



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE ELECTRICIDAD

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN EL
SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE LA EERSSA

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniera Eléctrica

AUTORA: CARLA DOMÉNICA BARRETO HIDALGO
TUTOR: ING. JOHNNY XAVIER SERRANO GUERRERO, PhD.

Cuenca – Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carla Doménica Barreto Hidalgo con documento de identificación N° 1104558190, manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 19 de agosto del 2023

Atentamente,

Carla Doménica Barreto Hidalgo

1104558190

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
SALESIANA**

Yo, Carla Doménica Barreto Hidalgo con documento de identificación N° 1104558190, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto técnico: Análisis de factibilidad para la implementación de un sistema de almacenamiento de energía en el sistema eléctrico de potencia de la EERSSA, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Eléctrica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 19 de agosto del 2023

Atentamente,

Carla Doménica Barreto Hidalgo

1104558190

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Johnny Xavier Serrano Guerrero con documento de identificación N° 0104983382, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: Análisis de factibilidad para la implementación de un sistema de almacenamiento de energía en el sistema eléctrico de potencia de la EERSSA, realizado por Carla Doménica Barreto Hidalgo con documento de identificación N° 1104558190, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 19 de agosto del 2023

Atentamente,

Ing. Xavier Serrano Guerrero Ph.D.

0104983382

DEDICATORIA

Dedico esta tesis con profundo amor y gratitud a mis queridos padres, Raúl y María Fernanda, quienes han sido mi apoyo incondicional y pilar fundamental a lo largo de mi carrera y vida. Gracias a su sacrificio, amor y paciencia, me han forjado en la persona que soy hoy en día. A mi hermana, María Fernanda por su fiel compañía, ayuda y motivación para alcanzar este logro. A mi familia, amigos y compañeros que han estado a mi lado en cada paso del camino.

Carla Doménica Barreto Hidalgo

RESUMEN

El presente trabajo de tesis se enfocó en el análisis de la implementación de un sistema de almacenamiento de baterías (BESS) en el sistema eléctrico de potencia de la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. (EERSSA) a nivel de subtransmisión. Para ello, se utilizó la herramienta Cymdist para modelar el sistema y simular el impacto que produce la incorporación de generación fotovoltaica. Se llevaron a cabo diversas simulaciones con el objetivo de caracterizar la demanda eléctrica, analizar la operación del sistema y estudiar el flujo de carga durante un periodo de 24 horas. Logrando dimensionar el BESS que permita optimizar el sistema y mejorar los parámetros eléctricos en los cantones de Pindal y Celica.

La investigación arrojó resultados alentadores, mostrando que la implementación del BESS permitió la eliminación de picos de demanda, aplanando la curva de carga durante horas pico y reducir significativamente las pérdidas de energía que existen en las líneas de subtransmisión, generando un ahorro de 20.802 kWh anuales. Además, el BESS demostró ser una herramienta efectiva para mejorar el perfil de voltaje en las subestaciones Celica y Pindal, asegurando que se mantengan dentro del rango aceptable para mejorar la calidad del servicio de la EERSSA.

El análisis económico también respaldó la viabilidad de implementar el sistema de almacenamiento de energía, ya que se proyectó un Valor Presente Neto positivo, una Tasa Interna de Retorno adecuada del 12,96% y una Relación Beneficio Costo de 1,04 siendo así factible la solución planteada.

ABSTRACT

The present thesis is focused on the analysis of the implementation of a Battery Energy Storage System (BESS) in the power electrical system of Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. (EERSSA) at the subtransmission level. To achieve this, the Cymdist tool was used to model the system and simulate the impact of integrating photovoltaic generation. Various simulations were conducted with the aim of characterizing the electricity demand, analyzing the system's operation, and studying the load flow over a 24-hour period to size the BESS, allowing for system optimization and improvement of electrical parameters in the cantons of Pindal and Celica.

The research yielded encouraging results, demonstrating that the implementation of the BESS allowed the elimination of demand peaks, flattening the load curve during peak hours, and significantly reducing energy losses in the subtransmission lines, resulting in an annual saving of 20,802 kWh. Additionally, the BESS proved to be an effective tool for improving the voltage profile in Celica and Pindal substations, ensuring they remain within an acceptable range for enhancing the service quality provided by EERSSA.

The economic analysis also supported the viability of implementing the energy storage system, as it projected a positive Net Present Value, an appropriate Internal Rate of Return of 12,96%, and a Benefit-Cost Ratio of 1,04, making the proposed solution achievable.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	i
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	ii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
1 SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE LA EERSSA	4
1.1 Características del SEP	4
1.2 Curva de carga del sistema	7
2 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	9
2.1 Tipos de sistemas de almacenamiento de energía	10
3 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE LA EERSSA	13
3.1 Cymdist	13
3.2 Modelo dinámico del SEP de la EERSSA	13
3.3 Modelación y funcionamiento del sistema de subtransmisión de la EERSSA	15
3.4 Funcionamiento del sistema con operación de la central fotovoltaica sin sistema de almacenamiento de energía	17
3.5 Simulación del funcionamiento de sistemas de generación fotovoltaica en Cymdist	18

4	SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PROPUESTO	22
4.1	Dimensionamiento del Sistema de Almacenamiento de Energía	22
4.2	Diseño del Sistema de Almacenamiento de Energía	25
4.2.1	Sistema de Baterías	26
4.2.2	Sistema de Gestión de las Baterías	27
4.2.3	Sistema de Conversión de Potencia (PCS)	28
4.2.4	Sistema de Control	29
4.2.5	Sistema Contra Incendios	30
4.2.6	Sistema de Control Ambiental	31
5	ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA	32
5.1	Análisis de factibilidad técnica de la implementación de un sistema de almacenamiento de energía	32
5.1.1	Funcionamiento del sistema con operación de la central fotovoltaica y con sistema de almacenamiento de energía	32
5.2	Análisis de factibilidad económica de la implementación de un sistema de almacenamiento de energía	33
5.2.1	Presupuesto Referencial para Implementación	33
5.2.2	Análisis Económico	35
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
	ANEXOS	40
A	DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA DE LA EERSSA	41
B	DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA DE LA EERSSA EN CYMDIST	43
	BIBLIOGRAFÍA	46

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Curva de Carga de Potencia Activa del Anillo de Subtransmisión de la EERSSA.	7
1.2	Curva de Carga de Potencia Reactiva del Anillo de Subtransmisión de la EERSSA.	8
2.1	Clasificación de aplicaciones de almacenamiento de energía. [1]	10
2.2	Sistemas de almacenamiento de energía con tecnología de baterías - BESS.	12
3.1	Curva de Carga del Sistema de la EERSSA modelada en Cymdist.	14
3.2	Curva de Carga del Sistema de la EERSSA modelada en Cymdist.	15
3.3	Perfil de Voltaje de Barras de Media Tensión de las SE Celica y Pindal (pu)	16
3.4	Flujo de Potencia por la LST Empalme – Celica.	16
3.5	Pérdidas de Potencia en Líneas de Subtransmisión.	17
3.6	Perfil de voltaje de las barras de 13.8 kV de las SE Celica y Pindal.	18
3.7	Curva de Irradiancia modelada en Cymdist.	18
3.8	Características Técnicas de los Paneles Fotovoltaicos modelados en Cymdist.	19
3.9	Características Técnicas de cada Arreglo Fotovoltaicos modelados en Cymdist.	20
3.10	Conexión de la Central Fotovoltaica Aroma Santo al Sistema de Subtransmisión de la EERSSA, modelada en Cymdist.	20
3.11	Características técnicas del Transformador de Potencia de la Subestación Aroma Santo, modeladas en Cymdist.	21
4.1	Sistema de subtransmisión de la EERSSA.	22
4.2	Ramal de Subtransmisión hacia Pindal.	23
4.3	Sistema de Almacenamiento en la SE Pindal.	24
4.4	Características técnicas del BESS modeladas en Cymdist.	24
4.5	Pico de perdidas Línea el Empalme-Pindal.	25
4.6	Estructura del sistema de baterías. [2]	27
4.7	Estructura del sistema de almacenamiento de Energía. [2]	27
4.8	Diagrama PCS.	29
4.9	Controlador de incendios. [2]	30
4.10	Detector de humo fotoeléctrico. [2]	31
5.1	Energía almacenada en el BESS.	33
5.2	Curvas de Carga de Líneas de Subtransmisión.	33
5.3	Curvas de Perfil de Voltajes de las SE Celica y Pindal.	34
5.4	Pérdidas Totales en las LST Empalme – Celica y Celica- Pindal.	34

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Características Técnicas de las Subestaciones de la EERSSA.	5
1.2	Características Técnicas de las Líneas de Subtransmisión de la EERSSA.	6
4.1	Datos de potencia de la Línea el Empalme-Pindal	25
4.2	Especificaciones del sistema de almacenamiento.	26
4.3	Especificaciones de la estructura de las baterías.	28
5.1	Análisis económico del proyecto.	37

INTRODUCCIÓN

En la actualidad debido al uso excesivo de recursos naturales no renovables tales como, combustibles fósiles, es necesario analizar la implementación de producción de energía más sostenible y amigable con el medio ambiente. De esta manera el uso de energías renovables como la eólica, solar e hidráulica han sido tema de sumo interés obteniendo protagonismo en el sector de generación eléctrica alrededor del mundo y el Ecuador [3].

De acuerdo con las características y la situación geográfica del país existe un alto potencial solar para la generación fotovoltaica. Si bien es posible una elevada eficiencia mediante esta fuente de energía, el inconveniente se presenta en la discontinuidad de la generación durante el día y la intermitencia en caso de que exista nubosidad [4]. La variación de la demanda y el incremento de consumo de potencia en horas sin generación son los impedimentos que limitan este tipo de centrales. Una de las soluciones más efectivas es la implementación de un sistema de almacenamiento de energía, siendo las baterías como método mayormente empleado. La amplia tecnología existente en la actualidad permite que se adapte al tipo de necesidad del sistema y las condiciones en las que debe operar y de esta manera mejorar la eficacia y alargar la vida útil de las mismas. Mejorando la estabilidad y aumentando la robustez en el sistema y evitar problemas de fluctuaciones de potencia y de voltaje [5].

Dentro de sistemas de almacenamiento de energía como solución en generación de energía renovable se tiene varios casos de estudios previos desarrollados. En [3] se explican los tipos de sistemas de almacenamientos de energía de acuerdo con las diversas tecnologías que se pueden emplear para la implementación en energía renovables dependiendo de los aspectos de la red. De igual manera, en [5] se redacta los diversos tipos de generación eléctrica renovable y los beneficios que pueden generar el incremento de un BESS al igual que de acuerdo al tipo de sistema que se seleccione puede generar diversas mejoras en el sistema de potencia. En [1] se hace un análisis de las principales tecnologías que se incrementan en el almacenamiento de energía ya sea para micro redes eléctricas y el beneficio que presenta en la red debido a la intermitencia y variabilidad de las fuentes de energía renovable y de esta manera garantizar la fiabilidad, disponibilidad y calidad del servicio. Finalmente en la implementación aplicado en Rusia en [6] se hace un análisis completo de como se ha implementado BESS en proyectos existentes en el país y otras partes del mundo y el enfoque que se implementa para solventar problemas en el sistema eléctrico con el

incremento de energía renovable y los tipos de almacenamiento que destacan según la clase de problema que exista en la red.

Diversos estudios que aportan información referente al tema sistema de almacenamiento de energía eléctrica en sistemas eléctricos de potencia. En [7] explica el inicio de la implementación de sistemas de baterías en subestaciones y [8] donde existe el análisis de la información metodológica para energías renovables en el Ecuador. En [9] desarrolla un análisis de sistemas de almacenamiento de energía de manera global y las diversas tecnologías. Al igual que diferentes tipos de almacenamiento como en [10] que implementa superconductores magnéticos en sistemas de generación eólica y fotovoltaica. Dentro del sistema de almacenamiento de energía es necesario la coordinación de control de sistema [11] y la eficiencia técnica y económica de la incorporación del sistema de almacenamiento de energía mediante baterías (BESS) [12].

La implementación de sistemas de almacenamiento dentro de subestaciones y sistemas de red se comenzó a implementar en los años iniciales del siglo XX y se ha ido popularizando notoriamente por el incremento de centrales eólicas y fotovoltaicas por parte del sistema eléctrico como de generación particular [7].

OBJETIVOS

Objetivo General

Efectuar el análisis de factibilidad técnica y económica para la implementación de un sistema de almacenamiento de energía, que contribuya a optimizar la operación del sistema eléctrico de potencia de la EERSSA y a garantizar la calidad del suministro eléctrico a los cantones Pindal y Zapotillo.

Objetivos Específicos

- Modelar el sistema eléctrico de potencia de la EERSSA a nivel de subtransmisión utilizando la herramienta Cymdist.
- Analizar de manera integral el sistema eléctrico de la EERSSA, incluyendo la caracterización de la demanda eléctrica obtenida del sistema SCADA, modelación y simulación de como operan los sistemas de generación fotovoltaicos interconectados al sistema y el análisis dinámico del flujo de carga del sistema eléctrico de potencia durante un período de 24 horas.
- Determinar los criterios para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía adecuado que permita optimizar las condiciones operativas del sistema.
- Definir la viabilidad de su implementación mediante el presupuesto referencial del sistema de almacenamiento.

CAPÍTULO 1

SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE LA EERSSA

1.1 Características del SEP

La EERSSA, es una empresa encargada de la distribución de energía eléctrica, que tiene como Área de Servicio las Provincias de Loja y Zamora Chinchipe, contando también con el cantón Gualaquiza de la Provincia de Morona Santiago, en una superficie de 22.788 km². Cabe mencionar que los usuarios de la EERSSA son mayoritariamente del tipo residencial de bajo consumo, debido a los limitados ingresos de la población y a su dispersión geográfica. Por tanto, se requiere realizar continuamente inversiones, que permitan la optimización de los escasos recursos económicos disponibles y que contribuya a garantizar el suministro de energía eléctrica en las mejores condiciones técnicas y económicas. Con esta finalidad, EERSSA tiene elaborado un plan de inversiones, en la etapa de subtransmisión (Líneas de Subtransmisión y Subestaciones), prevé una inversión para los próximos 10 años de unos 40 millones de USD. Se pretende robustecer el anillo de Subtransmisión de 69 kV, que sirve a los cantones suroccidentales de la provincia de Loja y contribuir de esta manera con el desarrollo de la región fronteriza del Ecuador, en especial de los cantones de Pindal y Zapotillo, posibilitando atender nuevos requerimientos de suministro eléctrico de manera especial en el sector agroindustrial del cantón Zapotillo [13].

Hasta el mes de enero de 2023, la demanda eléctrica del sistema de distribución de la EERSSA es de 73,0 MW de potencia y 422,7 GWh de energía al año, en tanto que la energía facturada a los 220.000 consumidores finales ubicados en el sistema de distribución es de 385,4 GWh, por lo que se registran 37,3 GWh de pérdidas que representan el 8,8 %.

Para abastecer los requerimientos eléctricos de sus clientes, la EERSSA dispone de 23 Subestaciones (SE), con 150,4 MVA de capacidad nominal y en sobrecarga con aire forzado en el transformador de potencia (FA) de 186,15 MVA. La SE Obrapía (1) es la principal ya que recibe directamente la energía del Sistema Nacional Interconectado (S.N.I) del Ecuador, en donde se alimentan las demás Subestaciones del Sistema.

La SE Obrapía es de instalación exterior y se encuentra en el sector occidental de la capital provincial, tiene 20 MVA capacidad, cuenta con dos transformadores

de igual potencia y de ella se derivan tres líneas de subtransmisión aisladas en 69 kV, una de las cuales sirve a la Subestación Catamayo. [13]

Ítem	Subestación	Voltaje 1 (kV)	Voltaje 2 (kV)	Potencia nominal (MVA)	Potencia FA (MVA)
1	Obrapia	69.00	13.80	20.00	25.00
2	San Cayetano	69.00	13.80	25.00	30.00
3	Catamayo	69.00	13.80	15.00	18.75
4	Velacruz	69.00	13.80	0.80	0.80
5	Catacocha	69.00	13.80	2.50	3.13
6	Playas	69.00	13.80	0.80	0.80
7	Saraguro	69.00	13.80	5.00	6.25
8	Celica	69.00	13.80	2.50	3.13
9	Macará	69.00	13.80	5.00	6.25
10	El Empalme	69.00	69.00		
11	Gonzanama	69.00	13.80	2.50	3.13
12	Cariamanga	69.00	13.80	5.00	6.25
13	Chaguarpamba	69.00	13.80	0.80	0.80
14	Yanzatza	69.00	22.00	10.00	12.50
15	Pindal	69.00	13.80	52.00	6.25
16	Norte	69.00	13.80	10.00	12.50
17	Sur	69.00	13.80	10.00	12.50
18	Vilcabamba	69.00	13.80	5.00	6.25
19	Palanda	69.00	22.00	2.50	3.13
20	Cumbaratza	69.00	22.00	10.00	12.50
21	El Pangui	69.00	22.00	5.00	6.25
22	Amaluza	69.00	13.80	5.00	6.25
23	San Ramon	22.00	2.30	3.00	3.75
TOTALES				150.40	186.15

Tabla 1.1: Características Técnicas de las Subestaciones de la EERSSA.

La SE Catamayo, ubicada en el cantón del mismo nombre, tiene una capacidad de 15 MVA con dos transformadores de 10 MVA y 5 MVA respectivamente, a la cual se interconecta una central térmica capaz de generar 10 MW de potencia efectiva.

Desde esta subestación parte un anillo de subtransmisión que opera a 69 kV y que alimenta a 14 cantones de la provincia de Loja, y cuyo punto central se ubica en el sector El Empalme, en donde se tiene operando una subestación de maniobra del mismo nombre, que también es de instalación exterior. La alimentación eléctrica se realiza mediante dos líneas de subtransmisión de 69 kV que salen de la subestación Catamayo y atraviesan distintos cantones de la provincia de Loja.

De la subestación El Empalme parte un ramal en 69 kV que alimenta la SE Celica y de esta a la SE Pindal, que también es de tipo exterior. Se tiene un transformador de potencia trifásico de 5 MVA de relación 69/13.8 kV. En medio voltaje se sirve a los alimentadores primarios Pózul, Pindal, Zapotillo, Alamor y Sabanilla.

En general, el sistema de Subtransmisión de la EERSSA cuenta con 524.33 km de líneas de subtransmisión, la mayor parte de las Líneas de subtransmisión (L/S/T) de la EERSSA son de simple circuito, únicamente existe 0,8 km de L/S/T a doble circuito entre las S/E Loja y la S/E Obrapia, que operan a 69 kV. En el caso de los cantones de Loja, estas líneas forman un anillo de subtransmisión que se encuentra operativo por más de 40 años y que por lo tanto requiere su repotenciación [13].

La capacidad de transporte de potencia de una línea de subtransmisión se define a través de dos límites: el límite térmico de potencia y el límite por regulación de voltaje. El límite térmico de potencia prevalece en líneas cortas, mientras que el límite por regulación de voltaje se aplica en líneas largas. En ambos casos, se busca garantizar una caída máxima del 5 % en los bornes de salida.

En el área de concesión de la EERSSA se tienen muchas dificultades para construir líneas de subtransmisión y subestaciones, debido a la oposición de la población que no permite ejecutar dichos proyectos, por lo que se tienen alimentadores primarios muy largos que producen fuertes caídas de tensión y pérdidas de energía, en especial por el bajo nivel de voltaje utilizado (13,8 kV) [13].

En el Anexo A se presenta el diagrama unifilar del sistema de subtransmisión de la EERSSA.

Ítem	Línea de Subtransmisión	Voltaje (kV)	N° de Circuito	Material Conductor Fase	Calibre Conductor Fase	Long. (km)	Capacidad Transmisión (MW)
1	SE Loja - Obrapia	69.00	2	ACSR	266.8MCM	0.79	84.76
2	Obrapia - San Cayetano	69.00	1	ACSR	266.8MCM	2.28	42.38
3	SE Loja - Catamayo	69.00	1	ACSR	4/OAWG	18.55	32.83
4	Catamayo - Velacruz	69.00	1	ACSR	266.8MCM	25.42	32.23
5	Velacruz-Chaguarpamba	69.00	1	ACSR	2/OAWG	14.34	28.05
6	Velacruz - Catacocha	69.00	1	ACSR	266.8MCM	11.74	42.38
7	Catacocha - Playas	69.00	1	ACSR	2/OAWG	5.79	28.05
8	Playas-El Empalme	69.00	1	ACSR	2/OAWG	27.31	20.27
9	El Empalme - Celica	69.00	1	ACSR	2/OAWG	14.25	28.05
10	El Empalme - Macara	69.00	1	ACSR	2/OAWG	30.77	20.27
11	Catamayo - Gonzanama	69.00	1	ACSR	2/OAWG	31.50	19.82
12	Gozanama - Cariamanga	69.00	1	ACSR	2/OAWG	17.80	28.05
13	Obrapia - Norte	69.00	1	ACSR	2/OAWG	5.00	28.05
14	Norte - Saraguro	69.00	1	ACSR	2/OAWG	40.10	15.57
15	San Cayetano - San Ramon	22.00	1	Cobre	1/OAWG	17.00	4.18
16	San Cayetano - Yanacocha	69.00	1	ACSR	266.8MCM	246	42.38
17	Celica - Pindal	69.00	1	ACSR	2/OAWG	18.83	28.05
18	Cumbaratza - Yanzatza	69.00	1	ACSR	266.8MCM	17.11	42.38
19	Obrapia - Sur	69.00	1	ACSR	266.8MCM	5.03	42.38
20	Sur-Vilcabamba	69.00	1	ACSR	266.8MCM	25.82	30.61
21	Vilcabamba - Palanda	69.00	1	ACSR	266.8MCM	54.00	14.62
22	Cariamanga - Ma cara	69.00	1	ACSR	266.8MCM	54.76	14.44
23	Yanzatza - El Panguí	69.00	1	ACSR	266.8MCM	42.62	18.03
24	Cariamanga - Amaluzza	69.00	1	ACSR	266.8MCM	37.49	20.35
25	Virgenpamba - Yanacocha	69.00	1	ACAR	500MCM	3.57	76.87
TOTAL						524.33	785.05

Tabla 1.2: Características Técnicas de las Líneas de Subtransmisión de la EERSSA.

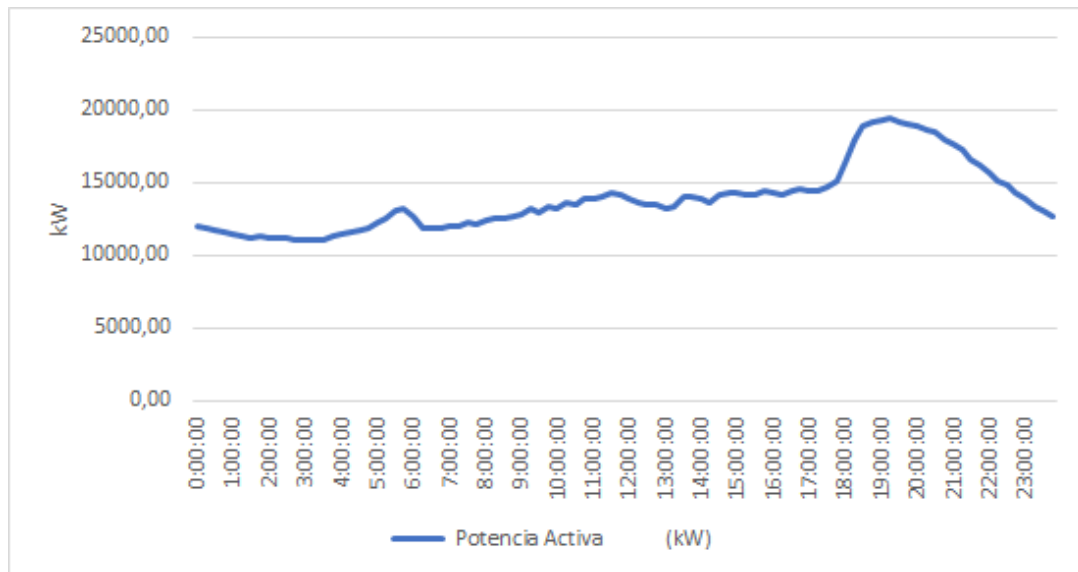


Figura 1.1: Curva de Carga de Potencia Activa del Anillo de Subtransmisión de la EERSSA.

1.2 Curva de carga del sistema

La EERSSA tiene a su disposición un sistema operativo llamado Advanced Distribution Management System (ADMS), que incluye un sistema Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA). Este sistema permite el monitoreo de los parámetros operativos clave del sistema eléctrico en las subestaciones de distribución, incluyendo el registro horario de las demandas eléctricas. A partir de estos datos, se puede obtener una caracterización de la curva de carga del sistema para un período de 24 horas, tal como se observa en la Figura 1.1 y 1.2 .

Como se puede observar en la 1.1, la curva de carga de la EERSSA es predominantemente residencial, con valores de demanda bajos en la mayor parte del día y con un pico muy pronunciado de demanda en las primeras horas de la noche, provocado fundamentalmente por el uso de sistemas de iluminación y electrodomésticos en las residencias de los usuarios.

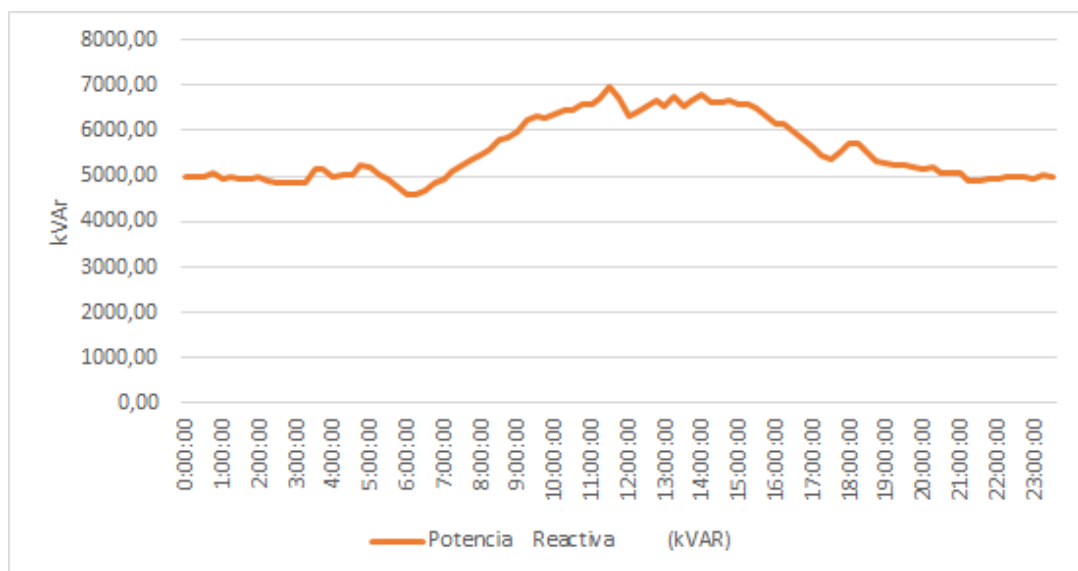


Figura 1.2: Curva de Carga de Potencia Reactiva del Anillo de Subtransmisión de la EERSSA.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

La producción de energía con fuentes renovables, está afectada normalmente por parámetros externos como los ambientales, por lo que tiene características variables e intermitentes. Por ejemplo, las centrales fotovoltaicas sufren el impacto de días nublados, un gran número de estas centrales puede ocasionar problemas de estabilidad en los sistemas eléctricos [1]. Otra circunstancia problemática surge en el hecho de que por lo general no coinciden temporalmente la producción renovable con los mayores requerimientos de la demanda. En el caso particular analizado en este estudio, la producción de energía de la central fotovoltaica Aroma Santo se da en las horas del día, en tanto que la demanda pico o máxima del sistema se da en las primeras horas de la noche.

La existencia de estos fenómenos subraya la importancia de desarrollar e implementar un BESS altamente versátil, que pueda operar en diversos rangos de densidad de energía y potencia. Por tanto, su selección debe ser efectuada cuidadosamente, para dotar al sistema eléctrico de la potencia y energía necesarias en las diferentes horas del día y garantizar el suministro eléctrico a los consumidores. Según [1], los sistemas de almacenamiento se pueden clasificar tal como se muestra en la Figura 2.1. Para aplicaciones de alta potencia, como garantizar la calidad del servicio eléctrico y asegurar la continuidad del suministro en situaciones de descargas energéticas que deben realizarse en fracciones de segundo, se requiere un sistema eficiente y ágil de gestión de energía. Por otro lado si se tratan de sistemas basados en generación distribuida se requiere gran capacidad de energía para entregarla en varias horas de operación cuando no esté presente la generación renovable. Con ello, se logra reducción notoria en el uso de combustibles tipo fósiles, lo que a su vez tiene un impacto positivo en la mitigación de la contaminación ambiental.

ALTA POTENCIA		ALTA ENERGÍA	
Aplicaciones de calidad de potencia y continuidad de servicio.		Aplicaciones de administración de energía.	
Tiempos extra rápidos (seg)	Tiempos rápidos (min)	Tiempos lentos (horas)	
Compensación del efecto de parpadeo (flicker). Corrección de hundimiento de tensión.	Reserva rodante Sistemas de alimentación interrumpida Black start Control de potencia activa y reactiva.	Nivelado de carga Integración con fuentes renovables de energía Operación aislada Comercialización.	

Figura 2.1: Clasificación de aplicaciones de almacenamiento de energía. [1]

2.1 Tipos de sistemas de almacenamiento de energía

Existen diversos tipos de sistemas de almacenamiento basados en la tecnología. A continuación, se mencionan algunos de ellos:

- **Baterías para sistemas de almacenamiento de energía:** Las diferentes tecnologías existentes para almacenar energía permiten tener un amplio rango de baterías de acuerdo con la aplicación, como es, el costo, tamaño y vida útil necesaria de acuerdo con el tipo de uso. El tipo de tecnología más utilizada por su antigüedad tipo electroquímica son las de plomo-ácido que presenta limitaciones por su peso, contaminación ambiental y la desventaja del bajo número de ciclos de carga-descarga. Por otra parte, el elevado costo y contaminación de las de níquel-cadmio limitan su uso pese a que tiene un mayor número de ciclos de carga-descarga [1].
- **Baterías electroquímicas:** Son las baterías más usadas en el área de almacenamiento de energía. Sobre todo al tratarse de ion-litio por su costo bajo y su elevado número de ciclos de carga-descarga en comparación a las antes mencionadas. Otra de las ventajas que presentan estas baterías son la facilidad de la formación de bancos de baterías que permiten almacenar la potencia necesaria dependiendo del uso ya sea en una micro-red, red pública o industrial [1].
- **Baterías de flujo:** Son otro tipo de almacenamiento de energía donde su sistema genera una reducción-oxidación de elementos químicos. Se basa en permitir la circulación a través de las celdas dos diferentes electrolitos que se encuentran en tanques aislados entre sí, formando un flujo de iones que forma corriente eléctrica. Este tipo de baterías presentan grandes ventajas al ser de carga rápida, vida útil amplia y gran eficiencia. Sin embargo, la circulación de electrolitos y el sistema de funcionamiento presenta un consumo de energía para la batería que limita el uso en redes eléctricas [1].
- **Supercondensadores:** Los supercondensadores presentan la gran ventaja de trabajar tanto como condensador y batería. Su manera de almacenar energía es como la de un condensador donde existen dos placas separadas por un

medio donde el campo magnético permite el almacenamiento en los electrodos. Dentro sus ventajas están la vida útil, pueden ser utilizadas para corrientes elevadas, cargas y descargas en menor tiempo, pero su elevado costo es una limitación. Un sistema eléctrico con almacenamiento de este tipo mejora la calidad de energía, la frecuencia y reduce armónicos [1].

- Celdas de Combustible: utiliza un proceso electroquímico para la transformación de energía química en energía eléctrica. En estas celdas, el hidrógeno se almacena en el cátodo y en el ánodo de oxígeno. Sin embargo, una de lo que limita este tipo de celdas es la obtención del hidrógeno a partir de combustibles fósiles, lo cual conlleva un impacto ambiental significativo y una eficiencia baja [1].
- Superconductores magnéticos (SMES): La energía se almacena en un campo magnético generado por una bobina superconductora enfriada criogénicamente a una temperatura por debajo de la crítica de superconducción. Posteriormente, la energía se libera de vuelta a la red por la descarga que se da en la bobina. Sin embargo, la construcción de estas bobinas suele requerir su instalación en lugares subterráneos y de un tamaño considerable [1].
- Volantes de inercia-(FES): Son sistemas que almacenan energía cinética mediante la rotación a alta velocidad de un rotor. Cuando se necesita utilizar la energía almacenada, la velocidad de rotación del rotor disminuye, liberando así la energía almacenada. Para aplicaciones avanzadas, los rotores suelen ser fabricados en fibra de carbono de alta resistencia y se suspenden mediante campos magnéticos para lograr un mejor rendimiento [1].
- Aire Comprimido- (CAES): En este sistema se utiliza la energía comprimida del aire, que se almacena en depósitos subterráneos durante los periodos de baja demanda energética. Cuando la demanda es alta, el aire comprimido aumenta la temperatura y tiende a expandirse a través de la turbina, generando energía eléctrica. Para el proceso de calentamiento se utiliza gas natural [1].
- Bombeo Hidráulico (PHS): En estos sistemas, el excedente de energía que se produce con las centrales renovables como la eólica o fotovoltaica en los periodos de demanda mínima sirve para bombear agua hasta depósitos a mayor altura. Se almacena energía potencial, que luego sirve para producir electricidad mediante generadores hidroeléctricos en las horas de demanda máxima [1].
- Almacenamiento de energía térmica-(TES): Es la manera de almacenar energía térmica utilizando calor latente o calor sensible, en el primer caso se hace el proceso físico del material de estado líquido – sólido a temperatura permanente que se mantiene constante y en el segundo caso se realiza el sistema mediante aceite sintético o sales fundidas que permiten almacenar energía en forma de calor [1].

En el presente trabajo se considera la aplicación de sistemas de almacenamiento de energía por baterías – BESS. Como se observa en la Figura 2.2

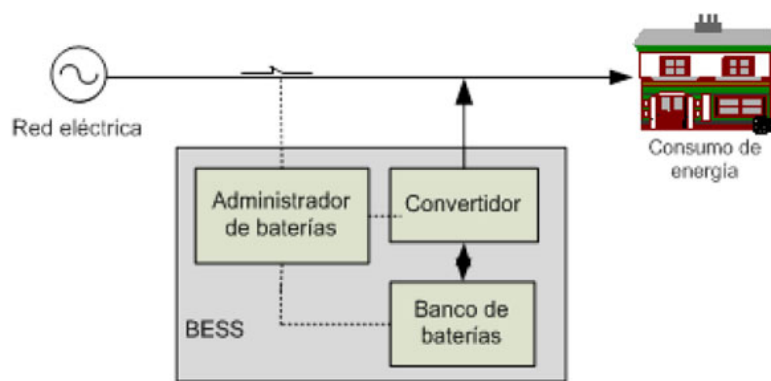


Figura 2.2: Sistemas de almacenamiento de energía con tecnología de baterías - BESS.

CAPÍTULO 3

FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE LA EERSSA

3.1 Cymdist

La EERSSA cuenta con la herramienta informática llamada Cymdist, que ha sido homologada para su uso por las empresas distribuidoras del país. Cymdist es el paquete básico del software CYME y ofrece una variedad de herramientas para el modelado y análisis técnico de sistemas de distribución eléctrica. Con Cymdist, es posible realizar simulaciones del funcionamiento del sistema eléctrico, permitiendo el desarrollo de modelos de distribución tanto balanceados como desbalanceados. Además, el software es capaz de manejar configuraciones de red en forma de configuraciones radiales, en anillo o malladas. En el caso específico del sistema de subtransmisión de la EERSSA, su configuración es mixta, con presencia tanto de anillos de subtransmisión como de sistemas radiales. Por lo tanto, Cymdist se presenta como la herramienta más apropiada para realizar el presente trabajo de investigación. Dentro de las aplicaciones que se pueden llevar a cabo con esta herramienta, se encuentra la determinación del flujo de carga. Esto implica simular el desempeño del sistema en régimen permanente, calculando las caídas de tensión en las barras del sistema y el flujo de carga a través de los diferentes elementos. Además, Cymdist incluye herramientas que permiten realizar estudios de dinámica a largo plazo, mediante la aplicación de series temporales. Esto es de gran utilidad al estudiar el impacto de variaciones en la irradiancia, fluctuaciones del viento y cambios en la carga sobre los elementos que tiene la red. De esta manera, se pueden simular en el dominio del tiempo el funcionamiento de los sistemas de generación renovable y de almacenamiento de energía [14].

En el Anexo B de este documento, se proporciona el diagrama del sistema de subtransmisión de la EERSSA modelado en el sistema Cymdist, lo que facilita la visualización y comprensión de la estructura del sistema eléctrico en cuestión.

3.2 Modelo dinámico del SEP de la EERSSA

En este caso, se ha desarrollado un modelo dinámico a largo plazo del sistema eléctrico de potencia de la EERSSA con el fin de simular su funcionamiento durante

un período de 24 horas. La simulación tiene en cuenta las variaciones de la demanda a lo largo del día, reflejadas en la curva de carga del sistema generada a partir de los datos obtenidos por el sistema SCADA. Se ha optado por modelar tanto un día laboral, jueves 1 de diciembre de 2022 (ver Figura 3.1), como un día no laboral, domingo 4 de diciembre de 2022 (ver Figura 3.2). Se ha observado que el comportamiento de las curva son similares en ambos casos.

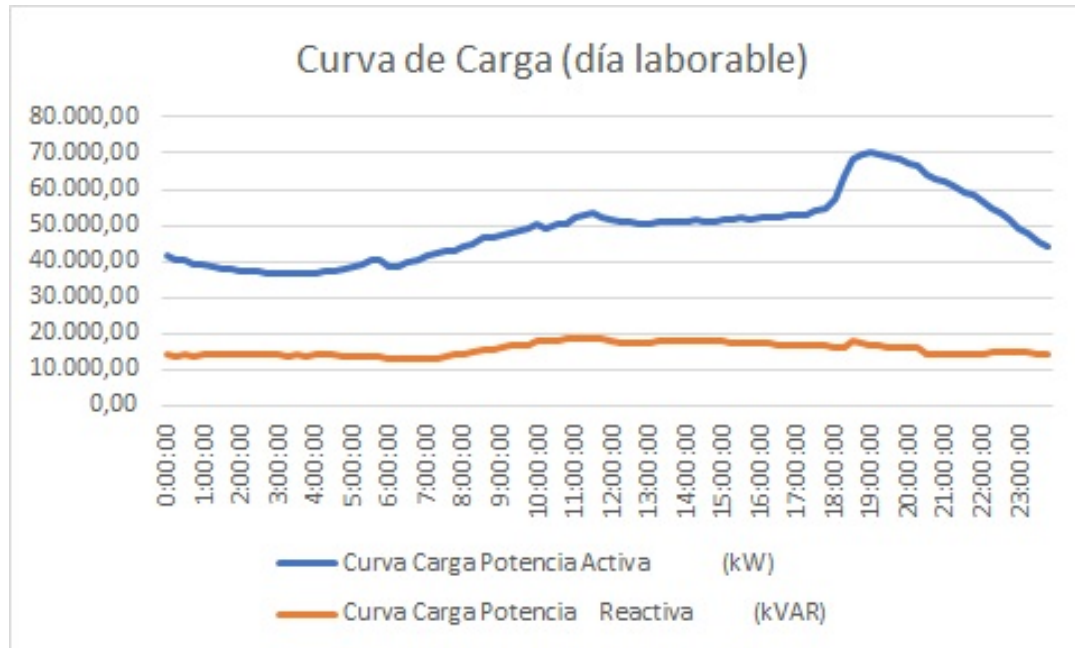


Figura 3.1: Curva de Carga del Sistema de la EERSSA modelada en Cymdist.

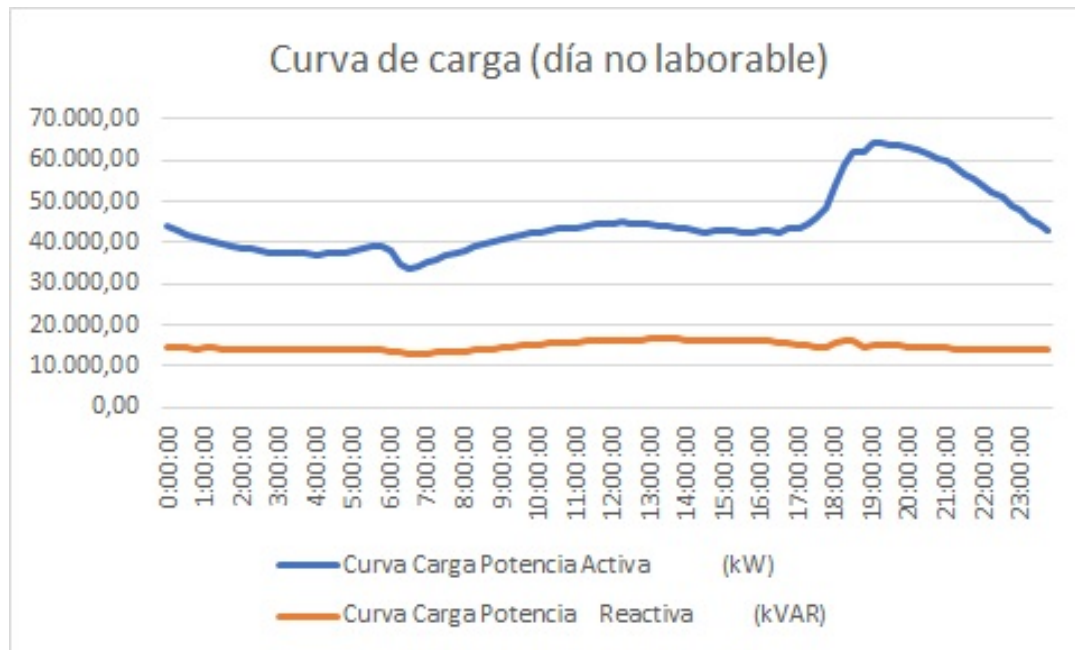


Figura 3.2: Curva de Carga del Sistema de la EERSSA modelada en Cymdist.

3.3 Modelación y funcionamiento del sistema de subtransmisión de la EERSSA

El sistema de subtransmisión de la EERSSA funciona a un voltaje de 69 kV y generalmente opera de manera aceptable. Sin embargo, existen subestaciones geográficamente alejadas, como Pindal, que enfrentan problemas operativos, como altas caídas de tensión, lo que afecta la calidad del servicio en los cantones Pindal y Zapotillo, ubicados en la provincia de Loja. A continuación, en la Figura 3.3 se representa el perfil de voltaje para un día típico de operación de estas subestaciones, expresado en por unidad.

En el período de demanda pico, se han observado caídas de voltaje que superan el 5% en la barra de media tensión (13.8 kV) de la subestación Pindal. A pesar de que los transformadores de potencia se encuentran en el tap más bajo, es necesario analizar alternativas para corregir este inconveniente. Una de las opciones sería realizar la repotenciación de las líneas de subtransmisión, que actualmente son de calibre 2/0 AWG. Sin embargo, esta solución sería costosa y difícil de ejecutar debido a la oposición por parte de los habitantes del área de concesión de la EERSSA a la construcción de nuevas líneas de subtransmisión.

El perfil de voltajes que se observa en la Figura 3.4 es el resultado del flujo de potencia a través de las líneas de subtransmisión. Este perfil se ve afectado principalmente por las características de la curva de carga del sistema, que se caracteriza por tener un alto pico de demanda en el período de 19:00 a 22:00 horas. Esto provoca una caída de tensión grande. Situación similar se experimenta en la LST Celica – Pindal.

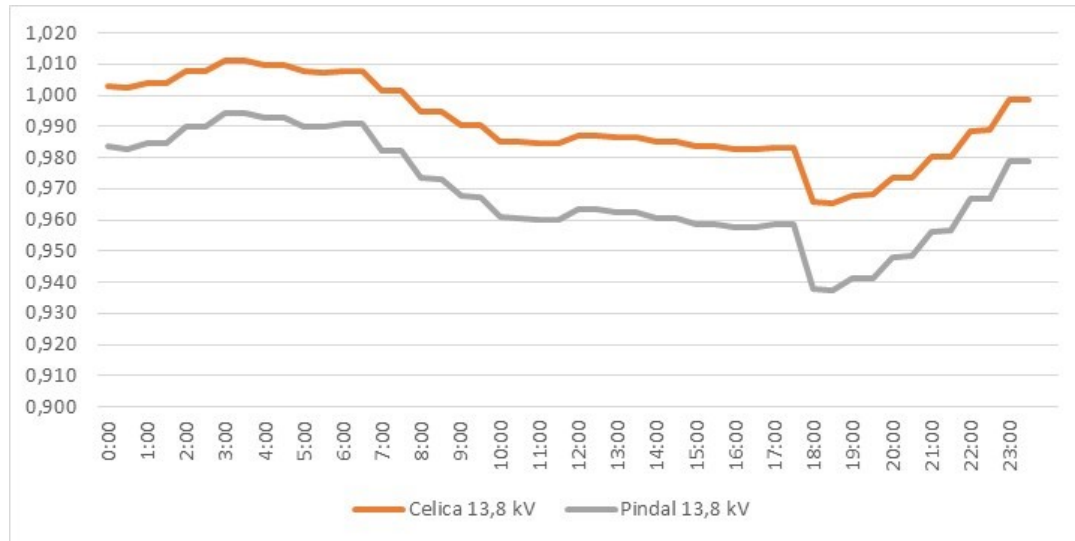


Figura 3.3: Perfil de Voltaje de Barras de Media Tensión de las SE Celica y Pindal (pu)

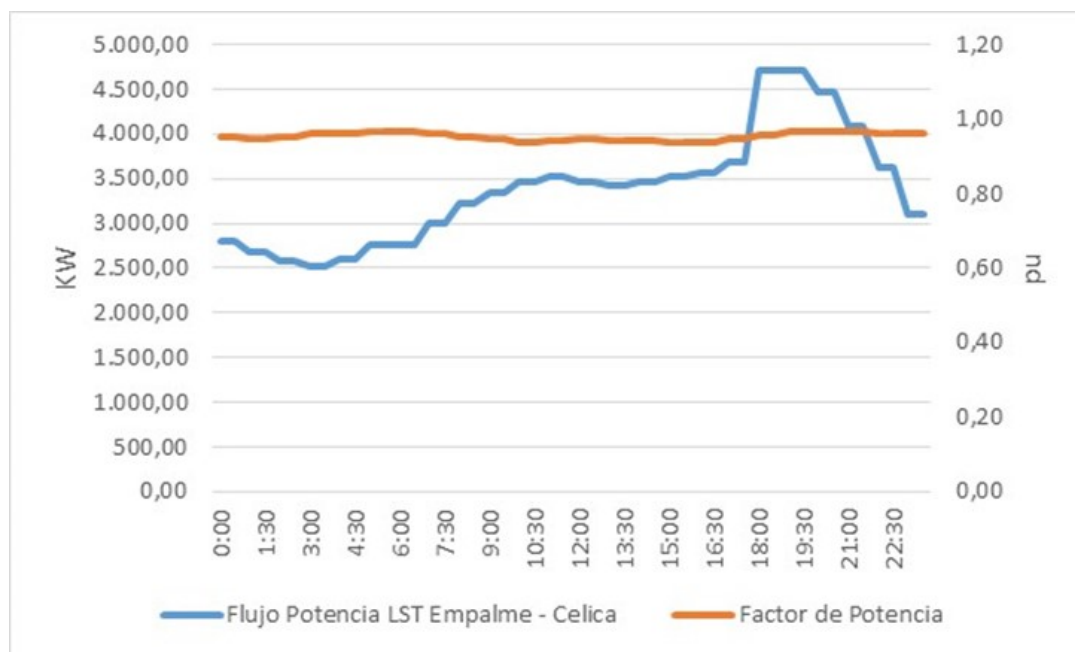


Figura 3.4: Flujo de Potencia por la LST Empalme – Celica.

Durante las primeras horas de la noche, se ha observado un fuerte incremento en las pérdidas de potencia en las líneas de subtransmisión Empalme-Celica y Celica-Pindal como se observa en la Figura 3.5. Este incremento se debe al aumento en la demanda eléctrica atendida por estas líneas. Al evaluar la integral de las curvas de pérdidas, se ha determinado que estas alcanzan un valor de 433,04 kWh/día para la Línea de Subtransmisión Empalme-Celica y 364,94 kWh/día para la Línea de Subtransmisión Celica-Pindal. Estas cifras representan aproximadamente el 0,53% y 0,59% de la energía transportada por dichas líneas, respectivamente.

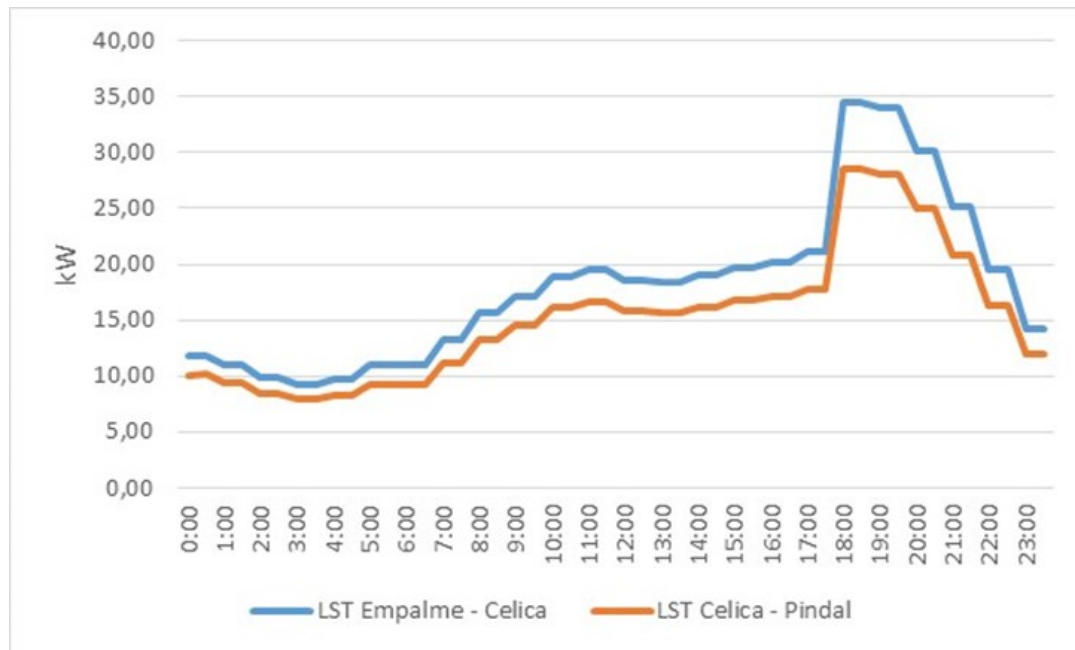


Figura 3.5: Pérdidas de Potencia en Líneas de Subtransmisión.

3.4 Funcionamiento del sistema con operación de la central fotovoltaica sin sistema de almacenamiento de energía

Las condiciones operativas de las subestaciones Celica y Pindal se ven afectadas por el funcionamiento de la central fotovoltaica Aroma Santos. Durante el día, cuando la central está en funcionamiento, se produce un considerable aumento en los voltajes de las barras de 13.8 kV. En ciertas horas, incluso se puede llegar a tener un sobrevoltaje que supera el 5% en la SE Celica, de acuerdo a lo evidenciado en la Figura 3.6. Por otro lado, durante las horas nocturnas, se continúan presentando problemas de bajo voltaje.

Como se puede apreciar en la Figura 3.6, la operación de la Central Aroma Santo durante el día ocasiona que el perfil de voltajes de la barra de 13,8 kV de la subestación Celica exceda el rango permitido de regulación de voltaje, superando el límite del 5%. Ante esta situación, la EERSSA se verá obligada a aumentar el tap en un 2,5% para corregir este problema. Sin embargo, esta acción conllevaría a un incumplimiento del límite inferior de voltaje durante la noche, tal como se muestra en la Figura 5.3.

La alternativa adecuada para mejorar la regulación de la tensión en esta zona es implementar un sistema de almacenamiento de energía. Este sistema ayudaría a gestionar los picos de producción de energía durante el día y los picos de demanda durante la noche.

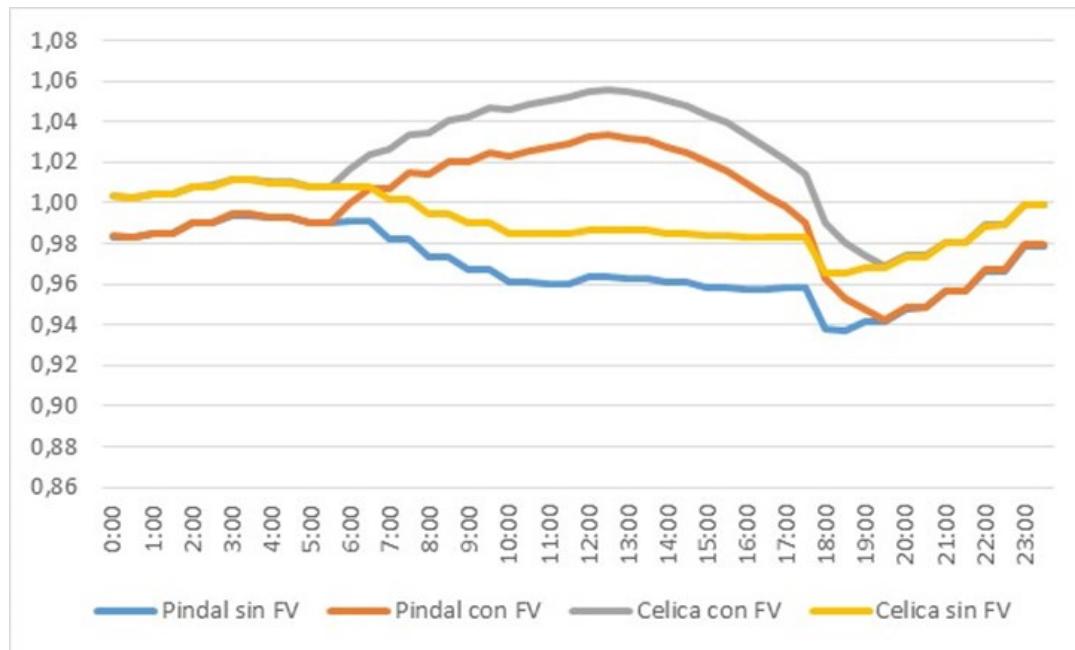


Figura 3.6: Perfil de voltaje de las barras de 13.8 kV de las SE Celica y Pindal.

3.5 Simulación del funcionamiento de sistemas de generación fotovoltaica en Cymdist

En la actualidad mediante inversión privada se está desarrollando un sistema de generación FV de 18 MWp, que se prevé se interconecte en la SE El Empalme, cercana a la SE Pindal. En este trabajo se lleva a cabo el análisis de flujo de carga dinámico a largo plazo, para un período de funcionamiento de un día completo. Este análisis muestra el impacto de la producción FV considerando la curva de irradiancia mostrada en la Figura 3.7.

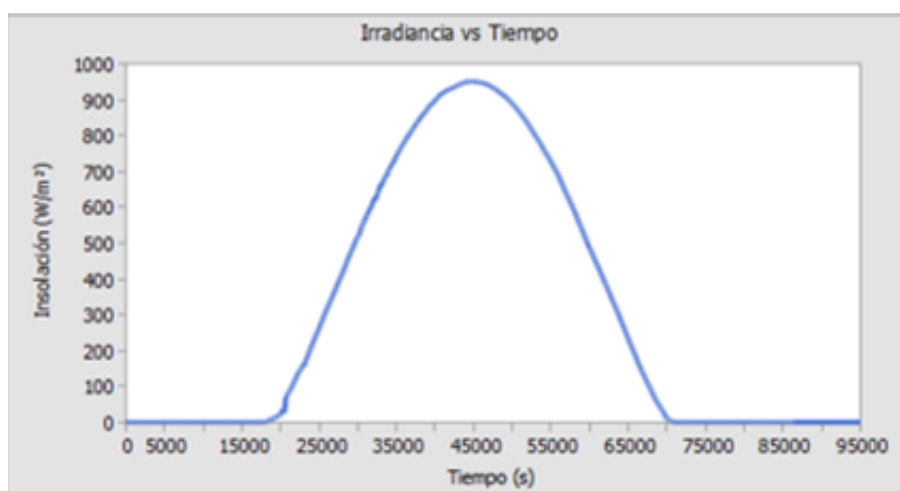


Figura 3.7: Curva de Irradiancia modelada en Cymdist.

El modelado del sistema FV se efectúa en el programa Cymdist con base en la información técnica proporcionada por la empresa generadora Aroma Santo. El

proyecto reciente incluirá un campo fotovoltaico equipado con 29,792 módulos fotovoltaicos de silicio bifaciales de 670 Wp. Estos módulos se distribuirán en cadenas de 28 paneles cada una. Como resultado, se obtendrá una potencia total de 19,960.64 kWp o kWDC en los módulos fotovoltaicos. En la Figura 3.8 se indican el sistema representado en Cymdist.

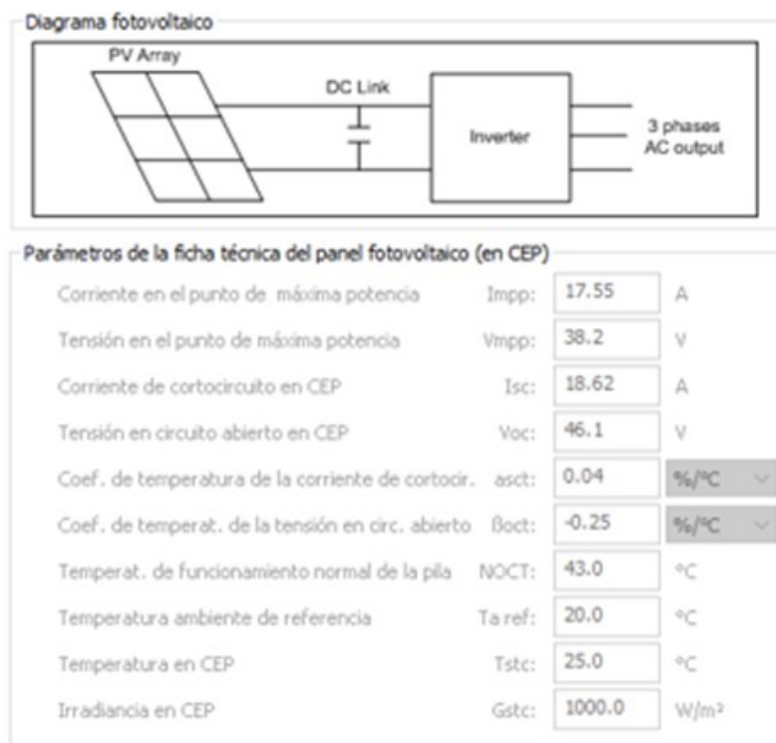


Figura 3.8: Características Técnicas de los Paneles Fotovoltaicos modelados en Cymdist.

En la Figura 3.9 se indican los parámetros técnicos de cada uno de los 5 arreglos fotovoltaicos modelados en Cymdist, cada uno de los cuales tiene una potencia de 3600 kW

En la Figura 3.10, se muestra el diagrama unifilar de la central FV Aroma Santo conectada a la barra de 69 kV de la SE El Empalme de la EERSSA obtenido directamente del software Cymdist. Cabe mencionar que se utiliza una línea de sub-transmisión de 3,7 km de longitud con conductor calibre 266,8 MCM-ACSR.

Para viabilizar la conexión a 69 kV, la central Aroma Santo dispondrá de una subestación elevadora dotada con un transformador de potencia de 20 MVA. El transformador tiene una relación de transformación 69/34,5 kV, conexión Delta-Y, con las características técnicas modeladas en Cymdist, que se pueden observar en la Figura 3.11.

Debido a que la barra de medio voltaje de la Subestación Aroma Santo opera a 34,5 kV, cada uno de las 5 subplantas de 3,6 kW arreglos fotovoltaicos cuenta con un transformador elevador de relación 0,8/34,5 kV de 5 MVA de capacidad y también en conexión Delta-Y.

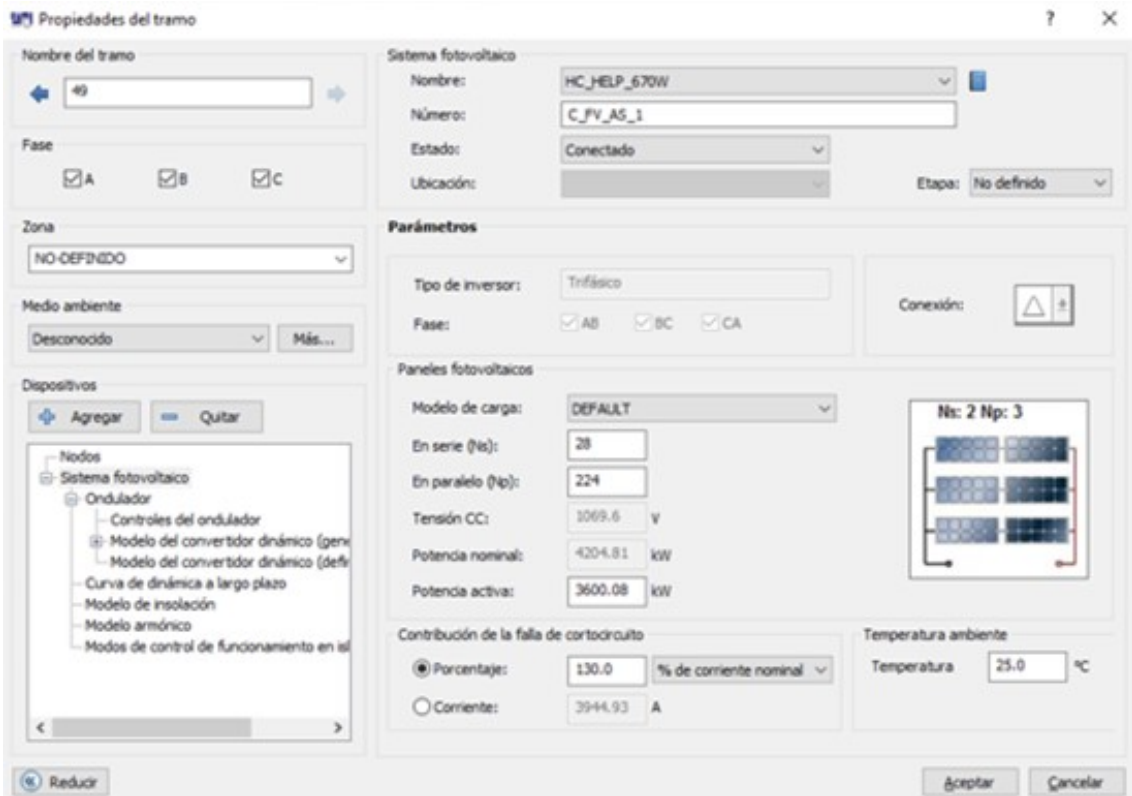


Figura 3.9: Características Técnicas de cada Arreglo Fotovoltaicos modelados en Cymdist.

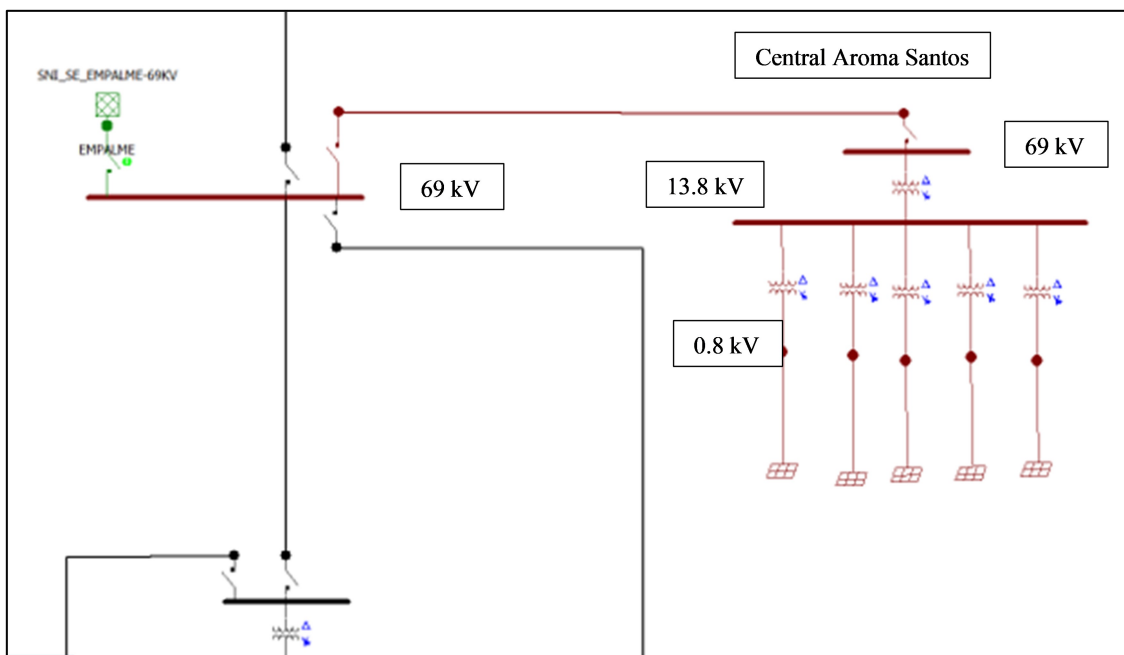


Figura 3.10: Conexión de la Central Fotovoltaica Aroma Santo al Sistema de Sub-transmisión de la EERSSA, modelada en Cymdist.

Datos nominales		Configuración	
Tipo de transformador:	Trifásico	Primario	
Tipo de aislamiento:	Inmerso en líquido	Secundario	
Tipo de devanado:	Tipo acorazado	Desfase:	Dyn1
Capacidad nominal:	20000.0 kVA		-30.0 °
Tensión primaria:	69.0 kVLL	<input checked="" type="checkbox"/> Reversible	
Tensión secundaria:	34.5 kVLL		
Pérdidas en vacío:	0.0 kW		
Corriente magnetizante:	0.0 %		
Impedancias de secuencia			
<input type="checkbox"/> Estimar...	Z1:	5.07 %	X1/R1: 15.58
	Z0:	5.07 %	X0/R0: 15.58
Impedancias de puesta a tierra			
		Rg	Xg
Primario:		0.0 Ω	0.0 Ω
Secundario:		0.0 Ω	0.0 Ω

Figura 3.11: Características técnicas del Transformador de Potencia de la Subestación Aroma Santo, modeladas en Cymdist.

CAPÍTULO 4

SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PROPUESTO

4.1 Dimensionamiento del Sistema de Almacenamiento de Energía

El sistema de subtransmisión está compuesto principalmente por un anillo que garantiza la confiabilidad en la transmisión del servicio eléctrico a toda la provincia de Loja (ver Figura 4.1).



Figura 4.1: Sistema de subtransmisión de la EERSSA.

Subestaciones como Pindal y Celica, son alimentadas a través de un ramal que se extiende desde el anillo de subtransmisión como se observa en la Figura 4.2. Este ramal tiene una longitud de 33.08 km y utiliza un conductor de 2/0 AWG-ASCR. A lo largo de su recorrido, también suministra energía a la subestación Celica.

El presente trabajo plantea la implementación de un BESS, con baterías de ion-litio, en la SE de Distribución Pindal. Esta SE es la más lejana de la EERSSA, en

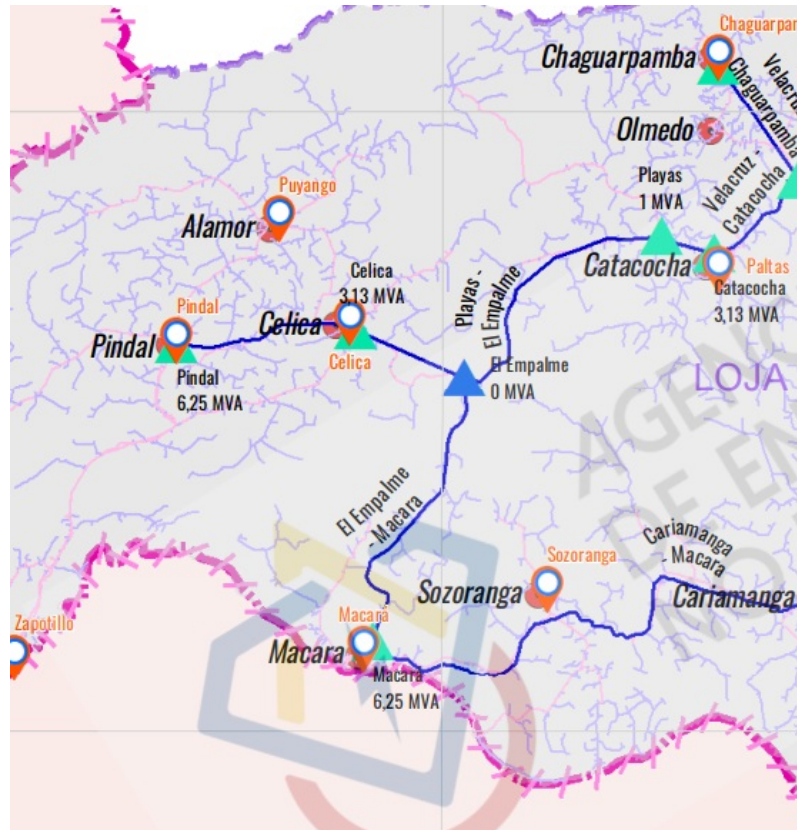


Figura 4.2: Ramal de Subtransmisión hacia Pindal.

la cual se requiere mejorar los parámetros operativos: perfiles de voltaje, pérdidas y beneficios económicos en la empresa como se ha profundizado en el Capítulo 3. Aprovechando de esta manera la generación de la central Aroma Santo. Para el efecto se prevé instalar el BESS a nivel de la barra de media tensión (13,8 kV), de la SE Pindal, como se indica en la Figura 4.3.

Para realizar el dimensionamiento del BESS, el programa Cymdist mediante la simulación del sistema y flujos de potencia se determinó la cantidad de potencia y energía que es necesario almacenar para optimizar el sistema, mejorando los perfiles de voltaje de Célica y Pindal y eliminar el pico de pérdidas en las líneas. Las características técnicas de la modelación en Cymdist, del Sistema de Almacenamiento de Energía (BESS), se indica en la Figura 4.4.

El sistema BESS debe ser capaz de almacenar la potencia máxima del pico de carga y la energía necesaria para cubrir el período de 18:00 a 22:00 horas. Según se muestra en la Tabla 4.1, la diferencia de la potencia máxima registrada es de 792,94 kW. Para obtener el valor aproximado de energía almacenada, se determinará la ecuación referencial de la curva (Figura 4.5) y el cálculo del área bajo la misma. Como se puede observar.

$$\int_{18}^{22} -17.75x^2 + 79.522x + 3536.4dx + \int_{18}^{22} 2823.48dx = 3306.61kWh$$

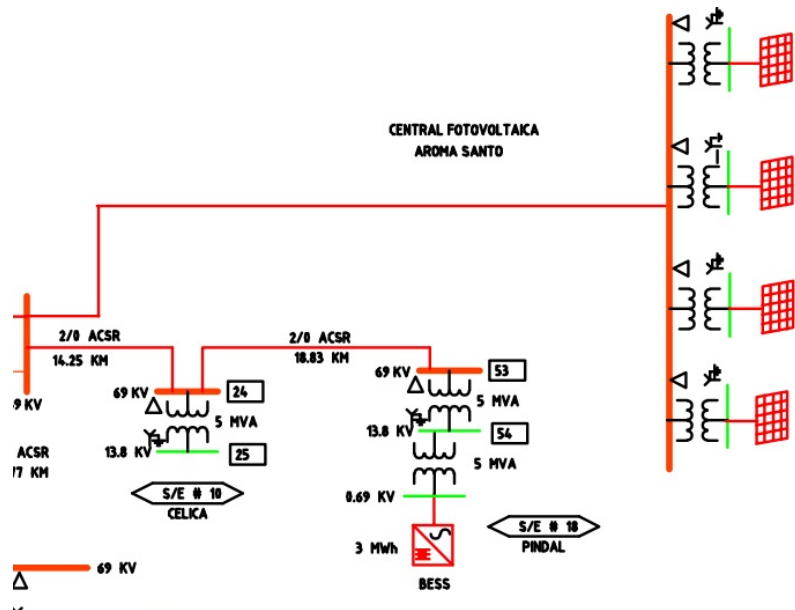


Figura 4.3: Sistema de Almacenamiento en la SE Pindal.

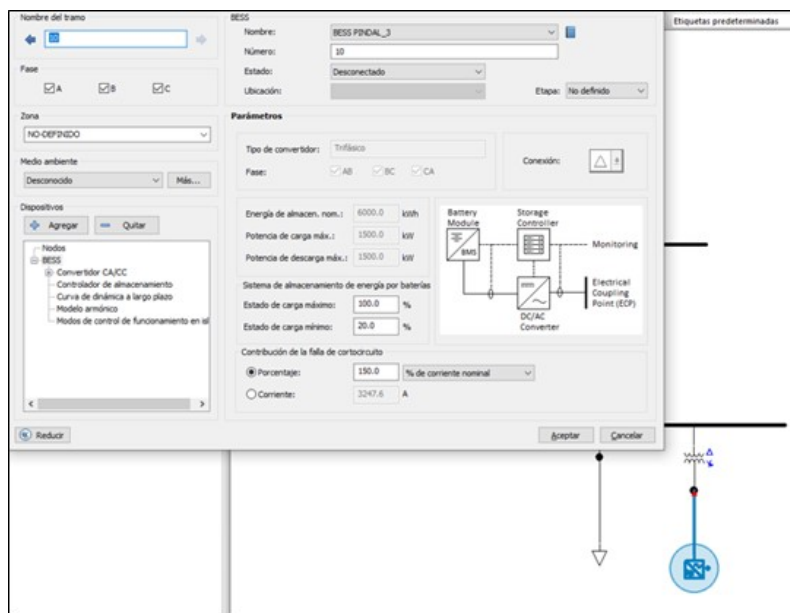


Figura 4.4: Características técnicas del BESS modeladas en Cymdist.

Obteniendo un aproximado de 3.3 MWh de energía que se busca almacenar en el sistema BESS.

Tiempo (s)	kW con BESS	kW sin BESS
17:30	2823.482046	2823.482046
18:00	2823.482046	3606.124432
18:30	2823.482046	3606.463453
19:00	2823.482046	3616.187422
19:30	2823.482046	3616.424461
20:00	2823.482046	3425.594089
20:30	2823.482046	3426.061405
21:00	2823.482046	3137.857347
21:30	2823.482046	3138.330344
22:00	2823.482046	2774.300346

Tabla 4.1: Datos de potencia de la Línea el Empalme-Pindal

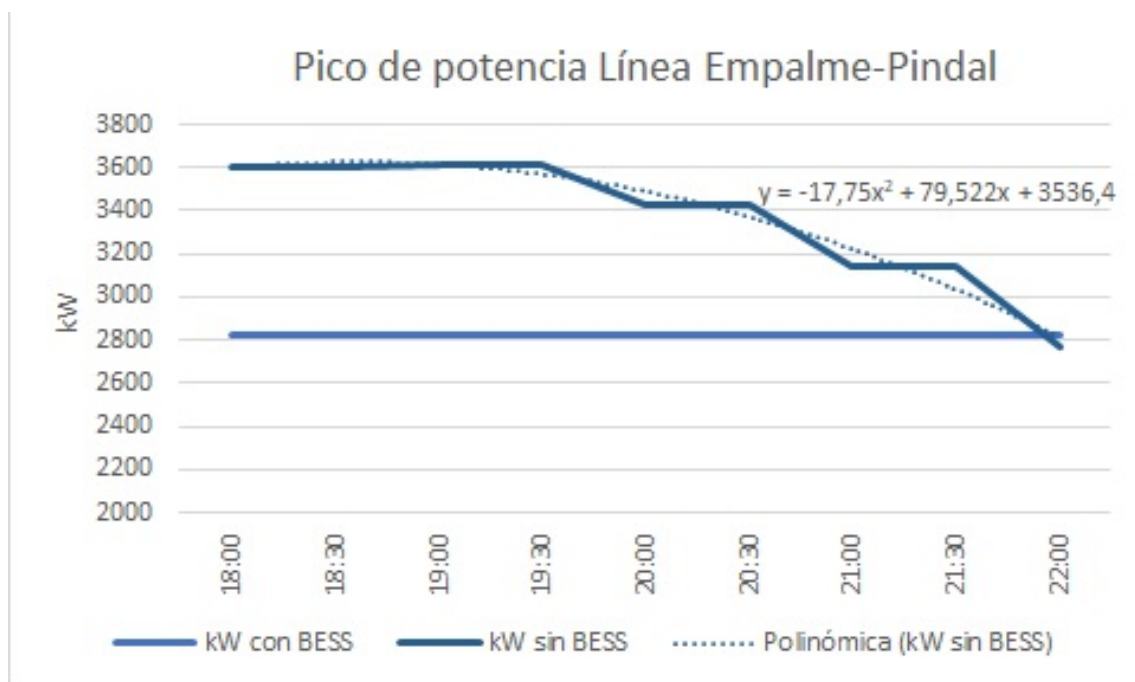


Figura 4.5: Pico de pérdidas Línea el Empalme-Pindal.

4.2 Diseño del Sistema de Almacenamiento de Energía

El BESS propuesto consta de un sistema de baterías recargable de Litio-ferroso (LiFePO₄). Este sistema presenta ventajas tales como, sistema de convertidor de potencia bidireccional (permite la carga y descarga), el sistema de control mediante PLC (Programmable Logic Controller), sistema de supervisión de HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado). En caso de ser necesario el sistema puede incluir HVAC, sistema contra incendios FSS (Fire Suppression Systems), sistema de detección de liberación de gases y de emergencia.

El diseño del contenedor de los bancos de baterías se basa en dimensiones adaptadas al área de instalación, utilizando una caja de carga más resistente y marcos de acero reforzado para mayor robustez.

El cuerpo del contenedor utiliza aislamiento ignífugo que busca mejorar el aislamiento del contenedor y reduce el consumo de energía del acondicionador de aire. Dentro del contenedor existen dos bancos de baterías con sus cables y ventiladores, sensores de iluminación, térmicos y de humo al igual que sistemas FSS y un sistema de alimentación auxiliar [2].

Especificaciones Técnicas del Sistema	
<i>Especificaciones Generales</i>	
<i>Ítem</i>	<i>Especificación</i>
Dimensión del sistema	6,058 × 2,438 × 2,591 m(LxWxH)
Peso del sistema	23,6 T
Número de ciclos de carga y descarga	5000 ciclos, 80%EOL, 25°C
Protección IP	IP54
Rango de temperatura de funcionamiento	20 – 40°C
Humedad relativa	0 – 95%
Altitud máx.	4000 m
Sistema de refrigeración	HVAC, ventilación.
Sistema de control	Puerto de enlace con controlador local, GRPS, Wi-Fi, Ethernet
<i>Lado de corriente alterna</i>	
<i>Ítem</i>	<i>Especificación</i>
Capacidad nominal	1000 kW/1720kWh
Potencia nominal de salida	1000 kW
Máxima potencia de salida	1320kVA
Voltaje nominal de salida	690 V
Frecuencia nominal	60 Hz
<i>Lado de corriente continua</i>	
<i>Ítem</i>	<i>Especificación</i>
Tensión nominal	1228.8Vcc
Límite de tensión inferior	1075.2Vcc
Límite de tensión superior	1363.2Vcc
Corriente nominal	690 V
Capacidad de la celda	280Ah
Cantidad de celdas	2304
Capacidad Total	1720.34kWh

Tabla 4.2: Especificaciones del sistema de almacenamiento.

4.2.1 Sistema de Baterías

El sistema de baterías consta de un contenedor con 384 celdas prismáticas que almacenan un total de 3,44 MWh, como se muestra en la Figura 4.6.

Para alcanzar el nivel de almacenamiento requerido por la EERSSA, se necesitan 6 Strings. Estos Strings tienen la capacidad de almacenar 1720 kWh y proporcionar una potencia de salida de 1000 kW. Las baterías utilizadas tienen un rango de voltaje de 1075,2 a 1363,2 Vdc.

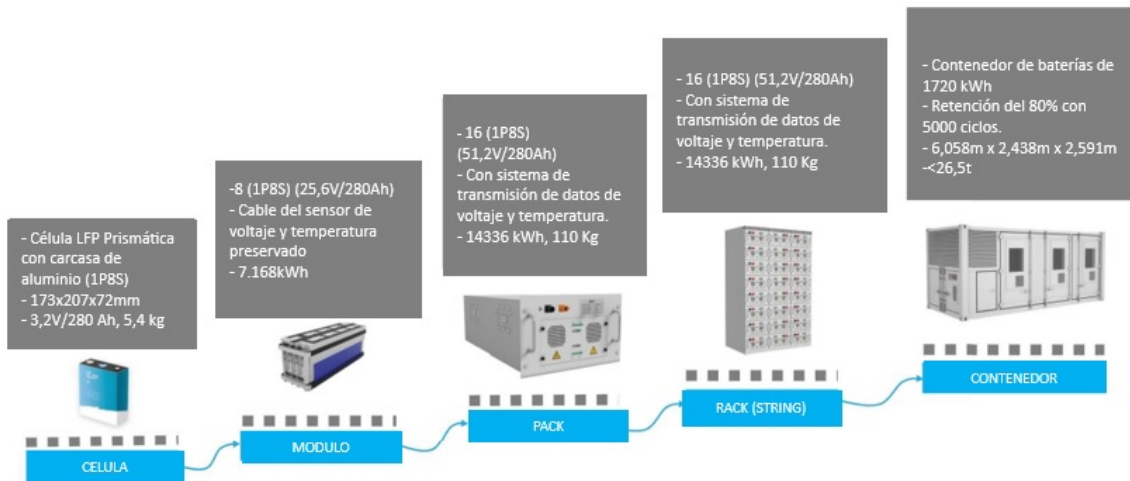


Figura 4.6: Estructura del sistema de baterías. [2]

Además de las baterías, se incluyen los PCS (Power Conversion System), que son inversores/convertidores multifuncionales. Estos PCS permiten obtener un voltaje de 690 Vac. Para conectar el sistema a la red, se requiere un transformador auxiliar de 0,69/13,2 kV. Esto permite la conexión a la subestación Pindal [2].

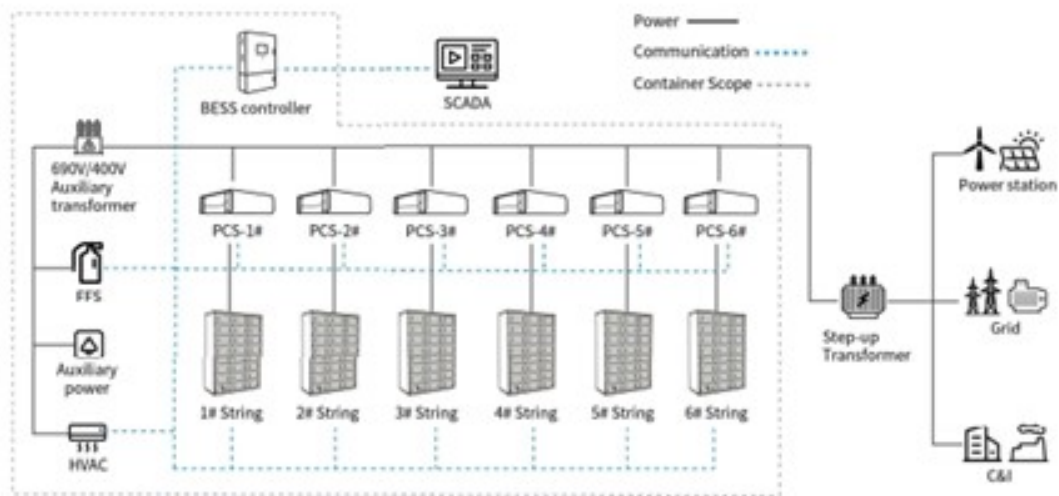


Figura 4.7: Estructura del sistema de almacenamiento de Energía. [2]

4.2.2 Sistema de Gestión de las Baterías

El sistema de almacenamiento está equipado con una arquitectura BMS (Building Management Systems). Esta arquitectura permite la detección precisa de señales analógicas, protección de la batería, alarmas de fallos, carga y almacenamiento de la batería, así como supervisión del cableado.

Especificaciones estructura de paquetes de baterías	
<i>Especificaciones Packs de baterías</i>	
<i>Ítem</i>	<i>Especificación</i>
Cantidad de celdas de baterías	16
Configuración de celda	1P16 S
Tensión nominal	51.2 V
Capacidad nominal	280Ah
Energía	14.335kWh
<i>Especificaciones Racks de baterías</i>	
<i>Ítem</i>	<i>Especificación</i>
Cantidad de celdas de baterías	24
Configuración de celda	1P16 S
Tensión nominal	1228.8Vcc
Capacidad nominal	250Ah
Energía	344.06kWh
<i>Especificaciones sistema completo de baterías</i>	
<i>Ítem</i>	<i>Especificación</i>
Cantidad de cadenas de baterías	5
Capacidad total del sistema	1720kWh
Tensión nominal de las barras	1228Vcc
Capacidad nominal	280Ah

Tabla 4.3: Especificaciones de la estructura de las baterías.

A continuación, se describen las principales características del Sistema de Gestión de las Baterías:

- Control del funcionamiento y estado de la batería. El sistema monitorea constantemente el voltaje, la temperatura, la corriente y otros parámetros relevantes.
- Detección del voltaje para evitar niveles altos que puedan afectar la fiabilidad del sistema.
- Monitoreo continuo para evitar incrementos de temperatura perjudiciales para el sistema.
- Sistema completo que permite un equilibrio activo y controlado de las baterías, lo que contribuye a prolongar su vida útil.

4.2.3 Sistema de Conversión de Potencia (PCS)

El sistema de conversión de energía bidireccional del sistema de baterías permite la conversión de energía de las baterías en corriente continua a corriente alterna para conexión a la red eléctrica. Su funcionamiento se basa en un sistema electrónico de potencia (inversor) con un software de control.

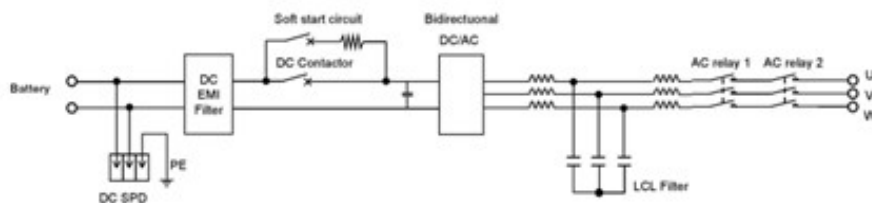


Figura 4.8: Diagrama PCS.

4.2.4 Sistema de Control

El sistema de control es el núcleo que realiza el Control lógico integral completo del sistema como el control de entrada en corriente continua, interruptor de operación, bloqueo, protección, intercambio y comunicación de señales, etc. El sistema de control desempeña una serie de funciones, entre las cuales se incluyen:

- Recopilación mediante comunión inteligente (PCS, BMS, climatización y control lógico completo) de datos de voltaje y corriente en corriente continua del sistema total, como de cada bando de baterías, potencia activa de las baterías, de la red y de la carga o demanda del sistema conectada y temperatura del contenedor.
- Supervisión de diferencias de tensión entre el contenedor de las baterías y la barra en la que se encuentre conectado para evitar la circulación de corriente.
- Verificar la temperatura de las baterías como la temperatura ambiente del contenedor, encendiendo el aire acondicionado, ventiladores en caso de incremento de la temperatura evitando el sobrecalentamiento.
- Adaptación del sistema de conversión de energía PCS para la carga o descarga.
- Desconexión del sistema de baterías en caso de falla en el sistema o la red, evitando daños en la carga y el sistema de almacenamiento.
- Protección en caso de sobrecargas y monitoreo del estado de carga del transformador.
- Regulación de la potencia de descarga del BESS y ajuste automático durante la presencia de potencia inversa.
- Análisis del equipo esclavo y recopilación de información hacia el sistema maestro que emite un comunicado a cada equipo para observación del operador.
- Recopilación de datos históricos en intervalos de 1 minuto para el análisis de datos, fallos o errores.
- Conexión a Internet con tecnología 4G que facilita el monitoreo desde diferentes áreas de operación [2]

4.2.5 Sistema Contra Incendios

El sistema contra incendios debe estar construido con las especificaciones necesarias para el sistema de almacenamiento y el contenedor. En el caso del sistema de almacenamiento propuesto es necesario un sistema controlador y la tubería de extinción de incendios a gas Anhídrido Carbónico (CO).

El sistema contraincendios está compuesto por varios elementos o componentes, que incluyen:

- ***Tubería de extinción de incendios a gas:*** La tubería contraincendios consta con una tubería principal y dos ramales secundarios que abarcan todo el contenedor en caso de incendio.
- ***Controlador de incendios:*** El sistema contraincendios incluye un equipo electrónico que monitorea y muestra en tiempo real el estado del sistema en una pantalla LED. Este equipo está compuesto por una placa de acero con revestimiento contra polvo y se conecta a una tensión de 115-230 Vca. Además, cuenta con baterías de 28 V que entran en funcionamiento en caso de una falla o desconexión de la red. Figura 4.9
- ***Detector de humo fotoeléctrico:*** El sistema contra incendios cuenta con un equipo electrónico que controla y muestra en tiempo real el estado del sistema en una pantalla LED. Figura 4.10
- ***Detector de Temperatura:*** El detector de temperatura monitorea el calor del contenedor y lo convierte en una señal de voltaje. Esta señal se compara con la temperatura ambiente exterior. Si la relación de temperaturas supera un nivel preestablecido, se emite una alarma sonora. La temperatura de activación del detector es de 135 °F (57.22 °C) y tiene un rango de humedad relativa de 0 a 95 %.
- ***Detector de CO/H2:*** El detector monitorea y detecta hidrógeno y monóxido de carbono en el contenedor de las baterías, emitiendo una alarma cuando es necesario para aliviar la presión y evitar explosiones.



Figura 4.9: Controlador de incendios. [2]



Figura 4.10: Detector de humo fotoeléctrico. [2]

4.2.6 Sistema de Control Ambiental

El control ambiental dentro del contenedor se basa en un sistema de aire acondicionado de precisión, que garantiza una temperatura interior ideal durante la descarga de alta velocidad. El acondicionador de aire de precisión seleccionado es adecuado para aplicaciones en las que el equipo interno del contenedor genera una cantidad significativa de calor, es sensible a la temperatura ambiente y requiere un completo aislamiento del exterior. Además, este sistema es altamente confiable y de fácil instalación, con funciones integrales que permiten su funcionamiento inmediato sin requerir una puesta en marcha complicada.

De esta manera, el sistema de HVAC garantiza un control eficiente y automatizado de la temperatura en el interior del contenedor, optimizando el rendimiento de todo el sistema y asegurando condiciones óptimas para su funcionamiento.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA

5.1 Análisis de factibilidad técnica de la implementación de un sistema de almacenamiento de energía

5.1.1 Funcionamiento del sistema con operación de la central fotovoltaica y con sistema de almacenamiento de energía

El modo de funcionamiento propuesto y que sirve de base para las simulaciones de su funcionamiento en el programa Cymdist es el de eliminación de los picos de demanda. Estos excedentes se almacenarán en el BESS (como se observa en la Figura 5.1). Que se utilizarán durante la noche, cuando haya demanda de energía por parte del sector. La implementación de este sistema permite eliminar el pico de demanda durante la noche y aplanar la curva de carga, como se muestra en la Figura 5.2. Esto permitiría satisfacer los requerimientos de nuevos consumidores en el sector de Zapotillo, los cuales no han podido ser atendidos hasta ahora debido a las restricciones operativas del sistema.

En la Figura 5.3, también se muestra cómo la operación del BESS mejoraría el perfil de voltaje de las barras de las subestaciones Celica y Pindal, asegurando que se mantengan dentro del rango aceptable de $\pm 5\%$ de acuerdo a los procedimientos establecidos por la EERSSA.

En cuanto a las pérdidas de potencia, como se puede observar en la Figura 5.4, se evidencia una disminución considerable de las pérdidas de potencia en las dos líneas de subtransmisión durante la noche. Aunque durante el día hay un ligero incremento de las pérdidas debido a la carga del BESS, el balance general es positivo. En comparación con el funcionamiento sin el BESS, las pérdidas de energía se reducen de 797,98 kWh/día a 740,99 kWh/día. Esto representa una reducción de 56,99 kWh/día, equivalente a 20.802 kWh anuales.

Este sistema de almacenamiento se presenta como una herramienta facilitadora de la integración de generación renovable, mejora los indicadores de calidad del servicio eléctrico y disminuye las pérdidas de energía.

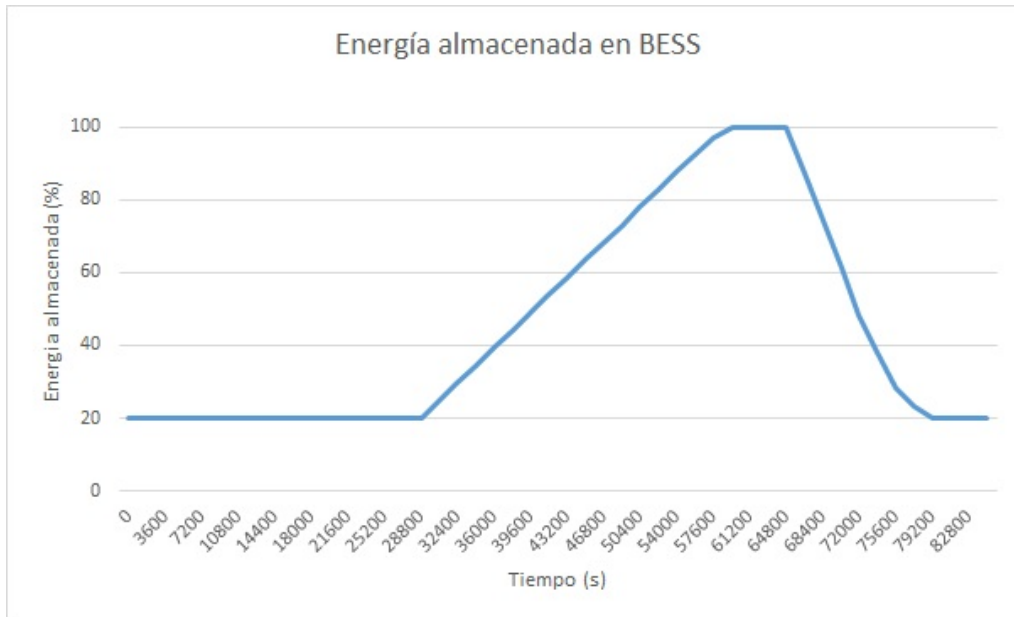


Figura 5.1: Energía almacenada en el BESS.

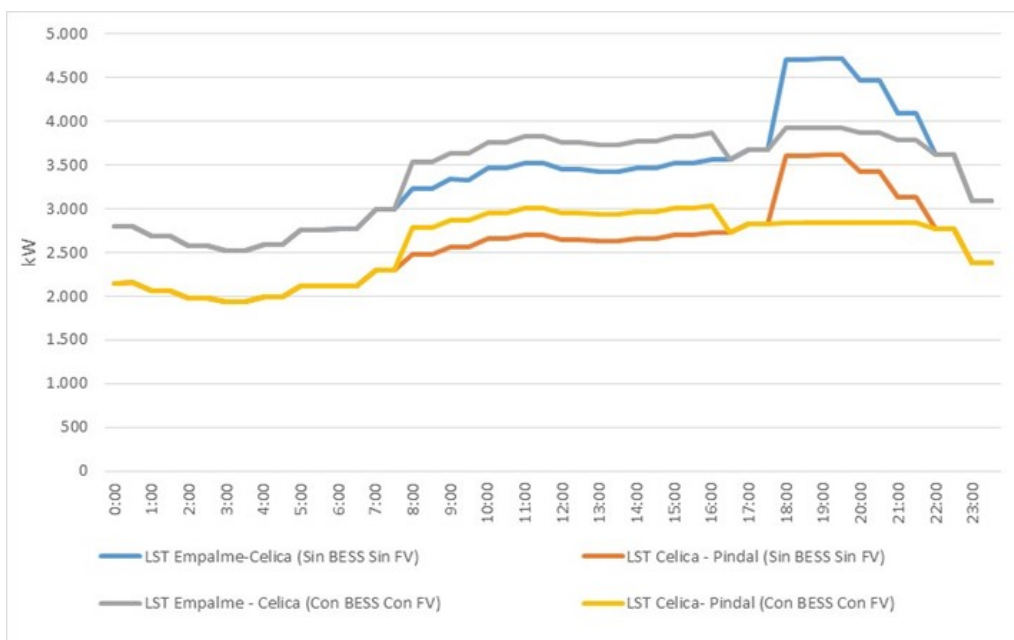


Figura 5.2: Curvas de Carga de Líneas de Subtransmisión.

5.2 Análisis de factibilidad económica de la implementación de un sistema de almacenamiento de energía

5.2.1 Presupuesto Referencial para Implementación

El presupuesto referencial para la implementación del BESS alcanza 3'268.888 USD, con el siguiente detalle:

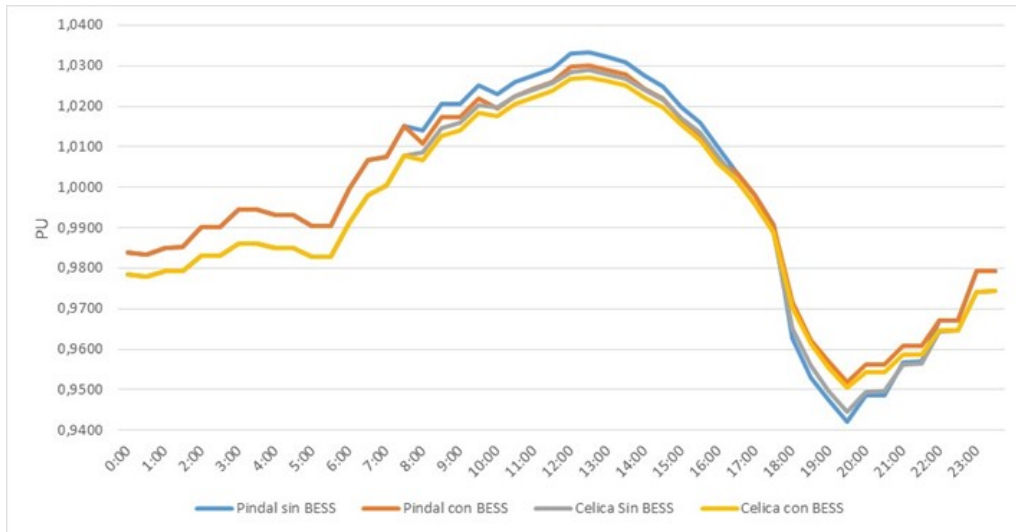


Figura 5.3: Curvas de Perfil de Voltajes de las SE Celica y Pindal.

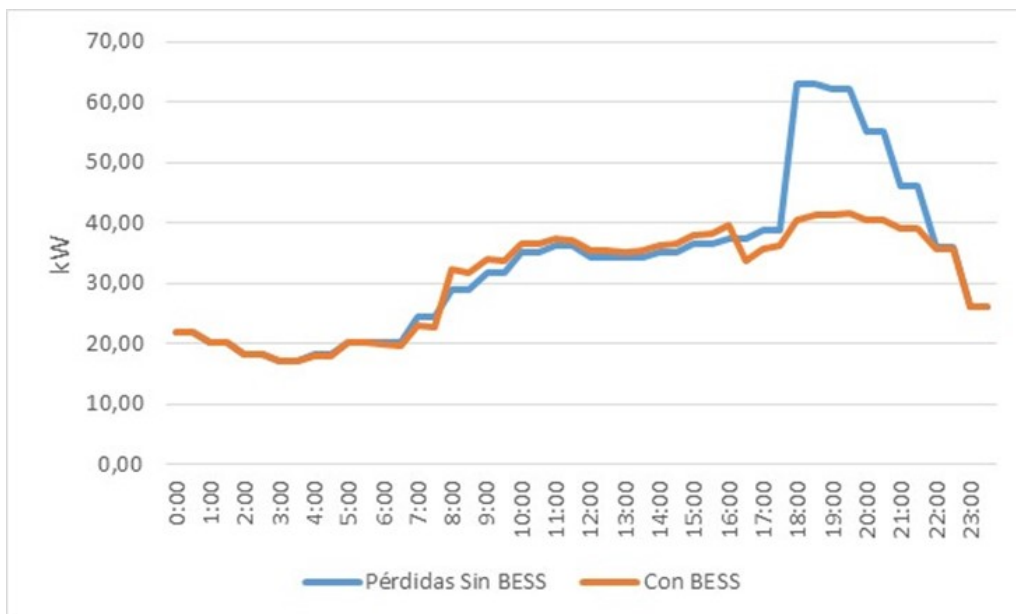


Figura 5.4: Pérdidas Totales en las LST Empalme – Celica y Celica- Pindal.

- Equipos principales: 2'404.000 USD.
- Centro de Seccionamiento e interconexión al sistema de distribución de la EERSSA: 179.000 USD.
- Obra Civil: 78.150 USD.
- Conductores: 47.600 USD.
- Sistema de Puesta a Tierra: 3.900 USD.
- Alumbrado exterior: 17.000 USD.
- Ingeniería y estudios: 40.000 USD.
- Montaje, instalación, pruebas, logística: 149.000 USD.

- Impuesto al Valor Agregado (12%): 350.238 USD.

5.2.2 Análisis Económico

Se propone una modelo de análisis económico, basado en flujos de caja proyectados para 11 años, que nos permite analizar la conveniencia de su ejecución.

En este análisis se considera que en el año 0 se realiza una inversión de 3'268.888 USD, que corresponde a los recursos necesarios para la instalación del sistema de almacenamiento de energía. La etapa de operación o funcionamiento abarca los siguientes 10 años, que se considera la vida útil del sistema.

Durante este periodo, se estiman los costos de operación y mantenimiento, así como los beneficios económicos derivados de la implementación del sistema.

En lo que respecta a los beneficios esperados por la implementación del proyecto se consideran los siguientes:

- Por reducción de pérdidas de energía se calculan beneficios de 2.080 USD anuales, durante toda la vida útil del sistema.
- Por ahorro en la compra de energía en el Mercado Eléctrico Mayorista. El costo de la energía en horas de carga el sistema de almacenamiento tiene un valor de 0,051 USD/kWh a diferencia de cuando entrega en horas pico con un valor de 0,084 USD/kWh. Esta diferencia genera un ahorro de 80,01 USD diarios, lo que equivale a 29.202 USD anuales.
- Los mayores beneficios económicos se derivan de la suspensión de algunas de las inversiones que tiene previsto ejecutar la EERSSA para repotenciar el anillo de subtransmisión para garantizar la calidad de energía en los cantones Pindal y Zapotillo. Inicialmente se tenía previsto la inversión de 15,27 millones de USD, mediante la implementación del BESS los gastos de repotenciación disminuyen a 8,49 millones de USD en 10 años, además este gasto de repotenciación pueden ser diferidos gracias a la implementación del BESS.

Los gastos de operación del BESS se estiman en 62.109 USD anuales, desglosados de la siguiente manera:

- Por mano de obra: 45.764 USD anuales.
- Por materiales: 13.076 USD anuales.
- Otros: 3.269 USD.

Otro componente de gastos corresponde a la depreciación, que en el presente análisis corresponde al método lineal en donde se establece el valor anual de depreciación dividiendo el monto de inversión para la vida útil del proyecto, lo que equivale a 326.889 USD anuales.

La diferencia entre los beneficios y los gastos y costos anuales del proyecto dan como resultado la Utilidad Bruta, a la cual se debe restar el 15% de participación para los trabajadores y el 25% del pago del impuesto a la renta de acuerdo a la legislación ecuatoriana, dando como resultado la Utilidad Neta.

El flujo de efectivo proyectado, se calcula como la suma de la utilidad neta más la depreciación para cada uno de los años de funcionamiento del BESS. En el caso del año cero al ser el año en el que se realiza la inversión el flujo de efectivo es negativo.

Una vez que se tiene calculado el flujo de efectivo para los 11 años del análisis económico, se determinan los siguientes indicadores económicos:

- **Valor Presente Neto:** Es el método de análisis más conocido, el cual se basa en realizar la suma de todos los valores proyectados en el flujo de efectivo ya sean positivos o negativos, pero traídos a valor presente o descontados, utilizando una tasa de descuento del 12% anual que es normalmente aceptada en el Ecuador para este tipo de análisis. En el presente análisis se obtiene un Valor Presente Neto Positivo de 1'735.880 USD, cabe señalar que el criterio de validación de un proyecto de inversión es aceptado cuando el VPN es positivo por lo que en el presente caso el proyecto propuesto es adecuado.
- **Tasa Interna de Retorno:** Mide la rentabilidad en porcentaje para la cual el Valor Presente Neto de una inversión es cero, es decir es la tasa de descuento que obliga a que el proyecto de inversión alcance el equilibrio financiero. El criterio para validación de un proyecto se establece cuando la TIR resulte mayor a la tasa de descuento (12%), en el presente caso los cálculos arrojan una TIR de 12,96% por lo que el proyecto es viable.
- **Relación Beneficio Costo:** Se calcula como el cociente en la suma de los beneficios traídos a valor presente y la inversión inicial, el criterio de validación de un proyecto se alcanza cuando la Relación Beneficio Costo es superior a 1. En el presente análisis se determinó una relación beneficio costo de 1,04 por lo que el proyecto es viable.

ANÁLISIS ECONÓMICO	
Vida útil del proyecto:	10 años
Tasa de descuento:	12,0%
CONCEPTO	USD
Inversión	3.268.888
Gastos repotenciación	8.496.697
Total gastos de operación	3.889.977
Utilidad neta	2.767.827
Depreciación	3.268.888
Tasa interna de retorno	12,96%
Valor Presente Neto	\$126.091
Relación Beneficio-Costo	1,04

Tabla 5.1: Análisis económico del proyecto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El objetivo de modelar el sistema eléctrico de potencia de la EERSSA utilizando la herramienta Cymdist ha sido cumplido exitosamente. La herramienta Cymdist ha permitido obtener una simulación precisa y detallada de la estructuración de subtransmisión, incluyendo la implementación de la central FV y BESS, lo que facilita un mejor análisis del sistema eléctrico.
- Si
- Se determinó los criterios para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía con éxito. Identificado mediante la herramienta Cymdist los parámetros clave para optimizar el dimensionamiento del sistema de almacenamiento, teniendo en cuenta las características y demandas específicas del sistema eléctrico de la EERSSA, obteniendo una reducción de pérdidas de energía de 20.802 kWh anuales.
- La viabilidad de la implementación del BESS a través del presupuesto referencial ha brindado una evaluación financiera sólida. La relación Beneficio-Costo de 1.04 indican que el proyecto de implementación del sistema de almacenamiento es viable desde una perspectiva económica, lo que respalda la decisión de avanzar con su implementación para mejorar las condiciones operativas del sistema eléctrico de la EERSSA.

Recomendaciones

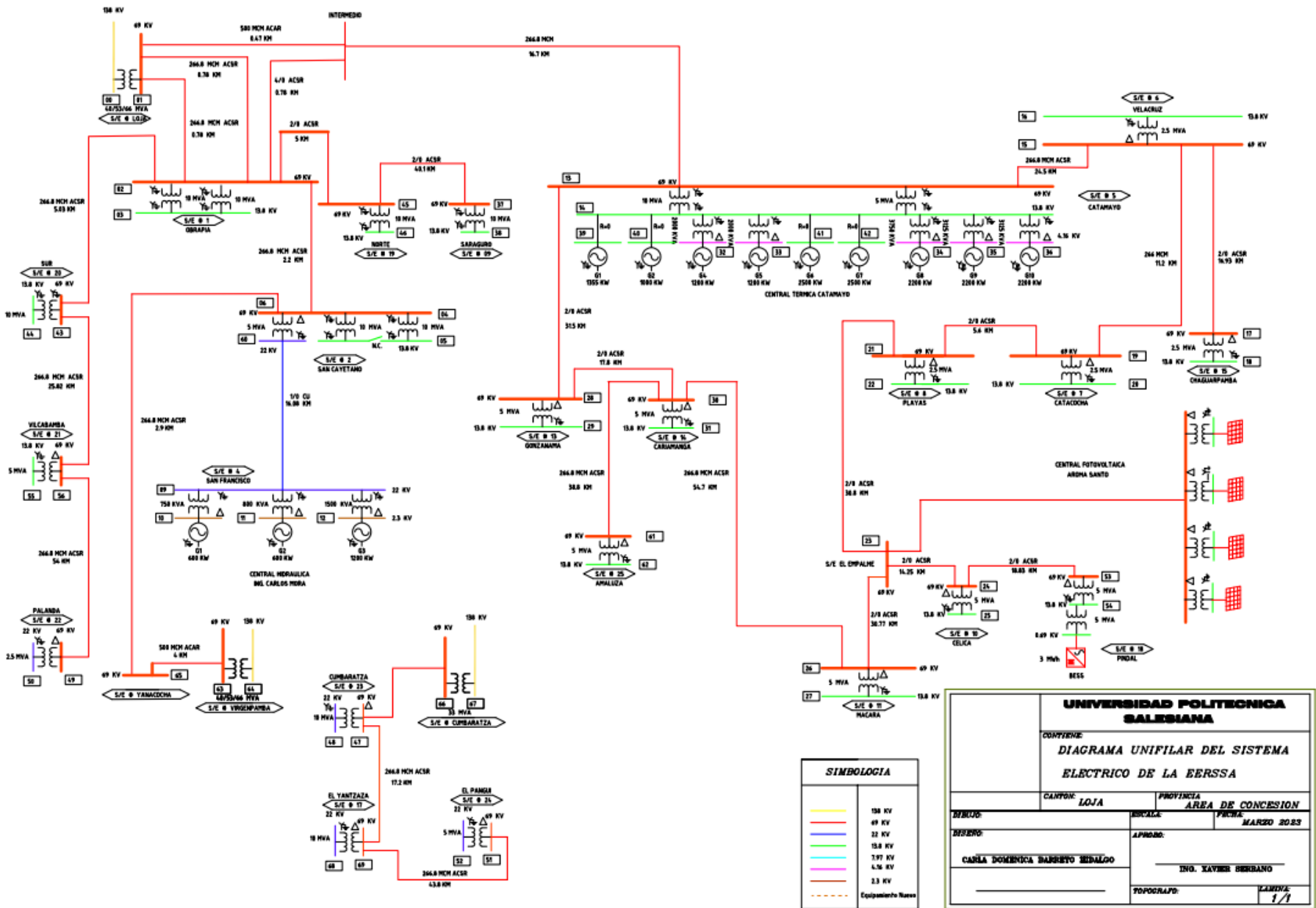
- Se sugiere fomentar la investigación y el desarrollo de aplicaciones de almacenamiento de energía en el Ecuador con el propósito de aprovechar plenamente los recursos renovables disponibles y optimizar la operación del sistema eléctrico. Es importante continuar investigando nuevas tecnologías de almacenamiento, evaluar su viabilidad para promover la implementación de soluciones innovadoras en el sector energético.
- Continuar con la integración de generación fotovoltaica: Dado el crecimiento de la generación fotovoltaica interconectada al sistema, se plantea continuar con la integración de más fuentes de generación renovable. Esto ayudará a

diversificar la matriz energética, minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero y explotar el potencial de la energía solar en la zona.

ANEXOS

ANEXO A

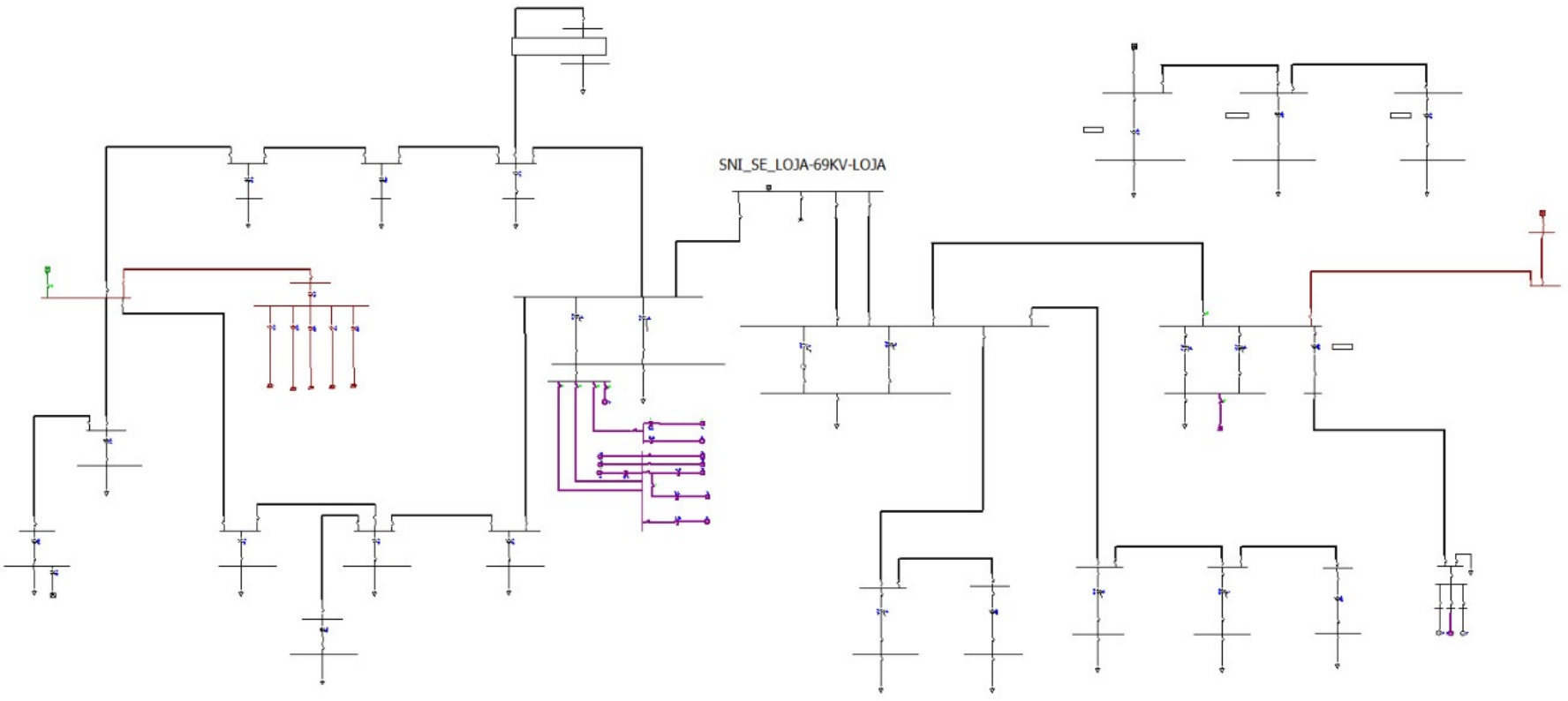
DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA DE LA EERSSA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA		
CONTIENE DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA ERSSA		
CANTÓN: LOJA		PROVINCIA: AREA DE CONCESION
REVISOR: CARLA DOMINICA BARRERO HIDALGO	ELABORADO: INO. XAVIER HERRERA	FECHA: MARZO 2023
TOPOGRAFIA:		ESCALA: 1/1

ANEXO B

DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA DE LA EERSSA EN CYMDIST



BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. A. Guacaneme, D. Velasco, y C. L. Trujillo, “Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes,” *Información tecnológica*, vol. 25, no. 2, pp. 175–188, 2014.
- [2] GoSolar. (16 de Febrero de 2023, Quito, Ecuador) <https://www.gosolar.energy/>.
- [3] A. E. Mejía y M. H. Londoño, “Sistemas de almacenamiento de energía y su aplicación en energías renovables,” *Scientia et technica*, vol. 1, no. 47, pp. 12–16, 2011.
- [4] J. Peralta, Á. Lopez, A. Barriga, I. Sosa, y E. Delgado, “Análisis estadístico de la información meteorológica para la explotación de energías renovables en el ecuador,” in *Conference Paper*, (2), 2013, pp. 9–9.
- [5] A. A. Rodríguez Rodríguez, “Sistemas de almacenamiento de energía en los sistemas eléctricos de potencia,” Ph.D. dissertation, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Facultad de Ingeniería, 2019.
- [6] V. Zyryanov, N. Kiryanova, I. Korotkov, G. Nesterenko, G. Prankevich, y I. Rudiuk, “Analysis of energy storage systems application in the russian and world electric power industry,” in *2020 Ural Smart Energy Conference (USEC)*, 2020, pp. 106–109.
- [7] W. E. Goldsborough y P. E. Fansler, “The storage-battery in substations,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XXII, pp. 243–277, 1903.
- [8] R. Billinton y Bagen, “Reliability considerations in the utilization of wind energy, solar energy and energy storage in electric power systems,” in *2006 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 2006, pp. 1–6.
- [9] L. Endemaño Ventura, “Análisis global de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica,” Master’s thesis, Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2016.
- [10] H. Zhang, H. Dou, J. Ren, J. Li, y H. Zhang, “Research on the application of superconducting magnetic energy storage in wind/photovoltaic generation system,” in *2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 2009, pp. 213–215.

-
- [11] Z. Wang, D. Luo, R. Li, L. Zhang, C. Liu, X. Tian, Y. Li, Y. Su, y J. He, “Research on the active power coordination control system for wind/photo-voltaic/energy storage,” in *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2017, pp. 1–5.
- [12] G. Nesterenko, G. Prankevich, S. Eroshenko, R. Chuvashhev, y V. Zyryanov, “Technical and economic efficiency analysis of the energy storage systems use in off-grid power systems,” in *2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, 2021, pp. 68–72.
- [13] Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. (Loja, Ecuador) <https://www.eerssa.gob.ec/>.
- [14] EATON, *Programa de análisis de redes eléctricas CYME*. Eaton-Clevelant, Enero, 2015.