y reducir la compra de energía en esta última, de manera que el promedio de potencia demandada en el periodo

punta baja si se toma en cuenta que se puede almacenar energía nocturna y enviarla en el periodo punta.

Figura 20

Energía excedente en el periodo nocturno del PI Brasil



Fuente: Sistema de medición y calidad de la energía CNFL.

Para determinar el valor medio, se introdujeron todos los valores de energía mensual en kWh de los años en estudio en el *software* de creación de modelos y análisis Crystal Ball, donde se utilizó el método de distribución normal, también conocido como distribución de Gauss.

Figura 21

Análisis de datos por medio del método de distribución normal

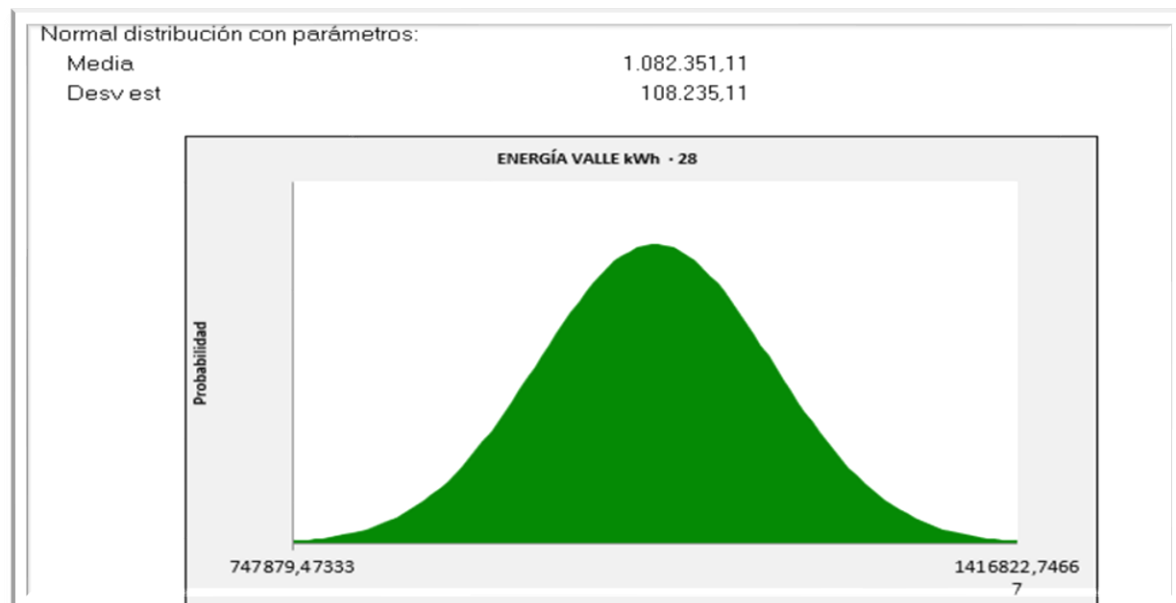
Clasificado por: Anderson-Darling			
Distribución	A-D	Valor P:	Parámetros
Beta	.7976	---	Mínimo=-174,492.56;Máximo=3,526,875.89;Alfa
Logística	1,4341	0,000	Media=999,708.79;Escala=569,662.06
Normal	1,5295	0,000	Media=1,082,351.11;Desv est=952,707.55
Extremo máximo	1,5910	0,000	Más probable=639,372.21;Escala=739,028.35
Extremo mínimo	2,1684	0,000	Más probable=1,577,145.67;Escala=990,539.63
t de Student	2,5518	---	Punto medio=1,082,351.11;Escala=485,068.96;
Logarítmico nor	3,1242	0,000	Ubicación=-10,473.07;Media=1,983,506.68;Des
Weibull	3,5588	0,000	Ubicación=-33,340.05;Escala=1,178,196.14;For
Exponencial	4,2964	0,000	Tasa=0.00
Triangular	4,7081	---	Mínimo=-27,290.77;Más probable=0.00;Máximo
Beta PERT	7,4865	---	Mínimo=-174,492.56;Más probable=785,430.84;
Uniforme	12,3786	0,000	Mínimo=-54,134.15;Máximo=3,356,317.59
Pareto	---	---	Sin ajuste
Gamma	---	---	Sin ajuste

Fuente: Creación propia.

El sistema dio como resultado un valor medio de 1.080.351,11 kWh, considerando los 60 datos mensuales. Este valor se tomó como referencia para sacar una desviación estándar por medio del Crystal Ball, obteniendo como resultado 108.235,11 kWh.

Figura 22

Desviación estándar de datos de la energía nocturna exportada



Fuente: Creación propia.

A partir de este valor medio de energía mensual menos el valor de desviación estándar se obtuvo como resultado 974116 kWh, valor que se dividió en 30 días promedio mensual, resultando en 32470,5 kWh del periodo nocturno diario.

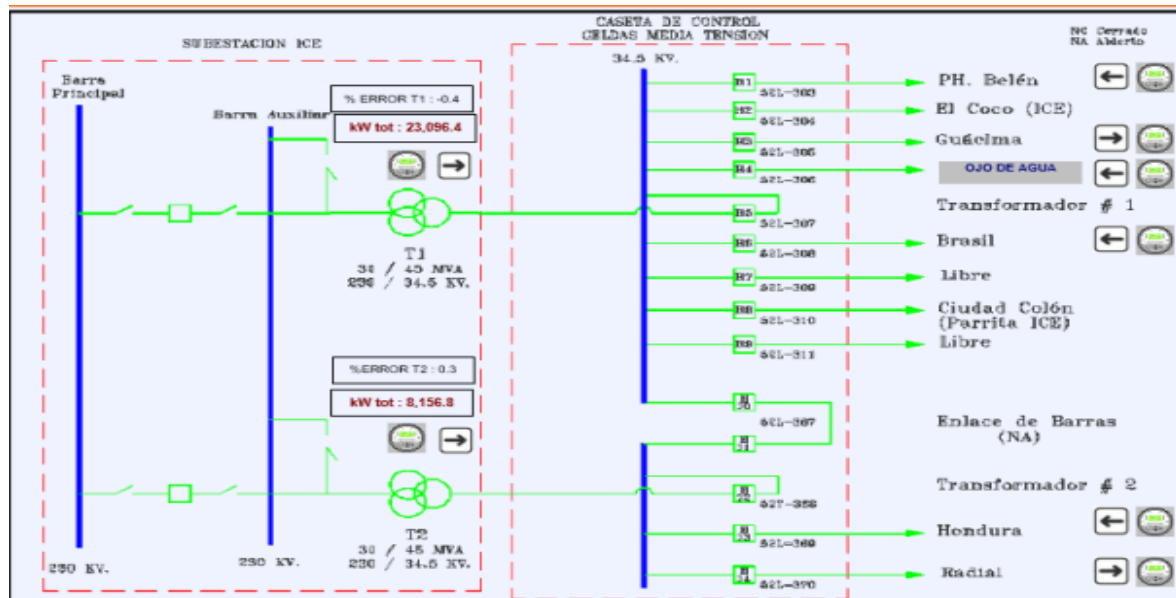
Con base en lo anterior, se determinó que la disponibilidad se aproximó a los 32 MWh.

4.3.2 Demanda de potencia desde las barras del ICE en la subestación Lindora

La subestación Lindora es alimentada desde las barras del ICE por medio de dos transformadores de potencia, el #1 es un transformador bidireccional debido a que cuenta con los circuitos CNFL de la Guácima, Ojo de Agua, Brasil y PH Belén; cabe señalar que la planta Ventanas se encuentra en el circuito Guácima y la PH Brasil en el circuito Brasil.

Por lo general, parte del consumo de los circuitos se descarga de las barras mediante este transformador, sin embargo, en algunas ocasiones la generación de las plantas abastece el 100 % y el excedente se carga a la barra del ICE para ser descargado por el transformador #2 sin necesidad de pagar transmisión de energía. Este transformador es solo para descarga y abastecimiento de la barra donde se encuentran los circuitos de Honduras y Radial.

Figura 23
Diagrama de la subestación Lindora

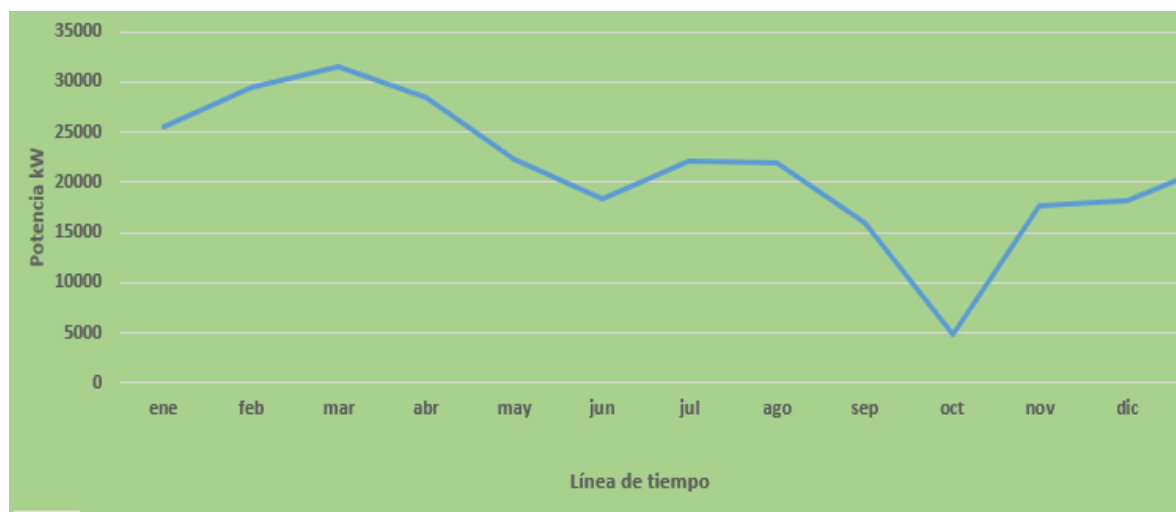


Fuente: Sistema de medición y calidad de la energía CNFL.

Considerando lo expuesto, se realizó un análisis del comportamiento de carga y descarga de potencia en los transformadores #1 y #2 para el año 2019, donde se obtuvo el promedio de potencia descargada de las barras del ICE en el periodo punta durante los doce meses.

Figura 24

Potencia promedio comprada al ICE en periodo punta año 2019



Fuente: Sistema de medición y calidad de la energía CNFL.

Según la figura 24, llevando a cabo un promedio de potencia en periodo punta durante cada uno de los meses del año, se logró determinar que en este periodo se consumió energía de las barras de alta tensión del ICE generalmente entre los 5 MW a los 30 MW de acuerdo a la temporada, ya que la generación CNFL no suministró todo el consumo de los circuitos para este periodo, lo cual sugirió que la instalación de un sistema de almacenamiento que suministre energía a esta subestación reduciría la compra de energía durante este periodo.

4.3.3 Ubicación y espacio físico de almacenamiento en el patio de interruptores Brasil

El patio de interruptores Brasil es propiedad de la CNFL y se ubica cerca del río Virilla en Brasil de Santa Ana, San José. En esta zona se encuentra un espacio en el costado norte de aproximadamente 300 metros cuadrados, donde se pueden instalar los contenedores que conforman el banco de baterías y sistemas auxiliares.

A continuación, se muestran imágenes de la ubicación del patio de interruptores a nivel satelital y por medio de fotografías.

Figura 25
Ubicación satelital del PI Brasil



Fuente: Google Earth.

Figura 26
Patio de interruptores Brasil



Fuente: Creación propia.

Figura 27
Costado norte del PI Brasil



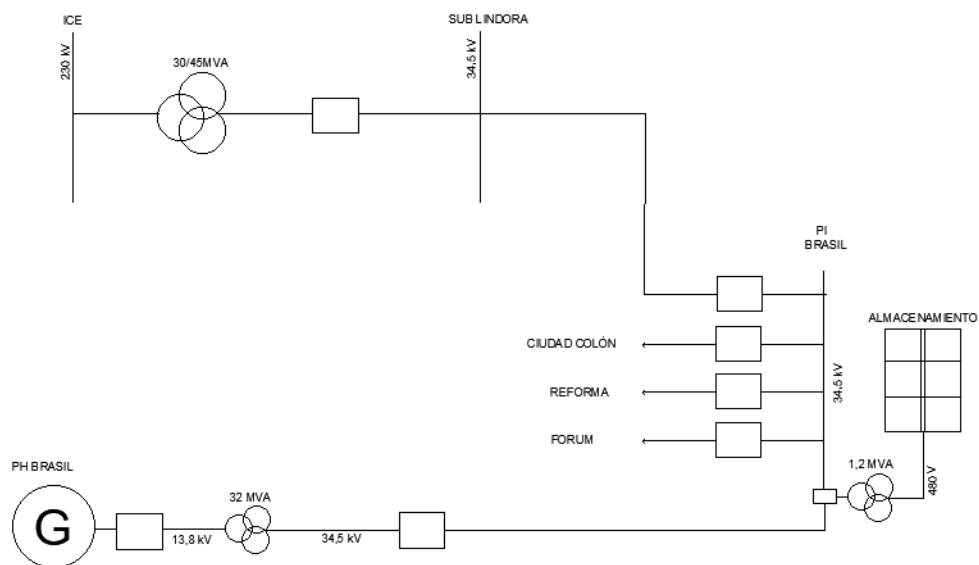
Fuente: Creación propia.

Con respecto a la estructura de almacenamiento, se llevó a cabo un estudio en el mercado nacional e internacional acerca de las distintas tecnologías de almacenamiento en MWh, obteniéndose información de los paquetes de energía, los cuales en diferentes casas comerciales son vendidos en contenedores que están compuestos por toda la estructura necesaria de almacenamiento, como lo son los acumuladores, los inversores y los sistemas de control requeridos para el almacenamiento de energía, listos para ser conectados a la fuente de alimentación y de salida para el despacho de esta.

4.3.4 Diagrama unifilar de la conexión del sistema de almacenamiento

A continuación, en la figura 28, se observa mediante un diagrama unifilar cómo quedaría incorporado el sistema de almacenamiento al lado del PI Brasil; así mismo, se muestran las conexiones de la subestación y planta con este patio de interruptores.

Figura 28
Diagrama unifilar



Fuente: Creación propia.

4.3.5 Definición de la capacidad de almacenamiento

De acuerdo con los tres puntos analizados, se determinó que se cuenta con energía disponible para almacenar y suficiente para dar abasto a la demanda del periodo punta en la subestación Lindora. Es importante indicar que un sistema de almacenamiento de tal capacidad requiere gran espacio físico para ser instalado (un contenedor por cada MW aproximadamente), pero el espacio disponible en este patio tiene las dimensiones suficientes para la instalación de diez contenedores. Por lo anterior, se determinó que la capacidad

máxima del sistema de almacenamiento es limitada por el espacio físico a un máximo de 10 MW.

4.4 Análisis de los beneficios de implementar un sistema de almacenamiento

El mercado eléctrico ha cambiado a lo largo del tiempo; así, en la actualidad han tomado fuerza las energías renovables, de manera que la generación por medio de paneles solares se ha incrementado a nivel mundial y, con ello, los sistemas de almacenamiento, los cuales no solo se utilizan para este tipo de generación, ya que las industrias en busca de la eficiencia y aprovechamiento de recursos emplean cada día más el almacenamiento de energía, beneficiándose con la baja de los costos en las tarifas eléctricas para realizar recortes de picos en consumos con arbitrajes tarifarios.

Por lo anterior, se planteó la instalación de un sistema de almacenamiento en el patio de interruptores Brasil de la CNFL, con el propósito de aprovechar la energía excedente generada por la central generadora Brasil (enviada a la subestación Lindora) en horario nocturno, almacenándola para luego ser vendida a un costo más elevado, de manera que se daría un arbitraje tarifario y recorte de picos en la subestación Lindora, porque la energía que genere esta planta por encima del consumo de los circuitos del PI Brasil en el periodo nocturno será almacenada, provocando que en el periodo nocturno se compre energía al ICE a un bajo costo y potencia para alimentar los circuitos de la subestación Lindora durante el periodo nocturno, tomando en cuenta que en este periodo no se pagan costos por máxima demanda.

Los beneficios se basan en la diferencia del precio de energía por kWh del periodo nocturno al periodo punta, así como el recorte del pico de la máxima demanda en los periodos valle y punta y, con ello, una reducción en la factura. Además, cabe señalar que la colocación

de un sistema de almacenamiento en este patio estratégicamente se puede utilizar como un respaldo de los circuitos conectados al PI Brasil.

4.5 Respaldo de los circuitos del PI Brasil

Tomando en cuenta la importancia de tener un servicio continuo, el sistema de almacenamiento funciona como un respaldo para abastecer parte de los circuitos del PI Brasil en eventuales salidas del circuito Brasil-Lindora y que la planta Brasil no se encuentre en condiciones de generar. Este respaldo puede colocarse por medio de una transferencia automática para cuando se presente una falla en el circuito alimentador y la planta esté recuperando nivel de agua, en este momento ingrese el sistema de almacenamiento a dar el soporte a estos circuitos que cuentan con clientes relevantes a nivel industrial.

Por lo anterior, se realizó un estudio de las salidas de línea de la planta Brasil y del patio de interruptores, de manera que se pueda evidenciar la necesidad de contar con un sistema de respaldo.

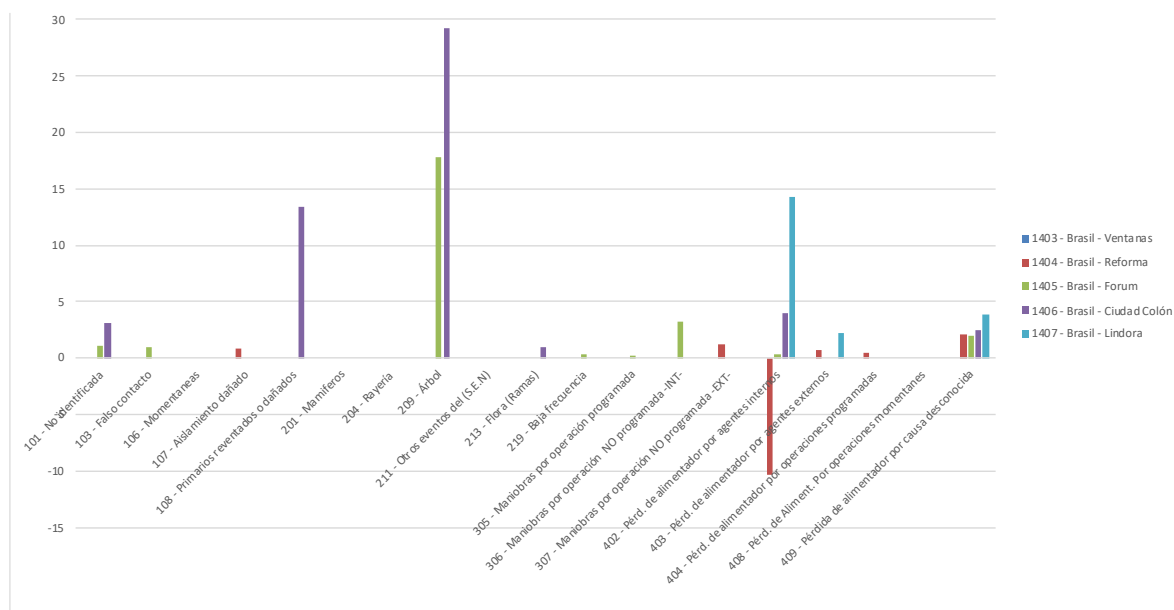
4.6 Estudio y análisis de las salidas de línea de los circuitos del PI Brasil y de las salidas de la PH Brasil

Se obtuvieron datos de todas las salidas de línea registradas durante el año 2019 en cada uno de los circuitos conectados al patio de interruptores Brasil. A partir de estos datos, se calculó la energía en MWh que se dejó de vender mientras se restablecía el servicio, con la finalidad de establecer si es viable implementar un método de almacenamiento de energía que contrarreste las pérdidas de energía causadas por averías del circuito Brasil-Lindora, o donde este contorno es afectado por las demás fallas, teniendo en cuenta que este circuito es el alimentador de todo el patio cuando la central generadora no se encuentra en

funcionamiento. Por lo tanto, se grafican y se muestran los datos de fallas en la figura 29 a continuación:

Figura 29

Energía en MWh asociada a las fallas que afectan los circuitos del PI Brasil



Fuente: Creación propia.

Según la figura 29, en cuanto a las afectaciones al circuito Brasil Reforma, se encuentran las fallas causadas debido a la pérdida de alimentador por agentes internos, incidiendo en el suministro de 10,3 MWh durante el año. En segundo lugar, se ubica la pérdida de alimentador por causa desconocida, impidiendo el suministro de 2,1 MWh durante el año y, en tercer lugar, se menciona maniobras de operación no programadas, imposibilitando la entrega de 1,21 MWh al año.

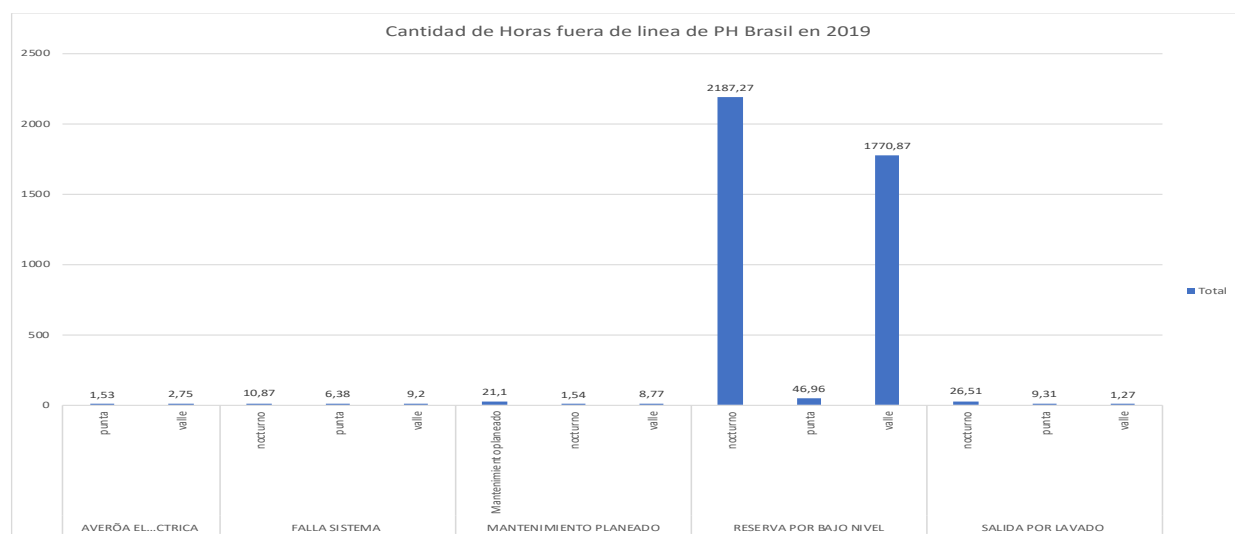
Por su parte, respecto al circuito Brasil-Fórum, experimentó afectaciones por la mayoría de las causas graficadas. Así, los árboles afectan el suministro de 17,7 MWh; las

maniobras por operación no programada, 3,26 MWh; las pérdidas de alimentador por causa desconocida, 1,96 MWh y el resto de las causas, 4 MWh al año.

Además, el circuito Brasil-Ciudad Colón fue afectado en gran medida por averías causadas por árboles, lo cual junto con las demás causas sumó un total de 53 MWh, sin colocar a los consumidores. Por último, el circuito Brasil-Lindora fue afectado por todas estas causas de averías impidiendo la distribución de 20,3 MWh entre los clientes conectados al circuito. De este modo, sumando el total de la energía que se deja de colocar entre los clientes conectados al PI Brasil, se obtuvo un total de 94,65 MWh en todo el año 2019.

En la figura 30, se observa la cantidad de horas que la planta hidroeléctrica Brasil dejó de generar energía en los periodos nocturno, valle y punta, esto asociado a cinco causas principales.

Figura 30
Cantidad de horas fuera de línea de la PH Brasil en 2019



Fuente: Creación propia.

Durante el análisis del gráfico anterior, se apreció que las salidas de línea de la PH Brasil se asociaron en un 97 % a la reserva por bajo nivel, lo cual significa que se encuentra

llenando el embalse para volver a generar. También, esta acción ocurrió principalmente en el periodo nocturno y periodo valle y en muy pocas ocasiones sucedió en el periodo punta.

Es importante mencionar que durante el periodo nocturno, aproximadamente un 60 % de las horas anuales de ese periodo la unidad generadora se encontró fuera de línea, recuperando recurso hídrico.

4.7 Tecnología por utilizar del sistema de almacenamiento

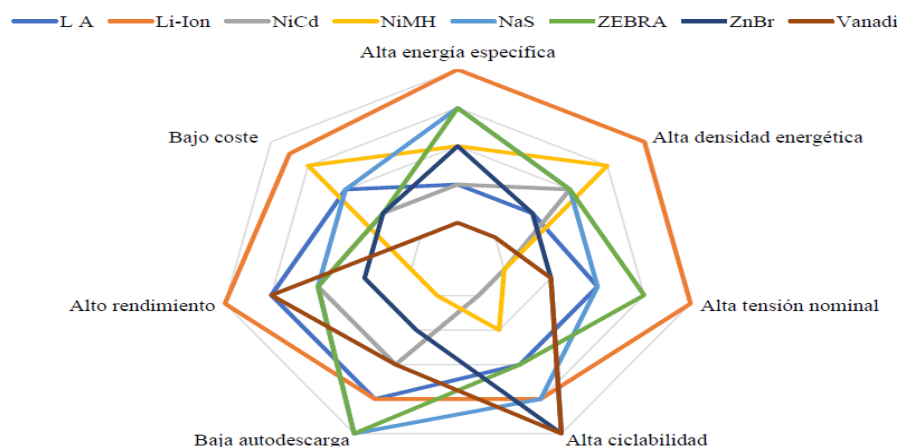
Como se indica en el apartado 2.2.6, las baterías de iones-litio cuentan con una experiencia de 30 años en el mercado y al ser de las más utilizadas en múltiples aplicaciones de sistemas de almacenamiento debido a su alta eficiencia y densidad energética, alcanzando un 90 %, fue la alternativa que mejor se ajustó a la función que se le proyectó dar al sistema de almacenamiento.

Figura 31
Resumen de las características de las baterías

	L A	Li-Ion	NiCd	NiMH	NaS	ZEBRA	ZnBr	Vanadio
Energía específica (Wh/kg)	19-24 (1)	130-147 (1)	47 (1)	65 (1)	122 (1)	91-155 (1)	65-75 (1)	10 (1)
Densidad energética (Wh/L)	60-110 (2)	250-730 (2)	50-150 (2)	140-300 (2)	160 (2)	150 (2)	60-70 (2)	10 (2)
Potencia específica (W/kg)	180 (2)	250-340 (2)	150 (2)	250-800 (2)	155 (2)	150 (2)	-	-
Tensión nominal (V)	2 (1)	3,6 (1)	1,3 (1)	1,3 (1)	2,1 (1)	2,58 (1)	1,8 (3)	1,6 (1)
Ciclos carga/descarga	2500 (4)	5000 (4)	1000 (5)	1500 (5)	4500 (4)	2500 (5)	10.000 (6)	10.000 (6)
Autodescarga mensual (%)	2-4% (1)	3% (1)	10% (1)	100% (1)	0% (1)	0% (1)	15% (3)	10% (3)
Rendimiento (%)	90% (7)	94% (7)	80% (1)	65% (1)	80% (7)	85% (1)	75% (7)	90% (4)
Coste instalación (€/kWh)	280 (4)	99 (8)	350 (9)	150 (9)	285 (4)	350 (9)	385 (4)	700 (4)

Fuente: Pérez, 2019.

Figura 32
Comparativo de tecnologías de acumuladores electroquímicos



Fuente: Pérez, 2019.

La elección del tipo de tecnología de las baterías por utilizar para el sistema de almacenamiento en el PI Brasil, se determinó analizando sus características según las figuras 31 y 32, en las cuales se observa que las baterías de ion-litio superan en cinco de las siete cualidades que se comparan según la tecnología usada, pues estas baterías poseen una alta densidad energética, alta energía específica, alto rango de tensión y un rendimiento de 94 %, superando a todas las tecnologías expuestas. Además, es la segunda en bajos costos de instalación. Así, con base en lo expuesto, se seleccionó esta tecnología para utilizarse en el sistema de almacenamiento por instalar en el patio de interruptores Brasil.

4.8 Estudio de viabilidad del proyecto

De acuerdo con los datos y estudios realizados anteriormente, se dedujo que el proyecto de almacenamiento debe enfocarse en dos funcionalidades, las cuales tienen el fin de buscar su viabilidad económica, almacenando energía excedente del periodo nocturno de

la planta hidroeléctrica Brasil para ser despachada en periodo punta (arbitraje tarifario) y respaldo de circuitos del PI Brasil.

Por tal motivo, se llevó a cabo un estudio de mercado, donde se investigaron los datos para el análisis económico por realizar, de manera que se investigara el precio actual y futuro de los kWh instalados, costos de instalación y mantenimiento. Además de un análisis tarifario del precio del kWh en términos de energía y potencia.

4.8.1 Costos del kWh instalado

Con el fin de obtener un estimado del costo del kWh instalado de los sistemas de almacenamiento del mercado nacional e internacional, se efectuó una cotización con la empresa ECO WAT para calcular los costos del sistema de almacenamiento por colocar.

También, se hizo un análisis con distintas fuentes de la web; al respecto, cabe recalcar un estudio del coste del kWh instalado en sistemas de baterías de iones de litio con un enfoque en sistemas de duración de cuatro horas llevado a cabo en el año 2019 por el Laboratorio Nacional de Energía Renovables del Departamento de Energía de EE.UU., el desarrollo de proyecciones de costos y desempeño para servicios públicos, y los precios del kWh instalado según la empresa Tesla.

4.8.2 Cotización ECO WAT consulting

Esta empresa realizó una oferta económica donde incluyó baterías Tesla mega pack, inversor Tesla, medidores Tesla, software de control y monitoreo Tesla, cableado, tubería, instalación, puesta en marcha y transporte al sitio, dando un costo por kWh instalado de 427 USD, lo cual asciende a un costo total del proyecto de 2 219 033.60 USD, para una capacidad de energía almacenable de 5 196.8 kWh/día y potencia nominal de 1 299.2 kWp.

Además, en la cotización se menciona una garantía de quince años de los equipos, así como una nota aclaratoria que indica lo siguiente:

- Las distancias en cableado son estimadas y deben ser verificadas en una visita técnica en el sitio donde se desarrolla el proyecto. En la actual propuesta, se incluyen diez metros de cableado desde el inversor hasta el punto de interconexión en 480 V sin transformador.
- No se incluye: transformador, losa de concreto ni grúa para la colocación de las baterías.

Con base en lo anterior, se tomó en cuenta la compra de un transformador de 34,5 kV a 480 V para ser instalado en sitio y efectuar el punto de interconexión entre el sistema de almacenamiento y el patio de interruptores.

4.8.3 Estudio del coste del kWh instalado en sistemas de baterías de iones de litio

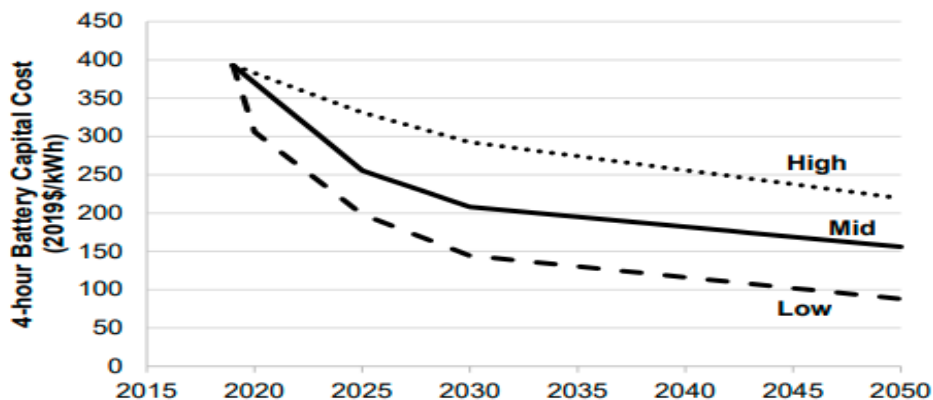
De acuerdo con estudios de 19 divulgaciones en las cuales se consideraron los costos, se realizaron proyecciones donde se demostró la tendencia a la baja del costo del kWh instalado durante el tiempo, así mismo se prevé aún más la baja de precios en el almacenamiento de baterías a lo largo del tiempo, mostrando las proyecciones de bajo, medio y alto costo desarrolladas sobre una base normalizada con respecto a los valores publicados.

La figura 33 muestra el costo de capital general para una batería de cuatro horas, basado en esas proyecciones, con costos de almacenamiento en tres escenarios: bajo \$ 144/kWh, medio \$ 208/kWh y alto \$ 293/kWh, para el 2030 estaría en un nivel bajo \$88/kWh, medio \$156/kWh y alto \$219/kWh en 2050. Asimismo, se estudiaron las operaciones variables de batería y también se analizaron los costos de mantenimiento, la vida

útil y la eficiencia, con valores recomendados seleccionados según las publicaciones encuestadas.

Figura 33

Proyecciones de alto, medio y bajo costo para cuatro horas



Fuente: Cole y Frazier, 2020.

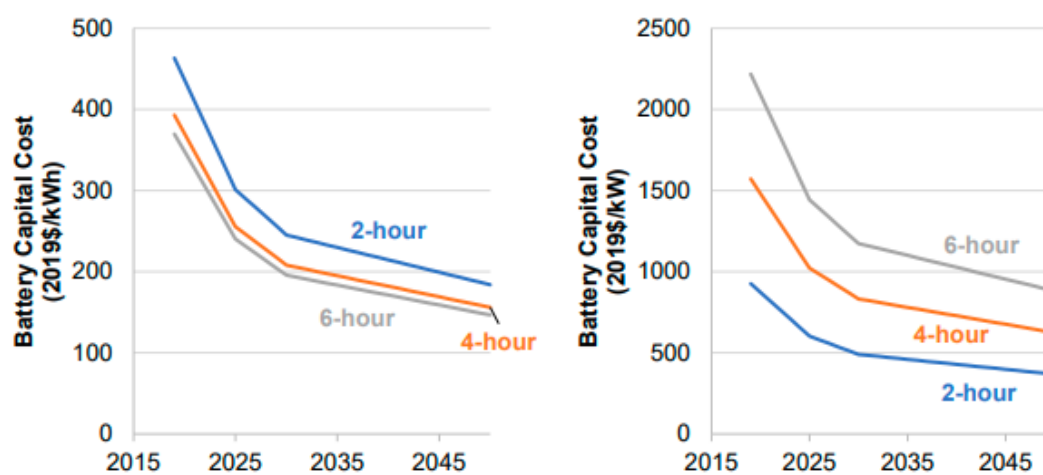
Para estimar los costos de otras duraciones de almacenamiento, se asignaron costos de energía separados y costos de energía total, de tal manera que el Costo total (\$/kWh) = Costo de energía (\$/kWh) + Costo de energía (\$/kW) / Duración (hr).

Se percibieron reducciones en los costos hasta el año 2030 en un 63 %, 47 % y 26 % en los casos bajo, medio y alto, respectivamente, y para 2050 se redujeron en un 78 %, 60 % y 44 %, respectivamente. De la misma forma se pueden llevar a cabo el análisis de costos para baterías de 2, 4 y 6 horas de duración con proyecciones medias. A \$/kWh, las baterías de mayor duración tienen un costo de capital más bajo, y viceversa.

En la figura 34, la parte izquierda muestra los valores en \$/kWh, mientras que la derecha muestra los costos en \$/kW.

Figura 34

Proyecciones de costos para baterías de 2, 4 y 6 horas de duración.



Fuente: Cole y Frazier, 2020.

Figura 35*Tabla de proyección de costos de instalación del kWh*

	Normalized Cost Reduction			4-hour Storage Costs (2019\$/kWh)		
Year	Low	Mid	High	Low	Mid	High
2019	1.00	1.00	1.00	393	393	393
2020	0.78	0.94	0.97	306	370	383
2021	0.73	0.89	0.95	286	351	372
2022	0.68	0.84	0.92	266	331	362
2023	0.62	0.79	0.90	245	312	352
2024	0.57	0.74	0.87	225	293	341
2025	0.52	0.70	0.84	205	273	331
2026	0.49	0.66	0.82	193	260	323
2027	0.46	0.63	0.80	181	247	316
2028	0.43	0.60	0.78	169	234	308
2029	0.40	0.56	0.76	156	221	300
2030	0.37	0.53	0.74	144	208	293
2031	0.36	0.52	0.74	142	205	289
2032	0.35	0.52	0.73	139	203	285
2033	0.35	0.51	0.72	136	200	282
2034	0.34	0.50	0.71	133	198	278
2035	0.33	0.50	0.70	130	195	274
2036	0.32	0.49	0.69	127	192	271
2037	0.32	0.48	0.68	125	190	267
2038	0.31	0.48	0.67	122	187	263
2039	0.30	0.47	0.66	119	185	260
2040	0.30	0.46	0.65	116	182	256
2041	0.29	0.46	0.64	113	179	252
2042	0.28	0.45	0.63	111	177	249
2043	0.27	0.44	0.62	108	174	245
2044	0.27	0.44	0.61	105	172	241
2045	0.26	0.43	0.60	102	169	238
2046	0.25	0.42	0.60	99	166	234
2047	0.25	0.42	0.59	96	164	230
2048	0.24	0.41	0.58	94	161	227
2049	0.23	0.40	0.57	91	159	223
2050	0.22	0.40	0.56	88	156	219

Fuente: Cole y Frazier, 2020.

En relación con el estudio hecho en el año 2019, la figura 35 arroja la proyección estimada del costo del kWh instalado para sistemas de almacenamiento de cuatro horas, proyectando para el año 2022 un costo medio de \$ 331 el kWh instalado, lo cual se ajusta un poco por debajo de la realidad del mercado actual; no obstante, cabe resaltar que al día del estudio no se contaba con la pandemia de COVID-19, lo que ha variado los precios de los productos, así como las importaciones y exportaciones, encareciendo el mercado.

4.8.4 Costos de kWh instalado según Tesla

Una de las opciones de más viabilidad y venta en el mercado por parte de Tesla es el *megapack*, el cual contiene todo el sistema integrado de almacenamiento, como las baterías, inversores y partes lógicas electrónicas que son parte del conjunto y mantenimiento de estas.

Cabe recalcar los costes de estos equipos; en cuanto a esto, según Tesla, equipos con una potencia de salida de 0.8 MW y una capacidad de 3 MWh tienen un coste que depende de la localización de compra, pero que ronda los 1.2 millones de dólares en Estados Unidos.

De acuerdo con lo anterior, rondaría los 400 dólares el kWh si se adquiere solo una unidad de este dimensionamiento, lo cual bajaría según la compra, siendo de 327 dólares el kWh si se seleccionan diez unidades que se muestran por el configurador de serie o, inclusive, si se opta por una gran instalación de 100 *megapacks* se estarían bajando considerablemente todos los costos, llegando a los 278 dólares el kWh (Noya, 2021).

4.8.5 Análisis de precio de la tarifa T-CB

Es importante recalcar que la CNFL le compra energía al ICE, realizando el pago de la facturación de acuerdo con la tarifa T-CB, la cual según ARESEP -Autoridad Reguladora

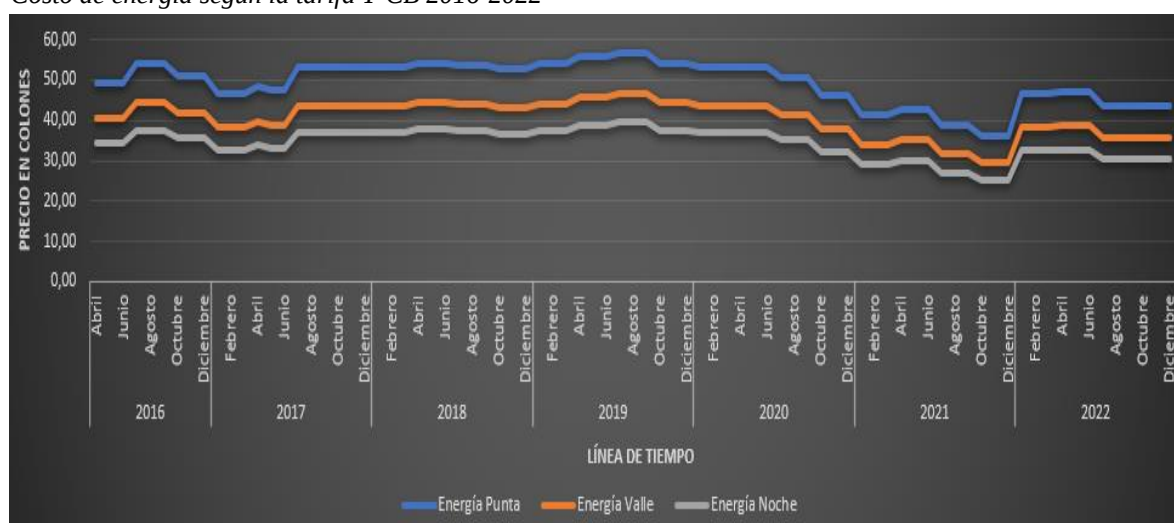
de los Servicios Públicos- (2021) es la tarifa dedicada al suministro de energía y potencia en media tensión a la CNFL y al servicio de distribución del ICE.

Con base en lo anterior, se realizó un análisis del coste por kWh en términos de energía y potencia de la tarifa T-CB, desde el año 2016 hasta el año 2022 inclusive.

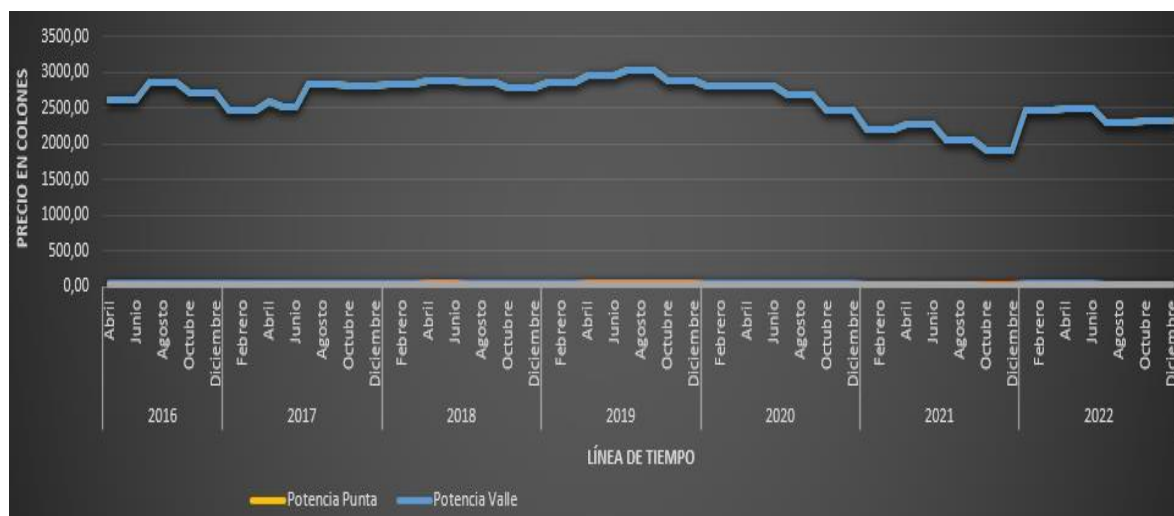
De acuerdo con las ilustraciones 39 y 40, se observa el comportamiento y la variación de los precios del kWh en energía y potencia.

Figura 36

Costo de energía según la tarifa T-CB 2016-2022



Fuente: ARESEP, 2021.

Figura 37*Costo de potencia según tarifa 2016-2022*

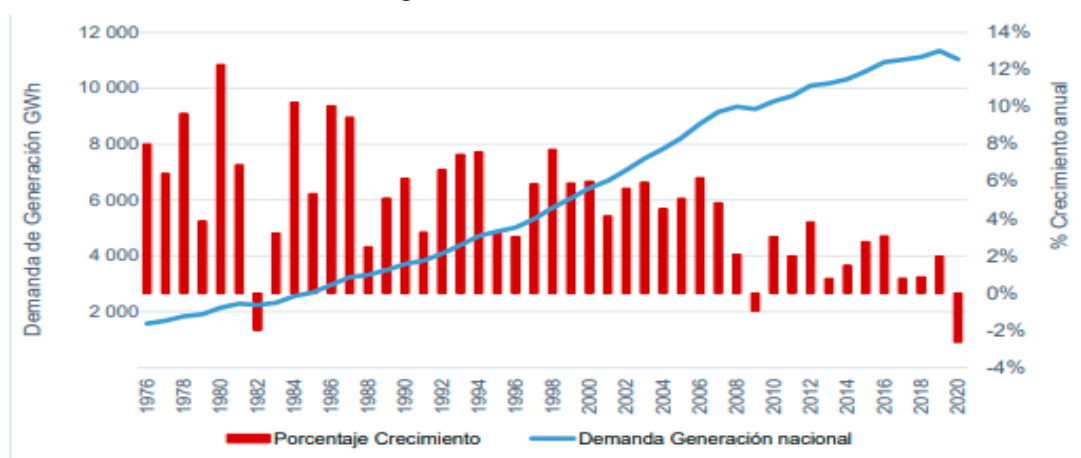
Fuente: ARESEP, 2021.

Tomando como referencia los datos de las tarifas desde el año 2016, se obtuvo el cálculo del porcentaje de crecimiento anual tarifario. Luego, se llevó a cabo un promedio de los años 2016, 2017, 2018, 2019 y 2022, el cual mostró un valor promedio de crecimiento del 2,08 % anual, siendo esto una referencia incierta porque estos costos dependen de muchos factores que provocan diversas variaciones en los precios de la energía.

Un ejemplo de lo expuesto es el impacto causado por la pandemia de COVID-19, que causó una disminución tarifaria tanto en términos de energía como en potencia, siendo el motivo por el cual se excluyeron los años 2020 y 2021 del anterior análisis.

Figura 38

Crecimiento histórico de la demanda de generación 1976-2020



Fuente: ICE, 2021.

También, en la figura 38, obtenida del Plan de Expansión de la Generación 2020-2035 del ICE (2021), se observa el comportamiento de la demanda desde el año 1976 hasta el año 2020.

Es claro que la demanda ha presentado un crecimiento a lo largo del tiempo, sin embargo, este porcentaje de crecimiento ha venido bajando en los últimos años por distintos factores como mayor eficiencia de los equipos, sistemas autónomos en las industrias y generación distribuida, lo cual provoca que se establezcan los aumentos elevados de tarifas.

Igualmente, en el Plan de Expansión Eléctrica 2020-2035, se menciona que la creación de nuevos proyectos de generación que entren en operación antes del 2026 provocará un costo adicional al Sistema Eléctrico Nacional, lo cual no se compensa con la disminución correspondiente del costo operativo, provocando un aumento de las tarifas eléctricas (ICE, 2021).

4.9 Análisis financiero

Con base en las anteriores informaciones y con el fin de complementar el estudio de viabilidad del proyecto, se llevó a cabo un análisis financiero con distintos escenarios: los primeros dos con datos ajustados a la actualidad, pero con distinta capacidad de instalación; mientras los otros dos se desarrollaron con datos más optimistas hacia el futuro y diferente capacidad instalada. También, se realizó una prueba por medio de un *software* donde se mezcló una alta cantidad de posibles resultados.

4.9.1 Contenido de datos en el análisis económico real actual

Tarifas: Se tomó el valor actual (I trimestre de 2022) de energía y potencia por periodos de la tarifa T-CB, de acuerdo con la facturación ICE–CNFL lineal en el tiempo.

Costo del kWh instalado: El valor del kWh instalado se tasó según la cotización realizada (427 dólares), además se hizo un promedio del dólar del mes de enero 2022 (635,23 colones).

Costo del transformador: Este costo se obtuvo por medio de un estudio de mercado.

Costo de instalación: Se incluyó un costo de la instalación a pesar de que el sistema de almacenamiento viene con la mayoría de las necesidades, pero era necesario tomar en cuenta las obras civiles.

Ingreso por arbitraje tarifario: Se efectuó el cálculo de acuerdo con una potencia instalada de 5 MW y de 30 MW respectivamente, según el análisis de datos excedentes de energía generada y excedente del PI Brasil desde el año 2016 hasta el 2020, realizando la comparativa de la venta de energía nocturna vs la venta de energía en periodo punta.

Ingreso por potencia: El ingreso por potencia se hizo con base en la capacidad de almacenamiento y la potencia que se estaría despachando durante las horas punta tanto de la

mañana como de la tarde, asegurando el aumento de ingresos por máxima demanda con la potencia despachada durante una hora, lo que para este caso fue de 1 y 6 MW correspondientemente.

A continuación, se muestra un recuadro mediante una figura donde se llevó a cabo el flujo de caja proyectado a quince años con datos reales actuales y 5 MW de capacidad de almacenamiento, ya que es el aproximado al plazo de garantía.

Figura 39
Flujo de caja proyectado con datos reales actuales para determinar la viabilidad del proyecto (5 MW)

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ingreso por arbitraje tarifario	€ -	€ 22.324.101,46	€ 22.324.101,46	€ 22.324.101,46	€ 22.324.101,46	€ 22.324.101,46	€ 22.324.101,46	€ 22.324.101,46	€ 22.324.101,46	€ 22.324.101,46	€ 22.324.101,46	€ 22.324.101,46	€ 22.324.101,46	€ 22.324.101,46	€ 22.324.101,46	€ 22.324.101,46
Ingreso potencia	€ -	€ 29.742.120,00	€ 29.742.120,00	€ 29.742.120,00	€ 29.742.120,00	€ 29.742.120,00	€ 29.742.120,00	€ 29.742.120,00	€ 29.742.120,00	€ 29.742.120,00	€ 29.742.120,00	€ 29.742.120,00	€ 29.742.120,00	€ 29.742.120,00	€ 29.742.120,00	€ 29.742.120,00
Ingreso total	€ -	€ 52.066.221,46	€ 52.066.221,46	€ 52.066.221,46	€ 52.066.221,46	€ 52.066.221,46	€ 52.066.221,46	€ 52.066.221,46	€ 52.066.221,46	€ 52.066.221,46	€ 52.066.221,46	€ 52.066.221,46	€ 52.066.221,46	€ 52.066.221,46	€ 52.066.221,46	€ 52.066.221,46
Costo																
kWh instalado	€ 1.355.725.000,00	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Costo de instalación	€ 20.335.875,00	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Costo de transformador	€ 15.000.000,00															
Total costo	€ 1.391.060.875,00	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Gasto																
Mantenimiento Anual	€ -	€ 1.000.000,00	€ 1.010.000,00	€ 1.020.100,00	€ 1.030.301,00	€ 1.040.604,01	€ 1.051.010,05	€ 1.061.520,15	€ 1.072.135,35	€ 1.082.856,71	€ 1.093.685,27	€ 1.104.622,13	€ 1.115.668,35	€ 1.126.825,03	€ 1.138.093,28	€ 1.149.474,21
Depreciación		€ 45.190.833,33	€ 45.190.833,33	€ 45.190.833,33	€ 45.190.833,33	€ 45.190.833,33	€ 45.190.833,33	€ 45.190.833,33	€ 45.190.833,33	€ 45.190.833,33	€ 45.190.833,33	€ 45.190.833,33	€ 45.190.833,33	€ 45.190.833,33	€ 45.190.833,33	€ 45.190.833,33
Total Gasto	€ -	€ 46.190.833,33	€ 46.200.833,33	€ 46.210.933,33	€ 46.221.134,33	€ 46.231.437,34	€ 46.241.843,38	€ 46.252.353,48	€ 46.262.968,69	€ 46.273.690,04	€ 46.284.518,61	€ 46.295.455,46	€ 46.306.501,68	€ 46.317.658,36	€ 46.328.926,61	€ 46.340.307,55
Utilidad	€ 1.391.060.875,00	€ 5.875.388,13	€ 5.865.388,13	€ 5.855.288,13	€ 5.845.087,13	€ 5.834.784,12	€ 5.824.378,08	€ 5.813.867,98	€ 5.803.252,78	€ 5.792.531,43	€ 5.781.702,86	€ 5.770.766,01	€ 5.759.719,78	€ 5.748.563,10	€ 5.737.294,85	€ 5.725.913,92
Pérdidas o ganancias del periodo	€ 1.391.060.875,00	€ 5.875.388,13	€ 5.865.388,13	€ 5.855.288,13	€ 5.845.087,13	€ 5.834.784,12	€ 5.824.378,08	€ 5.813.867,98	€ 5.803.252,78	€ 5.792.531,43	€ 5.781.702,86	€ 5.770.766,01	€ 5.759.719,78	€ 5.748.563,10	€ 5.737.294,85	€ 5.725.913,92
Informacion financiera										TASA DE DESCUENTO		5%				
VAN		-€ 1.330.735.549,37		No Rentable												
TIR		-24%		No Rentable												

Fuente: Creación propia.

En el análisis financiero expuesto en la figura 39, es evidente que no existe viabilidad del proyecto según los datos del valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), pues el valor del VAN dio como resultado negativo y el TIR fue menor a cero.

En la figura 40, se aprecia el flujo de caja con los mismos datos de la figura 39; sin embargo, la única diferencia fue que se cambió la capacidad de almacenamiento a 30 MW.

Figura 40
Flujo de caja proyectado con datos reales actuales para determinar la viabilidad del proyecto (30 MW)

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ingreso por arbitraje tarifario	₺ -	₺ 113.300.817,46	₺ 113.300.817,46	₺ 113.300.817,46	₺ 113.300.817,46	₺ 113.300.817,46	₺ 113.300.817,46	₺ 113.300.817,46	₺ 113.300.817,46	₺ 113.300.817,46	₺ 113.300.817,46	₺ 113.300.817,46	₺ 113.300.817,46	₺ 113.300.817,46	₺ 113.300.817,46	₺ 113.300.817,46
Ingreso potencia	₺ -	₺ 178.452.720,00	₺ 178.452.720,00	₺ 178.452.720,00	₺ 178.452.720,00	₺ 178.452.720,00	₺ 178.452.720,00	₺ 178.452.720,00	₺ 178.452.720,00	₺ 178.452.720,00	₺ 178.452.720,00	₺ 178.452.720,00	₺ 178.452.720,00	₺ 178.452.720,00	₺ 178.452.720,00	₺ 178.452.720,00
Ingreso total	₺ -	₺ 291.753.537,46	₺ 291.753.537,46	₺ 291.753.537,46	₺ 291.753.537,46	₺ 291.753.537,46	₺ 291.753.537,46	₺ 291.753.537,46	₺ 291.753.537,46	₺ 291.753.537,46	₺ 291.753.537,46	₺ 291.753.537,46	₺ 291.753.537,46	₺ 291.753.537,46	₺ 291.753.537,46	₺ 291.753.537,46
Costo																
kWh instalado	₺ 8.134.350.000,00	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -
Costo de instalación	₺ 122.015.250,00	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -
Costo de transformador	₺ 15.000.000,00															
Total costo	₺ 8.271.365.250,00	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -	₺ -
Gasto																
Mantenimiento Anual	₺ -	₺ 1.000.000,00	₺ 1.010.000,00	₺ 1.020.100,00	₺ 1.030.301,00	₺ 1.040.604,01	₺ 1.051.010,05	₺ 1.061.520,15	₺ 1.072.135,35	₺ 1.082.856,71	₺ 1.093.685,27	₺ 1.104.622,13	₺ 1.115.668,35	₺ 1.126.825,03	₺ 1.138.093,28	₺ 1.149.474,21
Depreciación		₺ 271.145.000,00	₺ 271.145.000,00	₺ 271.145.000,00	₺ 271.145.000,00	₺ 271.145.000,00	₺ 271.145.000,00	₺ 271.145.000,00	₺ 271.145.000,00	₺ 271.145.000,00	₺ 271.145.000,00	₺ 271.145.000,00	₺ 271.145.000,00	₺ 271.145.000,00	₺ 271.145.000,00	₺ 271.145.000,00
Total Gasto	₺ -	₺ 272.145.000,00	₺ 272.155.000,00	₺ 272.165.100,00	₺ 272.175.301,00	₺ 272.185.604,01	₺ 272.196.010,05	₺ 272.206.520,15	₺ 272.217.135,35	₺ 272.227.856,71	₺ 272.238.685,27	₺ 272.249.622,13	₺ 272.260.668,35	₺ 272.271.825,03	₺ 272.283.093,28	₺ 272.294.474,21
Utilidad	-₺ 8.271.365.250,00	₺ 19.608.537,46	₺ 19.598.537,46	₺ 19.588.437,46	₺ 19.578.236,46	₺ 19.567.933,45	₺ 19.557.527,41	₺ 19.547.017,31	₺ 19.536.402,11	₺ 19.525.680,76	₺ 19.514.852,19	₺ 19.503.915,34	₺ 19.492.869,12	₺ 19.481.712,43	₺ 19.470.444,18	₺ 19.459.063,25
Pérdidas o ganancias del periodo	-₺ 8.271.365.250,00	₺ 19.608.537,46	₺ 19.598.537,46	₺ 19.588.437,46	₺ 19.578.236,46	₺ 19.567.933,45	₺ 19.557.527,41	₺ 19.547.017,31	₺ 19.536.402,11	₺ 19.525.680,76	₺ 19.514.852,19	₺ 19.503.915,34	₺ 19.492.869,12	₺ 19.481.712,43	₺ 19.470.444,18	₺ 19.459.063,25

Información financiera			TASA DE DESCUENTO	5%
VAN	-₺ 8.068.494.530,50	No Rentable		
TIR	-27%	No Rentable		

Fuente: Creación propia.

En cuanto al caso de la figura 40, donde se utilizó más capacidad de almacenamiento, se observa que el aumento de kWh por instalar terminó siendo poco rentable según los datos del valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), al incrementar los dos resultados en términos negativos.

4.9.2 Contenido de datos en el análisis económico optimista hacia el futuro

Tarifas: Se tomó el valor actual (I trimestre 2022) de energía y potencia por periodos de la tarifa T-CB, de acuerdo con la facturación ICE-CNFL más el aumento del 5 % anual.

Costo del kWh instalado: El valor del kWh instalado se tasó según estudios del mercado y proyección para el año 2025 (205 dólares), además de proyectar una baja en el dólar a 600 colones.

Costo del transformador: Este costo se obtuvo por medio de un estudio de mercado.

Costo de instalación: Se incluyó un costo de la instalación a pesar de que el sistema de almacenamiento viene con casi todo incluido, pero fue necesario tomar en cuenta obras civiles.

Ingreso por arbitraje tarifario: Se realizó el cálculo de acuerdo con una potencia instalada de 5 MW y de 30 MW respectivamente, según el análisis de datos excedentes de energía generada y excedente del PI Brasil desde el año 2016 hasta el 2020, realizando la comparativa de la venta de energía nocturna vs la venta de energía en periodo punta.

Ingreso por potencia: El ingreso por potencia se hizo con base en la capacidad de almacenamiento y la potencia que se estaría despachando durante las horas punta tanto de la mañana como de la tarde, asegurando el aumento de ingresos por máxima demanda con la potencia despachada durante una hora, lo que para este caso sería de 1 y 6 MW correspondientemente.

A continuación, se muestra un recuadro mediante la figura 41, donde se llevó a cabo el flujo de caja proyectado a quince años con datos económicos optimistas y una capacidad de almacenamiento de 5 MW.

Figura 41
Flujo de caja proyectado con datos económicos optimistas para determinar la viabilidad del proyecto (5 MW)

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ingreso por arbitraje tarifario	€ -	€ 23.440.306,54	€ 23.440.306,54	€ 23.440.306,54	€ 23.440.306,54	€ 23.440.306,54	€ 23.440.306,54	€ 23.440.306,54	€ 23.440.306,54	€ 23.440.306,54	€ 23.440.306,54	€ 23.440.306,54	€ 23.440.306,54	€ 23.440.306,54	€ 23.440.306,54	€ 23.440.306,54
Ingreso potencia	€ -	€ 31.229.226,00	€ 31.229.226,00	€ 31.229.226,00	€ 31.229.226,00	€ 31.229.226,00	€ 31.229.226,00	€ 31.229.226,00	€ 31.229.226,00	€ 31.229.226,00	€ 31.229.226,00	€ 31.229.226,00	€ 31.229.226,00	€ 31.229.226,00	€ 31.229.226,00	€ 31.229.226,00
Ingreso total	€ -	€ 54.669.532,54	€ 54.669.532,54	€ 54.669.532,54	€ 54.669.532,54	€ 54.669.532,54	€ 54.669.532,54	€ 54.669.532,54	€ 54.669.532,54	€ 54.669.532,54	€ 54.669.532,54	€ 54.669.532,54	€ 54.669.532,54	€ 54.669.532,54	€ 54.669.532,54	€ 54.669.532,54
Costo																
kWh instalado	€ 615.000.000,00	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Costo de instalación	€ 9.225.000,00	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Costo de transformador	€ 15.000.000,00	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Total costo	€ 639.225.000,00	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Gasto																
Mantenimiento Anual	€ -	€ 1.000.000,00	€ 1.010.000,00	€ 1.020.100,00	€ 1.030.301,00	€ 1.040.604,01	€ 1.051.010,05	€ 1.061.520,15	€ 1.072.135,35	€ 1.082.856,71	€ 1.093.685,27	€ 1.104.622,13	€ 1.115.668,35	€ 1.126.825,03	€ 1.138.093,28	€ 1.149.474,21
Depreciación	€ -	€ 20.500.000,00	€ 20.500.000,00	€ 20.500.000,00	€ 20.500.000,00	€ 20.500.000,00	€ 20.500.000,00	€ 20.500.000,00	€ 20.500.000,00	€ 20.500.000,00	€ 20.500.000,00	€ 20.500.000,00	€ 20.500.000,00	€ 20.500.000,00	€ 20.500.000,00	€ 20.500.000,00
Total Gasto	€ -	€ 21.500.000,00	€ 21.510.000,00	€ 21.520.100,00	€ 21.530.301,00	€ 21.540.604,01	€ 21.551.010,05	€ 21.561.520,15	€ 21.572.135,35	€ 21.582.856,71	€ 21.593.685,27	€ 21.604.622,13	€ 21.615.668,35	€ 21.626.825,03	€ 21.638.093,28	€ 21.649.474,21
Utilidad	€ 639.225.000,00	€ 33.169.532,54	€ 33.159.532,54	€ 33.149.432,54	€ 33.139.231,54	€ 33.128.928,53	€ 33.118.522,49	€ 33.108.012,39	€ 33.097.397,19	€ 33.086.675,83	€ 33.075.847,26	€ 33.064.910,41	€ 33.053.864,19	€ 33.042.707,51	€ 33.031.439,26	€ 33.020.058,32
Pérdidas o ganancias del periodo	€ 639.225.000,00	€ 33.169.532,54	€ 33.159.532,54	€ 33.149.432,54	€ 33.139.231,54	€ 33.128.928,53	€ 33.118.522,49	€ 33.108.012,39	€ 33.097.397,19	€ 33.086.675,83	€ 33.075.847,26	€ 33.064.910,41	€ 33.053.864,19	€ 33.042.707,51	€ 33.031.439,26	€ 33.020.058,32

Informacion financiera

TASA DE DESCUENTO 5%

Fuente: Creación propia.

VAN	-€ 295.595.788,99	No Rentable
TIR	-3%	No Rentable

De este modo, se observa que con datos económicos optimistas se pueden mejorar los datos del valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR); sin embargo, no continuó siendo viable el desarrollo del proyecto.

En la figura 42, se aprecia el flujo de caja con los mismos datos de la figura 41, pero cambiando la capacidad de almacenamiento a 30 MW.

Figura 42
Flujo de caja proyectado con datos económicos optimistas para determinar la viabilidad del proyecto (30 MW)

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ingreso por arbitraje tarifario	€ -	€ 118.965.858,34	€ 118.965.858,34	€ 118.965.858,34	€ 118.965.858,34	€ 118.965.858,34	€ 118.965.858,34	€ 118.965.858,34	€ 118.965.858,34	€ 118.965.858,34	€ 118.965.858,34	€ 118.965.858,34	€ 118.965.858,34	€ 118.965.858,34	€ 118.965.858,34	€ 118.965.858,34
Ingreso potencia	€ -	€ 187.375.356,00	€ 187.375.356,00	€ 187.375.356,00	€ 187.375.356,00	€ 187.375.356,00	€ 187.375.356,00	€ 187.375.356,00	€ 187.375.356,00	€ 187.375.356,00	€ 187.375.356,00	€ 187.375.356,00	€ 187.375.356,00	€ 187.375.356,00	€ 187.375.356,00	€ 187.375.356,00
Ingreso total	€ -	€ 306.341.214,34	€ 306.341.214,34	€ 306.341.214,34	€ 306.341.214,34	€ 306.341.214,34	€ 306.341.214,34	€ 306.341.214,34	€ 306.341.214,34	€ 306.341.214,34	€ 306.341.214,34	€ 306.341.214,34	€ 306.341.214,34	€ 306.341.214,34	€ 306.341.214,34	€ 306.341.214,34
Costo																
kWh instalado	€ 3.690.000.000,00	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Costo de instalación	€ 55.350.000,00	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Costo de transformador	€ 15.000.000,00	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Total costo	€ 3.760.350.000,00	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Gasto																
Mantenimiento Anual	€ -	€ 1.000.000,00	€ 1.010.000,00	€ 1.020.100,00	€ 1.030.301,00	€ 1.040.604,01	€ 1.051.010,05	€ 1.061.520,15	€ 1.072.135,35	€ 1.082.856,71	€ 1.093.685,27	€ 1.104.622,13	€ 1.115.668,35	€ 1.126.825,03	€ 1.138.093,28	€ 1.149.474,21
Depreciación	€ 123.000.000,00	€ 123.000.000,00	€ 123.000.000,00	€ 123.000.000,00	€ 123.000.000,00	€ 123.000.000,00	€ 123.000.000,00	€ 123.000.000,00	€ 123.000.000,00	€ 123.000.000,00	€ 123.000.000,00	€ 123.000.000,00	€ 123.000.000,00	€ 123.000.000,00	€ 123.000.000,00	€ 123.000.000,00
Total Gasto	€ -	€ 124.000.000,00	€ 124.010.000,00	€ 124.020.100,00	€ 124.030.301,00	€ 124.040.604,01	€ 124.051.010,05	€ 124.061.520,15	€ 124.072.135,35	€ 124.082.856,71	€ 124.093.685,27	€ 124.104.622,13	€ 124.115.668,35	€ 124.126.825,03	€ 124.138.093,28	€ 124.149.474,21
Utilidad	€ -3.760.350.000,00	€ 182.341.214,34	€ 182.331.214,34	€ 182.321.114,34	€ 182.310.913,34	€ 182.300.610,33	€ 182.290.204,29	€ 182.279.694,19	€ 182.269.078,99	€ 182.258.357,63	€ 182.247.529,06	€ 182.236.592,21	€ 182.225.545,99	€ 182.214.389,31	€ 182.203.121,06	€ 182.191.740,12
Pérdidas o ganancias del periodo	€ -3.760.350.000,00	€ 182.341.214,34	€ 182.331.214,34	€ 182.321.114,34	€ 182.310.913,34	€ 182.300.610,33	€ 182.290.204,29	€ 182.279.694,19	€ 182.269.078,99	€ 182.258.357,63	€ 182.247.529,06	€ 182.236.592,21	€ 182.225.545,99	€ 182.214.389,31	€ 182.203.121,06	€ 182.191.740,12

Informacion financiera

TASA DE DESCUENTO	5%
-------------------	----

VAN	-€ 1.868.369.742,92	No Rentable
TIR	-4%	No Rentable

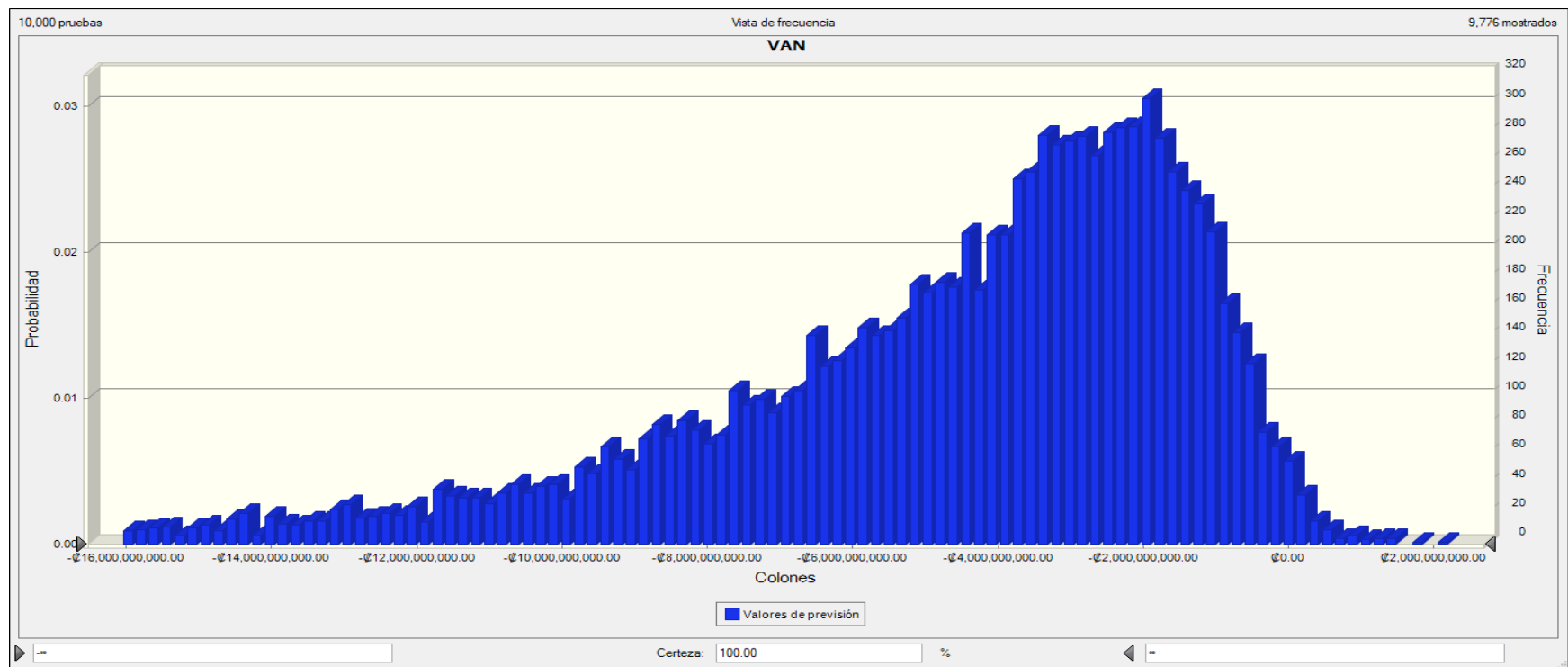
Fuente: Creación propia.

Al ocurrir lo mismo que en los casos expuestos donde se utilizaban valores reales actuales, se demostró que al aumentar la capacidad de almacenamiento, los datos del valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) tendieron a ser más negativos y menos rentables.

4.9.3 Análisis económico por medio de software

Debido a que es necesario analizar todas las posibles opciones para una inversión financiera, se llevó a cabo un estudio mediante el *software* Crystal Ball, donde se ingresaron datos variables con el objetivo de crear predicciones mediante miles de simulaciones.

Figura 43
Previsión del VAN



Fuente: Creación propia.

Figura 44
Datos de predicción del VAN

10,000 pruebas		
	Estadística	Valores de previsión
► Pruebas		10,000
	Caso base	-C\$322,617,267.69
	Media	-C\$4,917,942,921.15
	Mediana	-C\$3,833,580,032.57
	Modo	---
	Desviación estándar	C\$3,981,138,696.71
	Varianza	C\$15,849,465,322,446,900.0
	Sesgo	-1.96
	Curtosis	9.32
	Coefficiente de variación	-0.8095
	Mínimo	-C\$39,444,908,199.99
	Máximo	C\$2,216,514,270.98
	Error estándar medio	C\$39,811,386.97

Fuente: Creación propia

Las ilustraciones 43 y 44 se obtuvieron por medio del *software* Crystal Ball mediante un modelo estadístico denominado simulación Monte Carlo, el cual se basa en generar posibles escenarios resultantes de una serie de datos, logrando resultados graficados, así como valores de precisión estadísticos.

Cabe señalar que esto se generó a partir de un muestreo de 10 000 simulaciones, las cuales tomaron como base los datos principales de este proyecto, a saber, la tarifa T-CB, el coste del kWh instalado, el precio del dólar y la potencia de almacenaje, a los que se les definieron suposiciones, las mismas van desde valores mínimos posibles hasta los máximos posibles, además de los más probables.

Al analizar el gráfico obtenido mediante este modelo de estudio, se determinó que la probabilidad de que sea rentable instalar un sistema de almacenamiento en el PI Brasil es

claramente muy baja. Si se aprecia con detenimiento, tener un VAN positivo, donde las ganancias sean mayores a 0 colones, fue imposible al ser menor que 0,005.

Es importante mencionar que una de las principales situaciones por las cuales no se encontró viabilidad en el proyecto obedeció a que el costo del kWh instalado en sistemas de almacenamiento es muy elevado, por lo tanto, la inversión inicial tiene un alto valor en los proyectos; de manera que este monto afectó directamente la rentabilidad del proyecto en lo económico.

Un escenario probable de viabilidad sería donde el costo del kWh se reduzca de modo considerable, lo cual daría como resultado una baja inversión inicial por recuperar. Al respecto, según proyecciones, este valor estaría bajando cuantiosamente en los próximos años, por consiguiente, otra vez se podrían llevar a cabo estos estudios con los nuevos precios del kWh instalado para buscar la viabilidad del proyecto.

Además, en la actualidad para el sector público el pago de la potencia por máxima demanda no es considerable, lo cual minimiza los ingresos y afecta la recuperación del capital de inversión; adicional, las tasas de ingreso interno no proyectan números económicamente viables. Por lo tanto, el aumento en las tarifas de pago por máxima demanda para el sector impulsaría de forma positiva la rentabilidad de aplicar el sistema de almacenamiento.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- De acuerdo con el estudio realizado sobre la carga de los circuitos del patio de interruptores Brasil y su comportamiento en los distintos periodos, se determinó que el consumo de estos circuitos es cubierto por la generación de la planta hidroeléctrica Brasil cuando esta se encuentra generando; además, en el periodo nocturno, cuando existe generación, se presenta un excedente de energía, ya que la demanda de estos circuitos es considerablemente baja durante este periodo.
- Se obtuvo el análisis de la generación de la PH Brasil, basándose en datos reales recolectados durante los años que comprenden desde el 2016 al 2020 inclusive; así mismo, se llevó a cabo una comparativa con la demanda de los circuitos alimentados con esta energía, determinándose que el momento óptimo para acumular energía es durante el periodo nocturno.
- Se identificaron distintos beneficios en cuanto a la implementación de un sistema de almacenamiento, como lo son el aumento de los ingresos económicos por el arbitraje tarifario, la regulación y control de la frecuencia, el voltaje por parte de estos equipos, el respaldo de emergencia para circuitos del PI Brasil, así como convertirse en un complemento respecto a las energías renovables.
- Según el análisis hecho acerca de la estructura de almacenamiento, se concluyó que de acuerdo con los tres aspectos desarrollados, los cuales se basaron en la disponibilidad de energía excedente para almacenar, la demanda de la energía en la subestación Lindora y el espacio físico en el PI Brasil, el dimensionamiento ideal del sistema debía ser de 5 MW, pero es restringido por el espacio físico; sin embargo,

pensado en una posible ampliación del espacio, se efectuaron análisis económicos hasta los 30 MW, porque la disponibilidad de energía y la demanda lo permitían.

- Al realizar un flujo de caja proyectado a quince años, se determinó que no se logra recuperar la inversión, pues indicadores como el TIR y el VAN arrojaron datos negativos, evidenciando que no es factible al no tener viabilidad económica.
- Con el fin de buscar viabilidad económica, se varió la capacidad de almacenamiento hasta 30 MW, pero continuó mostrando una no viabilidad del proyecto, lo cual sugirió que el aumento del costo del kWh por instalar afecta directamente la recuperación de inversión.
- Por último, se llevó a cabo un análisis más intensivo por medio del *software* Crystal Ball, donde después de 10 000 simulaciones se obtuvo una gráfica de posibles resultados, la cual muestra datos negativos y una muy baja probabilidad de lograr rentabilidad al aplicar la propuesta de este sistema de almacenamiento.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda efectuar una actualización del análisis económico de este proyecto en los próximos años, ya que, de acuerdo con estudios realizados, los precios de los sistemas de almacenamiento bajarían con el paso de los años, así como su eficiencia, además de la variación del costo del kWh.
- Es necesario desarrollar un estudio donde al sistema de almacenamiento se le dé la utilidad mencionada en este documento, pero también se podría buscar la viabilidad de este con un sistema más robusto, de manera que el sistema de almacenamiento sea instalado en la subestación Lindora, para que asimismo sea utilizado descargando

energía en el periodo nocturno y exportando en el periodo punta, lo cual generaría ganancias por arbitraje tarifario.

- Se sugiere analizar nuevas alternativas de almacenamiento de energía, pues hoy la tecnología juega un papel indispensable en la innovación de equipos tecnológicos, los cuales pueden beneficiar en un futuro este proyecto al originar un menor impacto económico.

ANEXOS

Anexo1: Carta de autorización para uso y manejo de los trabajos finales de graduación
Universidad Técnica Nacional.



Ingeniería Eléctrica
Sede del Pacífico



**CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA USO Y MANEJO DE LOS TRABAJOS
FINALES DE GRADUACIÓN UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL**
(Trabajo colectivo)

Señores/as
Vicerrectoría de Investigación
Sistema Integrado de Bibliotecas y Recursos Digitales

Estimados señores:

Nombre completo de sustentantes	Número de identificación
<i>Jonathan Campos Muñoz</i>	<i>1-1477-0853</i>
<i>Diana Fabiola Elisavinda Varela</i>	<i>6-0477-0005</i>

Nosotros en calidad de autores del trabajo de graduación titulado:
Estudio de viabilidad sobre el aprovechamiento de energía en patios de interruptores de la planta hidroeléctrica Bani de la CNF

El cual se presenta bajo la modalidad de, marque una opción:
☐ Seminario de Graduación
☒ Proyecto de Graduación
☐ Tesis de Graduación

Presentado en la fecha Día/Mes/Año autorizamos a la Universidad Técnica Nacional, Sede Pacífico, para que nuestro trabajo pueda ser manejado de la siguiente manera:

Autorizamos Ver CAPÍTULO V, DISPOSICIONES, FINALES. Artículo 43. RTFG. Marque con una X o un ✓	
Conservación de ejemplares para préstamo y consulta física en biblioteca	X
Inclusión en el catálogo digital del SIBREDI (Cita catalográfica)	X
Comunicación y divulgación a través del Repositorio Institucional	X
Divulgación del resumen en el Repositorio UTN con una cantidad de 200 a 500 palabras	X
Consulta electrónica con texto protegido	X
Descarga electrónica del documento en texto completo protegido	X
Inclusión en bases de datos y sitios web que se encuentren en convenio con la Universidad Técnica Nacional contando con las mismas condiciones y limitaciones aquí establecidas.	X



Ingeniería Eléctrica
Sede del Pacífico



Por otra parte, declaramos que el trabajo que aquí presentamos es de plena autoría, es un esfuerzo realizado de forma conjunta, académica e intelectual con plenos elementos de originalidad y creatividad. Garantizamos que no contiene citas, ni transcripciones de forma indebida que puedan devenir en plagio, pues se ha utilizado la normativa vigente de la American Psychological Association (APA). Las citas y transcripciones utilizadas se realizan en el marco de respeto a las obras de terceros. La responsabilidad directa en el diseño y presentación son de competencia exclusiva, por tanto, eximo de toda responsabilidad a la Universidad Técnica Nacional. Conscientes de que las autorizaciones no reprimen nuestros derechos patrimoniales como autores del trabajo. Confiamos en que la Universidad Técnica Nacional respete y haga respetar nuestros derechos de propiedad intelectual.

Día: 10 de mayo del 2022

Nombre del estudiante	Cédula	Firma
Juan Carlos Campos	1-1422-0853	
Juan Elizondo Kueb	0-0422-0005	

BIBLIOGRAFÍA

Arcos, Á. y Pérez de Vargas, J. (2017). *El almacenamiento de energía en la distribución eléctrica del futuro Raing.es. Real Academia de Ingeniería.*
http://www.raing.es/sites/default/files/ALMACENAMIENTO_ENERGIA%20FINAL%20B.pdf

Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP). (2021). *Electricidad.*
<https://aresep.go.cr/electricidad>

Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP). (2021). *Inicio.*
<https://aresep.go.cr/>

Auto Solar. (2021). *Baterías de ciclo profundo.* <https://autosolar.es/baterias/baterias-de-ciclo-profundo#:~:text=Una%20bater%C3%ADa%20de%20ciclo%20profundo%20es%20aquella%20que%20por%20su,de%20profundidad%20superiores%20al%2050%25.&text=Las%20bater%C3%ADas%20de%20ciclo%20profundo%20son%20aquellas%20bat>

Avolta Energy. (2020). *Descubra cómo funcionan las baterías Tesla y por qué son revolucionarias.* <https://avoltaenergy.com/por-que-invertir-en-baterias-tesla/>

Castro, J., Villareal, R. y Domínguez, M. (2019). *Sistemas de almacenamiento mediante baterías electroquímicas. Contribución a la integración de energías renovables.*
https://www.researchgate.net/publication/333641870_Sistemas_de_almacenamiento_mediante_baterias_electroquimicas_Contribucion_a_la_integracion_de_energias_renovables

Cole, W. y Frazier, W. (2020). *Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2020 Update*. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75385.pdf>

Fernández, J. y Álvaro, R. (2019). *El sector del almacenamiento de energía eléctrica en la CAPV*. Orkestra.

<https://www.orquestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/sector-almacenamiento-energia-electrica-capv.pdf>

Hutchins, M. (2020). *La mejor batería para el almacenamiento de energía a nivel de red*. <https://www.pv-magazine-latam.com/2020/02/11/la-mejor-bateria-para-el-almacenamiento-de-energia-a-nivel-de-red/>

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). (2021). *Plan de Expansión de la Generación Eléctrica 2020-2035*. https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/741c8397-09f0-4109-a444-bed598cb7440/PLAN+DE+EXPANSI%C3%93N+DE+LA+GENERACI%C3%93N+EL%C3%89CTRICA+2020%E2%80%932035_compressed.pdf?MOD=AJPERES&CVID=nJADNyi

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). (2021). *Tarifas actuales*. <https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/669c79e9-84c9-4682-b63b-136238ebc7e2/Tarifas+actuales.pdf?MOD=AJPERES>

Instituto Costarricense de Turismo (ICT). (s.f.). *Costa Rica cierra 2019 con 99 % en generación eléctrica renovable*. <https://www.ict.go.cr/es/noticias-destacadas-2/1626-costa-rica-cierra-2019-con-99-en>

Mayoral, J. (2019). *Tecnologías de almacenamiento de energía con énfasis en electroquímica*. (Tesis de maestría en Energías Renovables). Universidad Politécnica de Tulancingo. México.

http://www.upt.edu.mx/Contenido/Investigacion/Contenido/TESIS/MER/2019/MER_T_2019_01_JMH.pdf

Merino, L. (2020). *Cómo avanza el almacenamiento energético*. <https://www.energias-renovables.com/almacenamiento/como-avanza-el-almacenamiento-energetico-20200422>

Miranda, U. y Acosta, Z. (2008). *Fuentes de información para la recolección de información cualitativa y cualitativa*. <http://docs.bvsalud.org/biblioref/2018/06/885032/texto-no-2-fuentes-de-informacion.pdf>.

Moreno, F. (2012). *Introducción al almacenamiento energético*. http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5120/fichero/Memoria%252F3_Cap%C3%A9tulo+1+Introducci%C3%B3n+Almacenamiento+Energ%C3%A9tico.pdf

Murillo, W. (2008). *La investigación científica*. <http://www.monografias.com/trabajos15/invest-científica/investcientífica.shtm>

Noya, C. (2021). *Tesla confirma el precio de la batería estacionaria Megapack, y que está agotada hasta 2023*. <https://forococheelectricos.com/2021/07/tesla-precio-de-la-bateria-megapack.html>

Pérez, E. (2019). *Análisis económico de almacenamiento de energía en la red eléctrica mediante baterías de litio*. (Trabajo para optar por el grado de maestría en Organización Industrial y Gestión de Empresas), Universidad de Sevilla, España. <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/92223/TFM-1398-PEREZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Quirós, J., Rojas, J., Arrieta, O. y Parajeles, M. (2018). *Estudio sobre viabilidad de opciones para almacenamiento de energía*.

https://sepse.go.cr/documentos/Estudio_Viabilidad_Opciones_para_Almacenamiento_de_Energia_SEPSE_ICE_UCR_2018.pdf

Serrano, E. (s.f.). El almacenamiento de electricidad distribuido: origen, estado del arte e implicaciones Enerclub. *Cuadernos de Energía*, 125-131.
https://www.enerclub.es/file/KrixCBh4_x1QLGk0udvtsA;jsessionid=570E85B58DEA739FBDC25E275

TESLA. (2021). *Powerpack*. https://www.tesla.com/es_PR/powerpack

WEG.NET. (s.f.). ESSW.
https://www.weg.net/catalog/weg/US/es/WDC_CRITICAL_POWER_BESS_ESSW

Merino, L. (22 de abril de 2020). Cómo avanza el almacenamiento energético. *Energías Renovables*. <https://www.energias-renovables.com/almacenamiento/como-avanza-el-almacenamiento-energetico-20200422>

Moreno, F. (2012). *Introducción al almacenamiento energético*.
http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5120/fichero/Memoria%252F3_Cap%C3%A9Dtulo+1+Introducci%C3%B3n+Almacenamiento+Energ%C3%A9tico.pdf

Murillo, W. (2008). *La investigación científica*. <http://www.monografias.com/trabajos15/invest-científica/investcientífica.shtm>

Miranda, U. y Acosta, Z. (2008). *Fuentes de información para la recolección de información cualitativa y cualitativa*. <http://docs.bvsalud.org/biblioref/2018/06/885032/texto-no-2-fuentes-de-informacion.pdf>.

Quirós, J., Rojas, J., Arrieta, O. y Parajeles, M. (2018). *Estudio sobre variabilidad de opciones para almacenamiento de energía*.

https://sepse.go.cr/documentos/Estudio_Viabilidad_Opciones_para_Almacenamiento_de_Energia_SEPSE_ICE_UCR_2018.pdf.

TESLA. (2021). *Powerpack*. https://www.tesla.com/es_PR/powerpack

WEG.NET. (s.f.). *ESSW*.

https://www.weg.net/catalog/weg/US/es/WDC_CRITICAL_POWER_BEES_ES

W