

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



PROYECTO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

“MAGÍSTER EN SISTEMAS DE ENERGÍA”

TEMA:

Integración de Sistemas de Almacenamiento de Energía en Redes Eléctricas para Mejorar la Calidad de Energía y Promover la Eficiencia Energética.

AUTOR:

Santiago Fabián Valarezo Torres

Guayaquil - Ecuador

2023

Resumen

La transición energética hacia fuentes renovables está transformando los paradigmas de suministro y consumo de energía. En este contexto, el presente trabajo tiene como caso de estudio el Hospital Básico de Yantzaza, ubicado en la provincia de Zamora Chinchipe, pero que se encuentra dentro del área de concesión de la EERSSA. La implementación de una microrred en este hospital, que incorpora energía fotovoltaica, térmica y almacenamiento de energía, representa un ejemplo emblemático de transición energética. Este proyecto realiza un análisis detallado, con valores reales, de la viabilidad económica de la microrred, destacando el papel fundamental del sistema de almacenamiento. El modelo matemático desarrollado identifica los horarios óptimos de operación de los elementos de la microrred, basándose en la producción de energía, disponibilidad del recurso renovable y la demanda del hospital. Este enfoque proporciona una hoja de ruta valiosa para la gestión eficiente de la energía, no solo en el Hospital Básico de Yantzaza, sino también como referencia para otras instituciones que buscan optimizar su infraestructura energética en el contexto de la transición hacia un sistema más sostenible.

Palabras claves: ***Almacenamiento de energía, microrred, eficiencia energética, energías renovables.***

Abstract

The energy transition towards renewable sources is transforming the paradigms of energy supply and consumption. In this context, the present work focuses on the "*Hospital Básico de Yantzaza*" located in the province of Zamora Chinchipe, but within the concession area of the EERSSA. The implementation of a microgrid in this hospital, incorporating photovoltaic, thermal, and energy storage, represents an emblematic example of energy transition. This project conducts a detailed analysis, with real values, of the economic viability of the microgrid, highlighting the fundamental role of the storage system. The developed mathematical model identifies the optimal operation schedules of the microgrid elements, based on energy production, availability of renewable resources, and the hospital's demand. This approach provides a valuable roadmap for efficient energy management, not only at the "*Hospital Básico de Yantzaza*" but also as a reference for other institutions seeking to optimize their energy infrastructure in the context of the transition towards a more sustainable system.

Keywords: ***Energy storage, Microgrid, Energy efficiency, Renewable energy.***

DEDICATORIA

A Dios, por su guía y fortaleza. A mis padres, Fanny y Fabian, por su constante amor y sacrificio a lo largo de mi vida. A mis hermanos, Sebastián y Fernando, por su apoyo y ánimo durante este trayecto. A Ariana por su paciencia, confianza y motivación diaria. A mis abuelitos, familiares y amigos, por sus palabras de aliento y motivación constante.

Gracias a todos los que confiaron en mí.

Santiago Valarezo Torres

AGRADECIMIENTO

Agradezco de todo corazón a mi familia por su amor incondicional y apoyo inquebrantable durante todo este proceso.

Agradezco a mis amigos y compañeros de promoción por su apoyo y experiencias vividas.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Miguel Torres por haber hecho posible este proyecto, por sus enseñanzas, consejos y sobre todo por ser una excelente persona.

Santiago Valarezo Torres

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Titulación, me corresponde exclusivamente y ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría. El patrimonio intelectual del mismo, corresponde exclusivamente a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Santiago Fabian Valarezo Torres

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

PhD. Juan Peralta
PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. Miguel Torres
PROFESOR TUTOR

ABREVIATURAS O SIGLAS

AMPL:	A Mathematical Programming Language (Lenguaje de Programación Matemático)
EERSSA:	Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A.
ESS:	Energy Storage System (Sistema de Almacenamiento de Energía)
BESS:	Battery Energy Storage System (Sistema de Almacenamiento de energía por Baterías)
AEMA:	Agencia Europea de Medio Ambiente
AC:	Alternating Current (Corriente Alterna)
DC:	Direct Current (Corriente Directa)
PLANEE:	Plan Nacional de Eficiencia Energética del Ecuador
LOSPEE:	Ley orgánica del Servicio Público de la Energía Eléctrica
GEI:	Gases de Efecto Invernadero
SEP:	Sistema Eléctrico de Potencia
SMES:	Superconducting Magnetic Energy Storage (Almacenamiento de Energía por Superconductor Magnético)
CENACE:	Centro Nacional de Control de Energía
SNI:	Sistema Nacional Interconectado
MCI:	Máxima Capacidad Instalada
CSC:	Current Source Converter
VSC:	Voltage Source Converter

- FES:** Flywheel Energy Storage
- CAES:** Compressed Air Energy Storage
(Almacenamiento de Energía por Aire Comprimido)
- ERNC:** Energía Renovable No Convencional
- EERSSA:** Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A.
- S/E:** Subestación
- IEDs:** Intelligent Electronic Devices
(Dispositivos Electrónicos Inteligentes)

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Descripción del problema.....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. Hipótesis.....	4
1.5. Alcance.....	4
CAPÍTULO 2	5
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Marco Conceptual.....	5
2.1.1 Energía y medio ambiente.....	5
2.1.2 Transición energética	5
2.1.3 Energías renovables.....	5
2.1.5 Eficiencia energética	6
2.1.7 Empresa eléctrica de distribución y comercialización	7
2.1.8 Redes eléctricas	7
2.1.9 Sistemas de almacenamiento de energía (ESS)	8
2.1.10 Alimentador expreso	9
2.1.11 Gestión de la Energía.....	9
2.2 Marco Teórico.....	9
2.1.1 Situación del sistema eléctrico ecuatoriano	9
2.1.2 Sistemas de almacenamiento aplicados a la distribución de energía.....	12
2.1.3 Viabilidad de sistemas de almacenamiento de energía	16

2.1.4	Sistemas de almacenamiento basados en baterías.....	17
2.1.5	Dimensionamiento de sistemas de almacenamiento	18
2.1.6	Casos de uso de ESS	21
2.3	Marco Legal	22
2.3.1	Retos regulatorios y de mercado	22
	CAPÍTULO 3	23
3.	METODOLOGÍA.....	23
3.1.	Tipo de investigación	23
3.2.	Caso de estudio: Alimentador “Hospital Básico Yantzaza”	23
3.2.1.	Descripción general.....	23
3.2.2.	Subestación Yantzaza.....	25
3.2.2.1.	Nivel de cortocircuito e impedancia equivalente de la S/E.....	26
3.2.3.	Características técnicas del Alimentador “Hospital Yantzaza”	27
3.2.4.	Datos históricos de consumo.....	29
3.2.5.	Perfiles de carga	30
3.3.	Modelo matemático de programación	32
3.3.1.	Elementos de la microrred propuesta	32
3.3.2.	Costos de los elementos de la microrred.....	33
3.3.3.	Técnica de optimización utilizada	35
	CAPÍTULO 4	39
4.	Resultados y Análisis.....	39
4.1.	Resultados de modelo de optimización – AMPL	39
	CAPÍTULO 5	49
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
6.	REFERENCIAS	1
7.	APÉNDICES Y ANEXOS.....	1
7.1.	Apéndice A	1

7.2. Apéndice B	4
7.3. Apéndice C	1

LISTADO DE FIGURAS

Ilustración 1 Potencia nominal y efectiva a nivel nacional	10
Ilustración 2 Potencia nominal de centrales de generación renovables	11
Ilustración 3 Potencia nominal de centrales de generación no renovables.....	11
Ilustración 4 Potencia vs. Energía para diferentes ESS [11]	13
Ilustración 5 Etapas de un SMES [13].....	14
Ilustración 6 Etapas de CAES [14].....	16
Ilustración 7 Campos de aplicación de los tipos de almacenamiento [12]	17
Ilustración 8 Aplicaciones de BESS	18
Ilustración 9 Procedimiento de dimensionamiento de ESS [18]	19
Ilustración 10 Dimensionamiento de ESS para equilibrar cargas residuales [18] .	20
Ilustración 11 Hospital Básico de Yantzaza	24
Ilustración 12 Diagrama Unifilar de la S/E Yantzaza	25
Ilustración 13 Perfil de carga del Hospital Básico de Yantzaza	31
Ilustración 14 Microrred propuesta	33
Ilustración 15 Promedio de Energía Solar, Global Solar Atlas (World Bank Group)	1

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Carga Instalada "Hospital Básico Yantzaza"	24
Tabla 2 Valor de fallas en máxima generación.....	26
Tabla 3 Equivalente en máxima generación	26
Tabla 4 Valor de fallas en mínima generación	27
Tabla 5 Equivalente en mínima generación	27
Tabla 6 Datos técnicos del alimentador	27
Tabla 7 Impedancias del alimentador por fase.....	28
Tabla 8 Admitancia del alimentador por fase	28
Tabla 9 Impedancia de secuencia positiva y homopolar	28
Tabla 10 Valores de energía del hospital	29
Tabla 11 Valores de potencia activa del hospital	29
Tabla 12 Valores de factor de potencia del hospital	30
Tabla 13 Carga del hospital de Yantzaza.....	31
Tabla 14 Valores para modelo de optimización.....	34
Tabla 15 Energía entregada por la red de distribución de acuerdo al modelo	42
Tabla 16 Porcentaje de corte de energía de acuerdo a horarios propuestos	43
Tabla 17 Potencia Activa de Inyección del BESS	44
Tabla 18 Potencia Activa de Extracción del BESS.....	45
Tabla 19 Energía Almacenada por horas.....	46

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La creciente conciencia sobre los impactos ambientales del uso de combustibles fósiles y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero han generado un cambio paradigmático en la forma en que concebimos y gestionamos la energía. En este contexto, la transición hacia fuentes de energía renovable se ha convertido en una prioridad global, con la búsqueda de soluciones más sostenibles y eficientes en el sector energético. Este cambio ha llevado a un enfoque más descentralizado y adaptable en la generación y distribución de energía, con un énfasis creciente en la integración de sistemas de almacenamiento de energía en redes eléctricas.

La integración de sistemas de almacenamiento de energía en redes eléctricas representa un paso fundamental hacia la creación de sistemas energéticos más flexibles, resilientes y sostenibles. Estos sistemas ofrecen la capacidad de almacenar energía generada por fuentes intermitentes como la solar y la eólica, permitiendo su uso cuando más se necesite y reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles.

En este contexto, el presente trabajo se centra en el caso de estudio del Hospital Básico de Yantzaza, ubicado en la provincia de Zamora Chinchipe. Este hospital, aunque se encuentra dentro del área de concesión de la EERSSA, ha enfrentado desafíos significativos en cuanto a la calidad y confiabilidad del suministro de energía. La implementación de una microrred en el Hospital de Yantzaza, que incorpora energía fotovoltaica, térmica y almacenamiento de energía, representa un ejemplo emblemático de transición energética en un entorno real.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la viabilidad económica y técnica de la microrred implementada en el Hospital de Yantzaza y desarrollar un modelo matemático para optimizar el costo y la operación de

cada elemento de la microrred. Se espera que este enfoque no solo mejore la calidad del suministro de energía en el hospital, sino que también sirva como un modelo replicable para otras instituciones que buscan optimizar su infraestructura energética en el contexto de la transición hacia un sistema más sostenible. En última instancia, se espera que este trabajo contribuya al avance de la investigación en el campo de la energía renovable y la eficiencia energética, proporcionando una valiosa hoja de ruta para una gestión más eficiente y sostenible de la energía en el sector de la salud y más allá.

1.1. Antecedentes

La creciente demanda de energía, junto con los desafíos ambientales asociados con el uso de combustibles fósiles, ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles y eficientes en el sector energético. La transición hacia fuentes de energía renovable se ha convertido en una prioridad global, con un enfoque renovado en la generación distribuida, la eficiencia energética y la integración de tecnologías de almacenamiento de energía.

En este contexto, las microrredes han surgido como una solución innovadora para abordar los desafíos de suministro de energía en áreas remotas, así como en entornos urbanos donde la confiabilidad del suministro es una preocupación. Las microrredes son sistemas eléctricos locales que pueden operar de manera independiente o conectados a la red principal y que incorporan fuentes de energía renovable, sistemas de almacenamiento de energía y tecnologías de gestión de la demanda.

La implementación de microrredes ofrece una serie de beneficios potenciales, incluida la mejora de la confiabilidad del suministro, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la mitigación de los impactos ambientales y sociales asociados con la generación de energía convencional. Además, las microrredes pueden contribuir a la resiliencia de la red eléctrica al proporcionar una

capacidad de respaldo en caso de interrupciones del suministro principal.

En el ámbito de la salud, la calidad y confiabilidad del suministro de energía son especialmente críticas, ya que la falta de energía puede tener consecuencias graves para la prestación de servicios médicos y la atención al paciente. Los hospitales y centros de salud dependen en gran medida de una fuente de energía constante y confiable para operar equipos médicos, sistemas de refrigeración, iluminación y otros dispositivos esenciales.

Sin embargo, muchos hospitales en áreas rurales y en países en desarrollo enfrentan desafíos significativos en cuanto al suministro de energía, incluidos cortes frecuentes de electricidad y una calidad deficiente del servicio. En respuesta a estos desafíos, se han implementado soluciones innovadoras, como la integración de microrredes con fuentes de energía renovable y sistemas de almacenamiento de energía, para mejorar la resiliencia y la eficiencia energética de los centros de salud.

1.2. Descripción del problema

El Hospital Básico de Yantzaza, ubicado en la provincia de Zamora Chinchipe, se ve afectado por la inestabilidad en el suministro eléctrico, reflejo de los cortes de electricidad frecuentes que enfrenta el país. En un contexto de cambio de matriz energética y promoción de la transición hacia fuentes renovables, es crucial abordar estos desafíos. La implementación de una microrred con energía fotovoltaica, térmica y almacenamiento de energía se presenta como una solución para mejorar la confiabilidad del suministro, reducir los cortes de electricidad y avanzar hacia un sistema energético más sostenible. Sin embargo, se necesita una evaluación completa de la viabilidad económica y técnica de esta solución, así como un modelo matemático para optimizar su operación.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar la viabilidad económica de la microrred implementada en el Hospital de Yantzaza y desarrollar un modelo matemático para optimizar el costo y la operación de cada elemento de la microrred.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo matemático para optimizar la operación de la microrred, considerando la producción de energía, la demanda del hospital y los costos asociados.
- Identificar los horarios óptimos de operación de cada elemento de la microrred para minimizar los costos y maximizar la eficiencia energética.
- Evaluar el desempeño económico de la microrred en términos de costos operativos y beneficios económicos.

1.4. Hipótesis

Se espera que la implementación de la microrred en el Hospital de Yantzaza mejore significativamente la calidad del suministro de energía, reduzca los costos operativos y promueva un uso más eficiente de la energía. El modelo matemático desarrollado permitirá optimizar la operación de la microrred, maximizando el uso de energía renovable y minimizando los costos asociados.

1.5. Alcance

Esta investigación se centrará específicamente en la evaluación de la microrred implementada en el Hospital de Yantzaza y en el desarrollo de un modelo matemático para optimizar su operación. El alcance incluirá la recopilación y análisis de datos históricos de energía, la evaluación de la viabilidad económica y técnica de la microrred, y la implementación y validación del modelo matemático propuesto.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 Energía y medio ambiente

La generación, el transporte y el consumo de energías convencionales tienen un impacto significativo sobre el medio ambiente, al igual que cualquier actividad humana. Se puede argumentar que en conjunto estas actividades son la principal fuente de emisión de gases de efecto invernadero. Según AEMA, si el uso predominante de combustibles fósiles en la matriz energética no disminuye, parece inevitable que las emisiones de gases de efecto invernadero, responsables del cambio climático, continúen aumentando [1].

2.1.2 Transición energética

Promueve la transformación de un sistema energético con base en combustibles fósiles a uno de bajas emisiones o cero emisiones de carbono basado en fuentes renovables. Esto supone reemplazar la electricidad proveniente de fuentes fósiles por fuentes renovables que impacten de forma sistemática en otros ámbitos de la vida cotidiana (ej. Transporte, salud, vivienda).

Durante décadas, Ecuador fue dependiente de combustibles fósiles para su generación eléctrica; con el objetivo de disminuir la dependencia de combustibles fósiles y abordar el cambio climático, Ecuador inició su transición hacia una matriz de producción eléctrica que enfatiza la generación hidroeléctrica y, en menor medida, otras fuentes renovables no convencionales [2].

2.1.3 Energías renovables

Las energías renovables son un tipo de energías derivadas de fuentes naturales que llegan a reponerse más rápido de lo que

pueden consumirse. Generalmente las fuentes de energías renovables abundan y se las encuentra en cualquier entorno [3].

Energía solar: Esta energía proviene de la radiación solar y se puede capturar y convertir en energía eléctrica. La energía solar es abundante, respetuosa con el medio ambiente e inagotable.

2.1.4 Sistema de generación fotovoltaica

Un sistema de generación fotovoltaica es un sistema que utiliza paneles solares para convertir la energía solar en energía eléctrica. Estos sistemas están compuestos por paneles solares fotovoltaicos, que capturan la luz solar y la convierten en corriente eléctrica continua (DC). Luego, un inversor convierte esta corriente continua en corriente alterna (AC), que es la forma de energía necesaria y utilizada en hogares y negocios [3].

2.1.5 Eficiencia energética

La eficiencia energética se refiere a la relación entre la energía útil producida y la energía total consumida en cualquier sistema o proceso dado. Evalúa la efectividad con la que se utiliza la energía para realizar una tarea en específico o alcanzar un resultado deseado [4]. Al mejorar la eficiencia energética en diferentes sectores, incluidos los residenciales, comerciales, industriales y de transporte, se pueden lograr reducciones significativas en el consumo de energía, los costos y los impactos ambientales.

2.1.6 Plan Nacional de Eficiencia Energética

El Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035 (Ecuador) recopila propuestas aplicables que se basan en prácticas internacionales. El objetivo es garantizar un desarrollo económico sostenible para la población actual y las futuras generaciones, mediante el uso más inteligente, eficiente y responsable de los recursos, en armonía con el entorno. En términos energéticos, se trata no solo de producir más, sino de consumir de manera más eficiente [5].

2.1.7 Empresa eléctrica de distribución y comercialización

Persona jurídica cuyo título habilitante le faculta para realizar las actividades de distribución y comercialización de energía eléctrica y alumbrado público general dentro de su Área de Servicio.

2.1.8 Redes eléctricas

- **Redes eléctricas tradicionales**

También conocidas como Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), son infraestructuras complejas que se encargan de transportar energía eléctrica desde las plantas de generación, transmisión y distribución de energía hasta los usuarios finales.

- **Redes inteligentes**

Son infraestructuras de distribución eléctrica que incorporan tecnología de información y comunicación para digitalizar su infraestructura, con el objetivo de potenciar la eficacia, la confiabilidad y la sostenibilidad del sistema [6].

Estos sistemas emplean dispositivos y sensores modernos, sistemas de control automatizado y tecnologías de información y comunicación para supervisar, dirigir y mejorar la operatividad de la red en tiempo real [6].

- **Microrredes**

Una microrred es un sistema eléctrico que integra fuentes de energía, sistemas de almacenamiento y tecnologías de control avanzadas para generar, distribuir y gestionar la energía de manera eficiente y confiable. Entre sus principales características tenemos su reducido tamaño, la alta presencia de generación distribuida a través de fuentes renovables y la posibilidad de operar conectadas o aisladas del resto del sistema eléctrico [6].

2.1.9 Sistemas de almacenamiento de energía (ESS)

Los sistemas de almacenamiento de energía (ESS) son dispositivos o sistemas que tienen la capacidad de acumular energía en diversas formas para su uso futuro. Gracias al avance en la electrónica de potencia y la reducción de costos de los ESS, su implementación en los sistemas eléctricos de potencia (SEP) se hace cada vez más viable [7]. Estas tecnologías abarcan baterías (BESS), ultra-capacitores, SMES, aire comprimido, entre otras [8]. Aunque algunas de estas tecnologías fueron diseñadas inicialmente para aplicaciones a gran escala y para respaldar la etapa de la generación, actualmente se utilizan para mejorar la confiabilidad de la red eléctrica, facilitar la transferencia de carga, mejorar la calidad de la energía y responder a la alta demanda [9].

A continuación, se describe las principales características a tomar en cuenta para la selección y diseño de sistemas de almacenamiento de energía:

- **Capacidad:** Es la cantidad máxima de energía que un ESS puede acumular en un momento dado. Esta variable normalmente se mide en kWh, y determina cuanta energía puede almacenarse y utilizarse posteriormente.
- **Ciclo de vida:** Es el periodo de tiempo durante el cual un sistema de almacenamiento puede operar de manera efectiva y eficiente antes de alcanzar el final de su vida útil. El ciclo de vida abarca desde la fabricación, instalación, operación y reciclaje del sistema.
- **Eficiencia:** Es el porcentaje de la proporción de energía que puede ser almacenada y posteriormente recuperada en un sistema de almacenamiento, en comparación con la cantidad total de energía que es ingresada inicialmente en el sistema.

2.1.10 Alimentador expreso

Un alimentador expreso es un tipo de circuito de media tensión que distribuye energía eléctrica desde una subestación hacia áreas de carga de gran tamaño. Es decir, los alimentadores expreso alimentan a una gran carga existente, ya que esta carga no puede ser alimentada por alimentadores típicos. Este tipo de circuitos está diseñado para minimizar las pérdidas de energía y maximizar la eficiencia de distribución.

2.1.11 Gestión de la Energía

El sistema de gestión de energía es un conjunto de procesos, herramientas y tecnologías utilizadas para optimizar, monitorear y controlar el desempeño de la microrred en cuestión mediante diferentes arquitecturas como la centralizada, descentralizada y distribuida [10].

2.2 Marco Teórico

2.1.1 Situación del sistema eléctrico ecuatoriano

En el marco de la situación eléctrica del país es importante tener en cuenta que la matriz energética se compone en su mayoría de energía renovable. Lo cual significa que la penetración de este tipo de energía a las redes eléctricas ecuatorianas es considerable. Según el CENACE, entre los factores más relevantes se citan las variaciones en patrones típicos de despacho y la distribución de flujos de potencia en las redes debido a la interconexión de nuevas cargas dinámicas. Es por este motivo, que se ha impulsado la búsqueda de una solución a estos problemas, y se ha promovido la investigación e implementación de ESS.

Por la razón antes expuesta, que es importante tener un contexto global del impacto de la integración de las energías renovables al Sistema Nacional Interconectado.

Capacidad de generación

Según la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, en el 2023 la potencia nominal de generación a nivel nacional fue de 8.899,58 MW, y 8.254,45 MW de potencia efectiva, como se muestra a continuación:

Tipo de Fuente	Tipo de Central	Tipo de Unidad	Potencia Nominal (MW)	Potencia Efectiva (MW)
No renovable	Térmica	MCI	2.048,00	1.636,39
		Turbogás	944,85	791,35
		Turbovapor	461,63	431,50
Total no renovable			3.454,47	2.859,24
Renovable	Biomasa	Turbovapor	144,30	136,40
	Eólica	Eólica	71,13	71,13
	Hidráulica	Embalse	1.733,20	1.749,60
		Pasada	3.459,10	3.402,71
	Fotovoltaica	Fotovoltaica	29,06	28,17
	Biogás	MCI	8,32	7,20
Total renovable			5.445,10	5.395,21
Total general			8.899,58	8.254,45

Ilustración 1 Potencia nominal y efectiva a nivel nacional

La ilustración 1 se presenta por tipo de energía, en este caso, renovable (5.445,10 MW) y no renovable (3.454,47 MW), lo cual equivale al 61,18% y 38,82% respectivamente. Actualmente la matriz energética, aprovechando la hidrografía del país, ha logrado adaptarse satisfactoriamente a la transición energética.

Centrales de generación con fuentes de energía renovable

Las fuentes renovables que aprovecho Ecuador para la generación de energía eléctrica en el 2023 fueron: hidráulica, eólica, biomasa, fotovoltaica y biogás.

Del total de generación renovable, el 95,36% fue energía hidráulica, el 2,65 fue biomasa, el 1,31 fue energía eólica, el 0,53 fotovoltaica, y el 0,15 biogás.

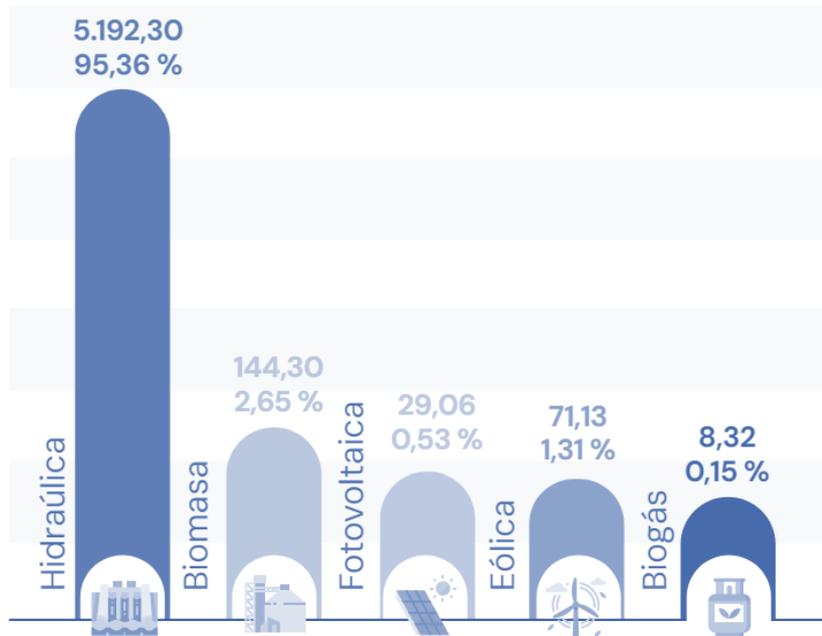


Ilustración 2 Potencia nominal de centrales de generación renovables

Centrales de generación con fuentes de energía no renovable

Este tipo de centrales utilizan combustibles fósiles como fuente energética para generar electricidad. Las tecnologías utilizadas en estas centrales son: z`, turbo gas y turbo vapor.

Del total de generación no renovable, el 59,29% MCI, el 27,35 fue turbo gas, y el 13,36 turbo vapor.

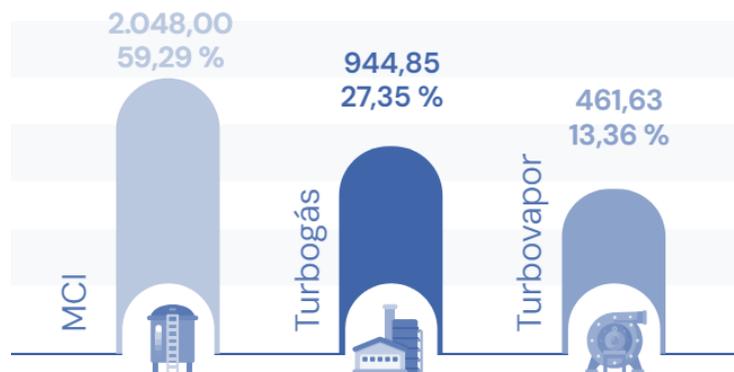


Ilustración 3 Potencia nominal de centrales de generación no renovables

Producción de energía eléctrica

En el 2023, la producción total de energía bruta del país alcanzó los 35.362,03 GWh. Lo que significa la mayor producción anual de energía de todos los tiempos. El aumento de producción de energía se ve directamente influenciado por la entrada de grandes consumidores al SNI, en este caso, petroleras y mineras han sido las causantes del aumento de demanda. Si bien esto forma parte del desarrollo y explotación de recursos en el país, el sistema eléctrico ecuatoriano debe estar preparado para el progresivo aumento de carga. Es por esta razón, que el estudio de los sistemas de almacenamiento es tan importante.

2.1.2 Sistemas de almacenamiento aplicados a la distribución de energía

Si hablamos de grandes volúmenes de energía, la energía eléctrica del tipo AC no puede ser almacenada de manera eficiente. Sin embargo, si convertimos esta energía eléctrica en energías electromecánica, electromagnética, cinética y potencial esta puede ser almacenada. Los factores más importantes al elegir una ESS son la cantidad de energía que se necesita almacenar, y la velocidad con la cual dicha energía puede cargarse y descargarse [9].

En la ilustración 4 se presentan los rangos de potencia vs energía para el corto y mediano plazo. Mediante el convertidor se determina cuál es el momento óptimo para cargar o descargar el ESS según los requisitos del sistema. A nivel de transmisión y distribución, algunos beneficios incluyen:

- Amortiguamiento de las oscilaciones
- Estabilidad del voltaje
- Nivelación de la carga
- Reserva rodante de corto plazo

- Regulación de la frecuencia
- Mitigación del efecto de reclosers/interruptores
- Mejora de la calidad de la energía.

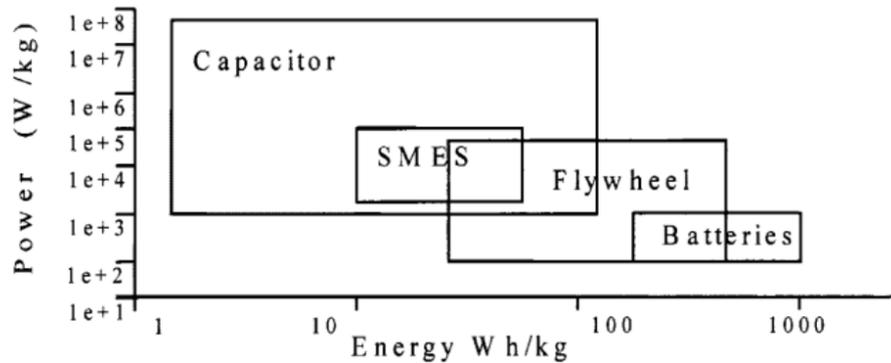


Ilustración 4 Potencia vs. Energía para diferentes ESS [11]

- **Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)**

Los SMES fueron propuestos como ESS para los SEP en la década de los 70's. Una de sus principales características es su alta capacidad de respuesta y a su alta eficiencia durante de carga y descarga con rendimientos superiores al 95%.

Las aplicaciones de los SMES se centran principalmente en mejorar el nivel de la carga, la estabilidad dinámica, la estabilidad transitoria, la estabilidad de voltaje, y la calidad de la energía [9].

Los SMES están diseñados de tal manera que la energía se almacene en sus campos magnéticos mediante una corriente DC que fluye a través de la bobina superconductora. Esta energía almacenada es cuantificada a través de la siguiente ecuación:

$$E = \frac{1}{2}LI^2 \quad (1)$$

Actualmente existen 2 formas de conversión de energía, es decir, de AC a DC para conectar con la etapa de carga y

descarga de la bobina. Una de ellas es usar un CSC y la otra es usar un VSC, como se lo puede ver a continuación.

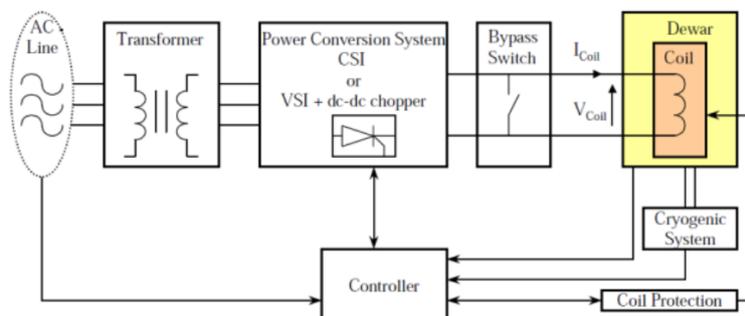


Ilustración 5 Etapas de un SMES [13]

Según las condiciones de la red, el controlador establece cuando liberar o cuando almacenar energía, y están diseñados para suministrar energía en corto plazo (short-term power) [9].

- **Battery Energy Storage Systems (BESS)**

Este Sistema opera almacenando energía químicamente, y son una de las tecnologías disponibles con mejor rendimiento costo-beneficio. Normalmente para energías renovables las BESS se conectan en serie y paralelo dependiendo de los requerimientos de corriente y voltaje. Un convertidor es empleado para conectarlas con la red eléctrica y un controlador es usado para cargarlas durante horas de poca demanda [9]. Como principal ventaja tenemos la alta densidad de energía, largos ciclos de vida, rápida capacidad de respuesta, y fácil integración con sistemas de energía renovables. Sus principales desventajas se basan en la refrigeración y la alta inversión inicial [9].

- **Advanced Capacitors**

Los capacitores operan aprovechando la capacidad de dos placas conductoras separadas por un material dieléctrico para

acumular carga eléctrica cuando se aplique una diferencia de potencial [9]. La energía almacenada se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

Para mejorar la capacidad de almacenamiento, se recomienda instalar varios capacitores en serie o en paralelo en lugar de aumentar el tamaño o capacidad de un solo capacitor.

- **Flywheel Energy Storage (FES)**

En este tipo de sistema aprovecha la energía cinética almacenada en un volante giratorio para almacenar y liberar energía eléctrica. Funciona mediante la conversión de energía mecánica en energía eléctrica.

La energía almacenada depende principalmente del momento de inercia y de la velocidad de rotación, como se indica en la siguiente ecuación:

$$E = \frac{1}{2} IW^2 \quad (3)$$

Estos sistemas operan con un motor girando a altas velocidades, lo que se conoce como etapa de carga. Cuando se requiere energía (etapa de descarga), el sistema desacelera por el torque electromagnético generado, que se opone a la dirección de rotación cuando se inyecta corriente.

Entre sus principales ventajas tenemos; que se puede almacenar altas cantidades de energía, larga vida útil, bajo costo y poca electrónica de potencia. Las desventajas son su baja densidad de energía y altas pérdidas rotacionales.

- **Compressed Air Energy Storage (CAES)**

El almacenamiento de energía en aire comprimido es un método que utiliza energía disponible durante horas de poca demanda (off-peak energy) para comprimir aire en grandes cavernas subterráneas. Este aire posteriormente se calienta utilizando gas natural en una cámara de combustión que accionará un generador. Este proceso requiere de un ciclo combinado, asimismo, el consumo gas es menor a las centrales de gas convencional para la generación de energía eléctrica.

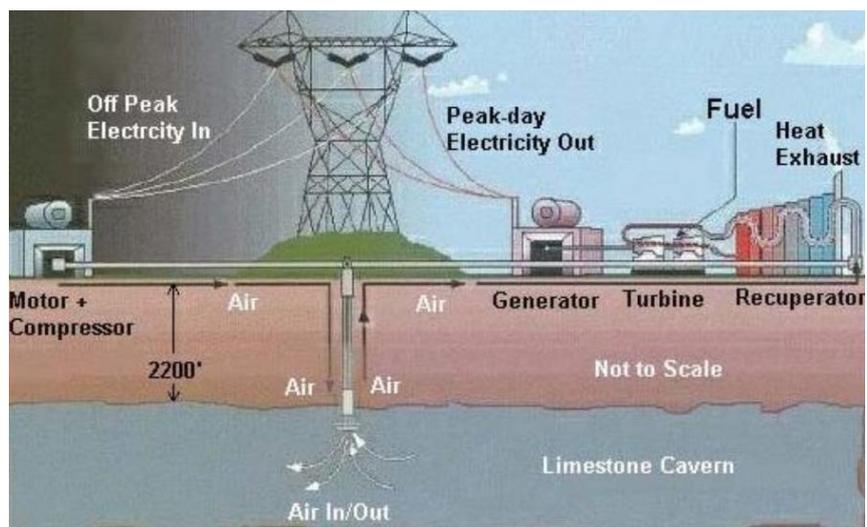


Ilustración 6 Etapas de CAES [14]

2.1.3 Viabilidad de sistemas de almacenamiento de energía

El tipo de sistema de almacenamiento debe estar estrechamente vinculado al tipo de aplicación, que puede ser sistemas de baja o alta demanda, al tipo de producción, ya sea permanente, parcial o renovable, y el costo-beneficio que nos ofrezca el sistema [12]. La ilustración 12 muestra la relación entre la energía de los distintos tipos de aplicación según la escala de las tecnologías de almacenamiento aplicables.

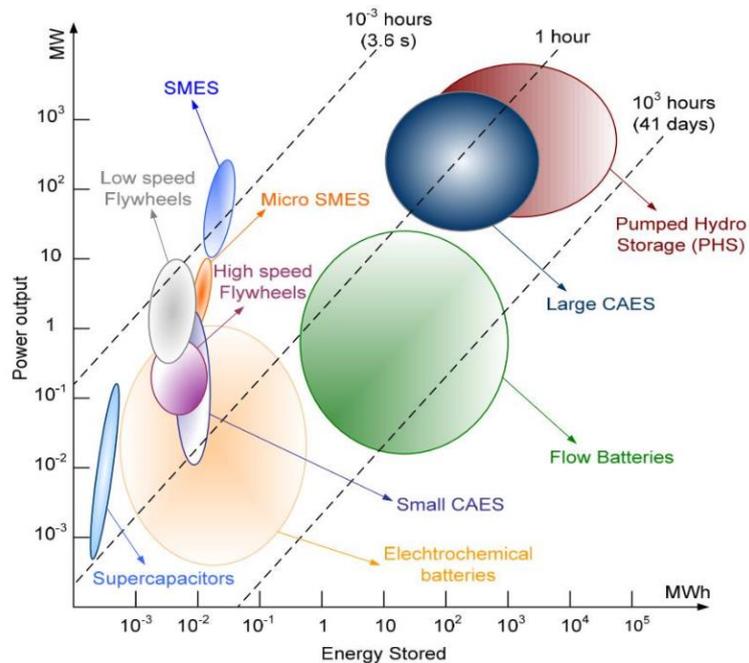


Ilustración 7 Campos de aplicación de los tipos de almacenamiento [12]

2.1.4 Sistemas de almacenamiento basados en baterías

Hoy en día los BESS son los sistemas más estudiados, y que más aplicaciones tienen con respecto al almacenamiento de energía. Se podría considerar que los *Sistemas de Almacenamiento de Energía Basados en Baterías* son celdas que tienen la capacidad de cargarse y descargarse mediante reacciones químicas. Ahora, es importante mencionar que la efectividad de sus características dependerá de la calidad de sus componentes y diseño. Asimismo, estos componentes definirán el coste del almacenamiento, el peso, volumen y vida útil [16]. Entre sus principales características tenemos la capacidad de almacenamiento, la velocidad de carga y descarga, ciclo de vida útil y densidad de energía.

En redes eléctricas, las aplicaciones se sustentan en los niveles de potencia y energía requeridos, teniendo en cuenta que no todas las aplicaciones suponen el mismo esfuerzo para las baterías [17].

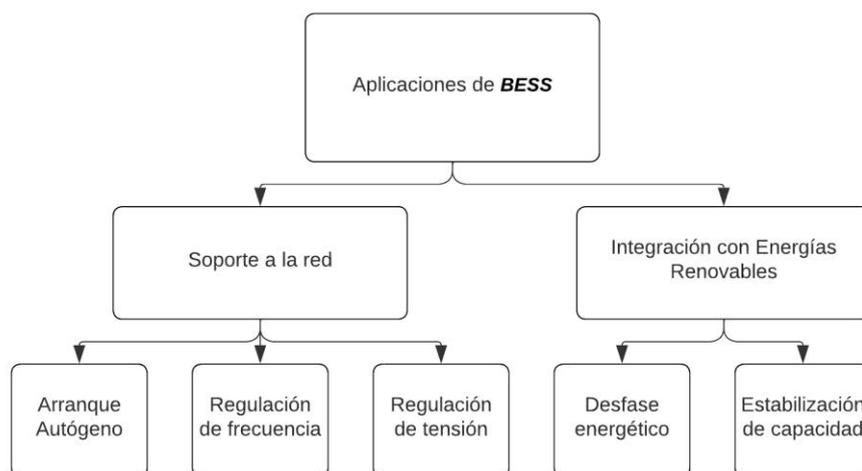


Ilustración 8 Aplicaciones de BESS

También tiene aplicaciones dentro del mercado y despacho eléctrico, por ejemplo, en el sector de la industria donde la tarifa es dinámica, se puede cargar las baterías durante periodos donde el precio de la energía es bajo (comprar), y se puede descargar cuando los precios de la energía son más altos (vender), es decir, los BESS entrarían al mercado eléctrico, lo que significa que para el cliente es un beneficio económico [16].

Una de las aplicaciones que a nivel de SEP ha recibido mucho énfasis en los últimos años, es la regulación primaria de frecuencia ya que está promete tener un alto impacto contra los retos de la integración de energías renovables a los SEP.

En comparación con las plantas de generación convencionales, los BESS pueden cambiar su potencia despachada de forma rápida y con tiempos menores debido a su electrónica de potencia [17].

2.1.5 Dimensionamiento de sistemas de almacenamiento

El tipo de tecnología y propiedades hacen que los ESS sean o no sean adecuados para todos los casos o condiciones. Por este

motivo es esencial dimensionar y diseñar los ESS de acuerdo a su tecnología, tamaño y parámetros caso por caso.

El dimensionamiento comienza definiendo las especificaciones técnicas del sistema derivado del caso de uso. En esta situación: potencia máxima (P_{st}), capacidad máxima (E_{st}) y gradiente de potencia (α_{st}). Además, de la parte técnicas, también es necesario tomar en cuenta criterios ambientales (condiciones climáticas) y factores económicos (inversión inicial y vida útil del servicio) [18].

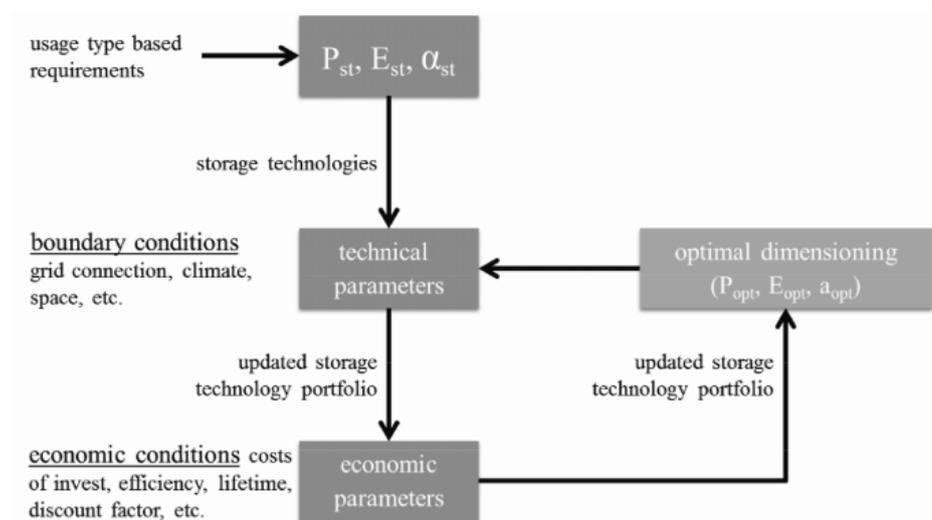


Ilustración 9 Procedimiento de dimensionamiento de ESS [18]

Para el caso de estudio propuesto veremos que primero se tendría que determinar la carga residual y luego la capacidad necesaria de almacenamiento, tomando en cuenta la ilustración 10.

En este caso, el perfil de carga residual (P_{res}) nace entre la diferencia de generación de energía y la carga de energía requerida.

Tenemos 3 casos:

- Carga residual cero: Sistema balanceado
- Carga residual positiva: Exceso de generación
- Carga residual negativa: Incremento de carga

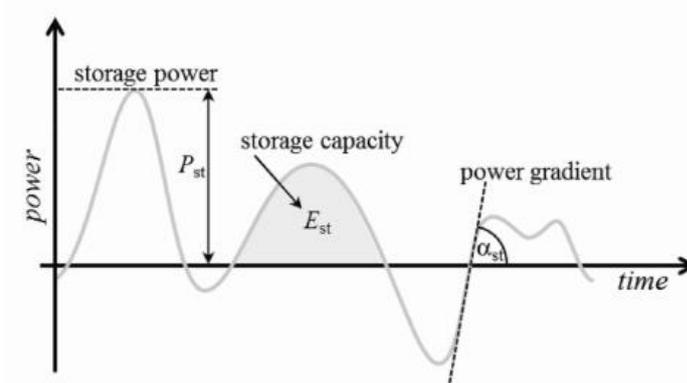


Ilustración 10 Dimensionamiento de ESS para equilibrar cargas residuales [18]

Un sistema de almacenamiento diseñado para la operación autónoma de una microrred debe ser capaz de abastecer ambas demandas; carga requerida y demanda resultante de la generación. Para este caso, el valor de η representa la eficiencia total del proceso de carga y descarga. En base a lo antes mencionado se presentan las siguientes ecuaciones [18]:

$$P_{st} = \max |P_{res}| \quad (4)$$

$$C_{st} = \max(E_{st}) = \max_{t=1}^{t,max} \left(\int_{t_i(P_{res}=0)}^{t_{i+1}(P_{res}=0)} P_{res} dt \right) \quad (5)$$

$$\alpha_{st} = \max_{k=1}^{k,max} \left(\frac{\Delta P_k}{\Delta t_k} \right) \quad (6)$$

Algunos sistemas de almacenamiento de energía (ESS), pueden tener una capacidad de almacenamiento superior. Esto suceda por la relación entre el nivel de descarga y la vida útil. Es por ello, que, en este caso de estudio, es importante tomar en cuenta el envejecimiento de las baterías para garantizar la capacidad total a lo largo de su vida útil.

El adecuado procedimiento para determinar la capacidad de almacenamiento implica estimar los costos y los beneficios de la

capacidad instalada. Esto constituye el punto de partida para el proceso de optimización del ESS [18].

Para la aplicación de ESS se recomienda realizar un análisis de sensibilidad, para obtener el valor de la capacidad de almacenamiento que maximiza los beneficios o minimiza los costos. Esto es necesario, ya que, en algunas situaciones, no utilizar ESS puede ser la mejor opción desde el punto de vista económico.

2.1.6 Casos de uso de ESS

Los casos de uso y funciones de los ESS, pueden dividirse básicamente en los que son beneficiosos para el mercado, y los que son beneficiosos para la red. Los casos de uso beneficiosos para la red tienen un impacto positivo a corto, mediano o largo plazo en la operación de redes eléctricas, es decir, el cumplimiento o mejora de frecuencia, voltaje de red o corriente de línea. En cambio, los escenarios beneficiosos para el mercado persiguen el objetivo de utilizar la energía almacenada teniendo en cuenta especificaciones y restricciones del mercado eléctrico. A continuación, se detallan los usos.

Beneficios técnicos	Beneficios económicos
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Funciones de UPS ✓ Provisión de potencia reactiva ✓ Estabilidad de voltaje ✓ Mejorar la calidad de la energía ✓ Optimización de flujo de carga ✓ Restablecimiento de la generación de energía ✓ Suministra de potencia durante cortocircuitos 	<i>Productor:</i>
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Uso de la de energía renovable residual ✓ Venta en el mercado Spot
	<i>Operador:</i>
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Oportunidad de arbitraje ✓ Cumplimiento de generación
	<i>Consumidor:</i>
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reducción de picos ✓ Aumento de autoconsumo

Análisis previos han revelado que el uso de sistemas de almacenamiento en casos específicos donde se usan los ESS

para cubrir un solo caso de uso, no es económicamente viable, específicamente debido a la gran inversión inicial necesaria para su implementación. Lo antes mencionado, hace que sea necesario la optimización de ESS mediante la operación de más de un escenario de caso de uso con el fin de establecer un uso continuo y generalizado de los sistemas de almacenamiento.

2.3 Marco Legal

2.3.1 Retos regulatorios y de mercado

La Ley Orgánica del Servicio Público de la Energía Eléctrica (LOSPEE), estableció que el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables sea el órgano rector y planificador del sector eléctrico. En el 2008 la Constitución de la República del Ecuador estableció que el estado impulsará la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energía renovable.

Así mismo dentro de la Ley Orgánica de Servicio Público de Energía Eléctrica se menciona: “...*la modernización de las redes eléctricas debe considerar aspectos regulatorios, redes de transporte y distribución de energía, redes de comunicación, generación distribuida, **almacenamiento de energía**, medición inteligente, control distribuido, gestión activa de la demanda y oportunidades de brindar nuevos productos y servicios.*”

A partir de la crisis energética del país, a inicios del 2024 se implementó la Ley de Competitividad Energética que tiene por objeto promover soluciones económicas y de generación de energía a fin de superar dicha crisis, optimizando el manejo de los recursos públicos asociados al sector eléctrico. De esa manera se promueven los Proyectos ERNC, que incluye la implementación de Sistemas de Almacenamiento.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación

Debido a su carácter experimental, se emplean procesos de simulación con un enfoque cuantitativo. Para lograrlo, el modelo propuesto sugiere emplear un enfoque de exploración metodológica que implica una búsqueda detallada, donde se aplican procesos iterativos para determinar la factibilidad del caso de estudio. En este estudio, se ha utilizado como escenario un alimentador expreso que alimenta al “Hospital Básico de Yantzaza”, en la provincia de Zamora Chinchipe, pero que se encuentra dentro del área de concesión de la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. (EERSSA). La simulación propuesta se centrará en el análisis económico y de programación de horarios de la microrred sujeto a ciertas condiciones iniciales y observando restricciones reales del hospital y del SEP.

3.2. Caso de estudio: Alimentador “Hospital Básico Yantzaza”

3.2.1. Descripción general

La Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A., tiene como misión prestar el servicio público de energía eléctrica al consumidor final de su área de concesión (Loja, Zamora Chinchipe y Gualaquiza), a través de las actividades de generación, distribución y comercialización, con alta calidad, confiabilidad y seguridad. Además, su visión se centra en garantizar que el servicio de energía eléctrica cumpla con los principios constitucionales de eficiencia, continuidad, calidad y accesibilidad.

Como parte del desarrollo urbano del cantón Yantzaza, se modernizó el Hospital Básico del cantón. Parte de su modernización

fue el aumento de equipos e infraestructura eléctrica, lo cual indica que su demanda y carga instalada aumentó.

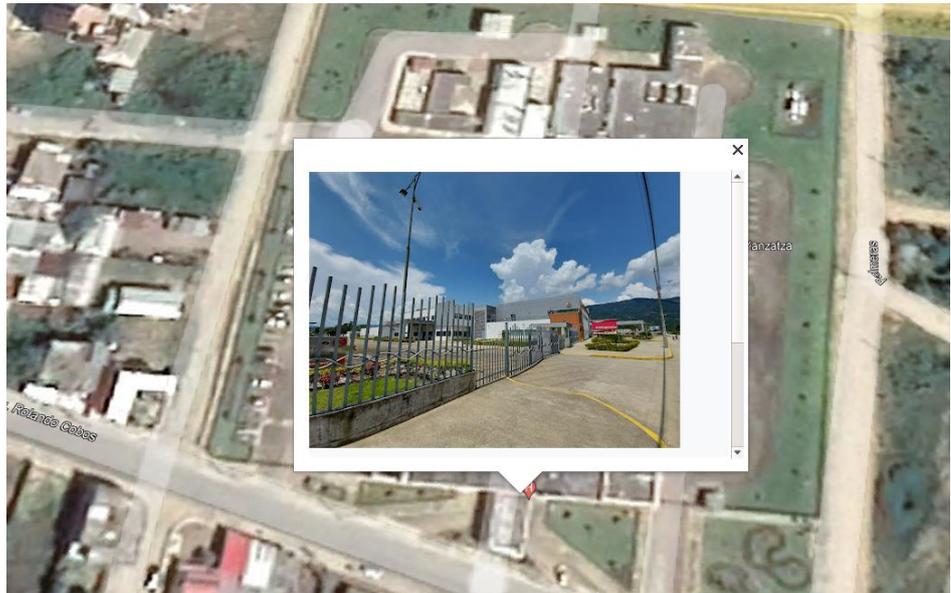


Ilustración 11 Hospital Básico de Yantzaza

Carga Instalada Actual del Hospital Básico Yantzaza:

Tabla 1 Carga Instalada "Hospital Básico Yantzaza"

Transformador	Características	Potencia (kVA)
Transformador Distribución: 20349	Padmounted Trifásico en Cabina	800
Transformador Distribución: 20350	Padmounted Trifásico en Cabina	700
Transformador Distribución: 20351	Padmounted Trifásico en Cabina	500
Transformador Distribución: 20352	Padmounted Trifásico en Cabina	200
Transformador Distribución: 20353	Padmounted Trifásico en Cabina	500

Por lo tanto, su carga instalada actual es de 2,7 MVA

La EERSSA, con la firme convicción de cumplir con la demanda de energía del hospital, y tomando en cuenta su carga proyectada, decidió implementar el alimentador expreso "Hospital Yantzaza".

Este alimentador nace desde la S/E Yantzaza y sirve únicamente a dicha carga del hospital.

3.2.2. Subestación Yantzaza

A continuación, se presenta el diagrama unifilar de la subestación Yantzaza en el que se puede apreciar que ingresan las líneas de subtransmisión “Cumbaratza” y “El Panguí”, con un nivel de voltaje de 69 kV, con sus respectivas protecciones: pararrayos, seccionadores e IEDs. Así mismo cuenta con un transformador reductor de potencia de 10MVA. Actualmente, de la salida de la subestación nacen 5 alimentados: “La saquea”, “Yantzaza4”, “Hospital Yantzaza”, “Paquisha”, y “Yantzaza3”. De esta sección en adelante se hará principal énfasis en el alimentador expreso “Hospital Yantzaza”.

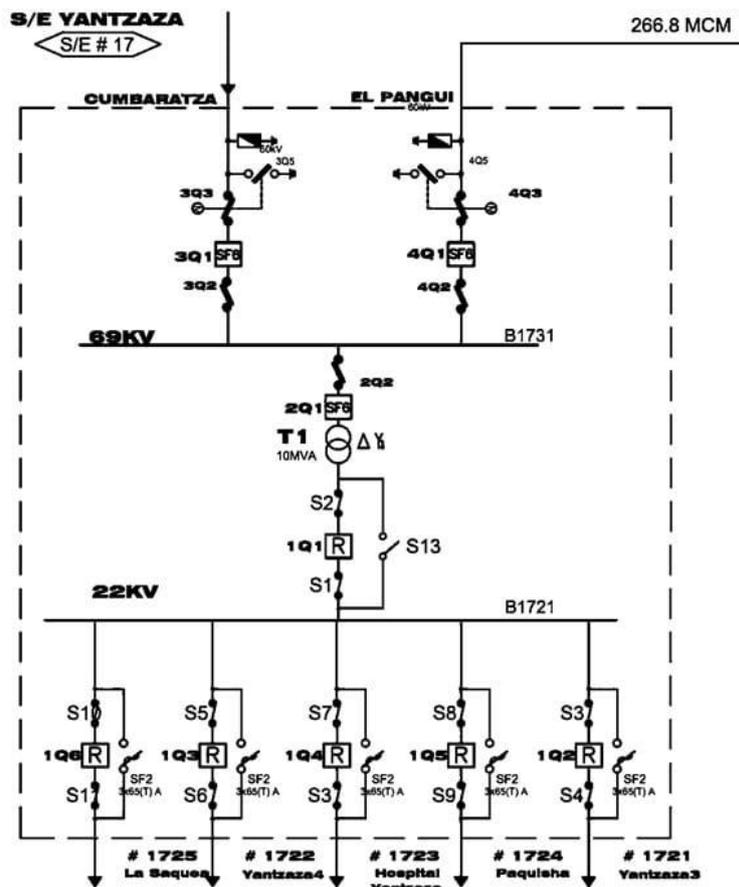


Ilustración 12 Diagrama Unifilar de la S/E Yantzaza

3.2.2.1. Nivel de cortocircuito e impedancia equivalente de la S/E

La Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. nos ha facilitado los valores de los niveles máximos y mínimos de cortocircuito y las impedancias equivalentes para las fallas trifásicas y monofásicas de la barra de 22 kV de la S/E Yantzaza. De esta barra nace el alimentador de estudio.

Dichos valores se presentan en la tabla a continuación:

Terminología:

I''^k LLL: Corriente trifásica inicial de cortocircuito

I_p LLL: Corriente trifásica pico de cortocircuito

I''^k LT: Corriente monofásica a tierra inicial de cortocircuito

I_p LT: Corriente monofásica a tierra pico de cortocircuito

- Resultados para máxima generación

Tabla 2 Valor de fallas en máxima generación

Nombre de barra	Voltaje Nominal (kV)	Falla Trifásica		Falla Monofásica	
		I''^k LLL (kA)	I_p LLL (kA)	I''^k LT (kA)	I_p LT (kA)
S/E Yantzaza	22	1.69	4.18	2.06	5.08

Tabla 3 Equivalente en máxima generación

Nombre de barra	Voltaje Nominal (kV)	Equivalente (Ohmios)					
		R0 Thev	X0 Thev	R1 Thev	X1 Thev	R2 Thev	X2 Thev
S/E Yantzaza	22	0.39	3.85	1.10	8.18	1.10	8.18

- Resultados para mínima generación

Tabla 4 Valor de fallas en mínima generación

Nombre de barra	Voltaje Nominal (kV)	Falla Trifásica		Falla Monofásica	
		I ["] k LLL (kA)	I _p LLL (kA)	I ["] k LT (kA)	I _p LT (kA)
S/E Yantzaza	22	1.67	4.13	2.04	5.03

Tabla 5 Equivalente en mínima generación

Nombre de barra	Voltaje Nominal (kV)	Equivalente (Ohmios)					
		R0 Thev	X0 Thev	R1 Thev	X1 Thev	R2 Thev	X2 Thev
S/E Yantzaza	22	0.35	3.50	1.04	7.52	1.04	7.52

Estos valores nos servirán para simular correctamente el SEP, y obtener valores reales sobre la incidencia de los BESS en el **Hospital Básico de Yantzaza**.

3.2.3. Características técnicas del Alimentador “Hospital Yantzaza”

Continuando con el modelamiento del SEP indicado, es importante tener los principales datos técnicos de alimentador expreso para que los resultados de la simulación sean confiables y sobre todo reales para una futura implementación.

Tabla 6 Datos técnicos del alimentador

Datos Técnicos del alimentador expreso “Hospital Yantzaza”	
Ubicación:	Yantzaza – Cabecera cantonal
Longitud:	8.5 km
Voltaje:	22 kV
Configuración:	CO0-0B3X1/0(1/0)
Conductor:	ACSR 1/0 (fases y neutro)
Corriente admisible:	230 [A] por fase
Posición:	ABC

Adicionalmente, luego de realizar el respectivo flujo de potencia, se obtuvieron los siguientes valores de las impedancias equivalentes. Estos valores se los obtuvo del programa CYME, que precisamente nos proporciona un análisis de redes de distribución.

Impedancia y admitancia

Terminología:

R0: Impedancia de secuencia cero, parte real

X0: Impedancia de secuencia cero, parte imaginaria

R1: Impedancia de secuencia positiva, parte real

X1: Impedancia de secuencia positiva, parte imaginaria

R2: Impedancia de secuencia negativa, parte real

X2: Impedancia de secuencia negativa, parte imaginaria

Tabla 7 Impedancias del alimentador por fase

Fases	A [Ω/km]	B [Ω/km]	C [Ω/km]
Impedancia [ABC]	0,693 + j0,368	0,361 + j0,208	0,361 + j0,208
	0,361 + j0,208	0,693 + j0,368	0,361 + j0,208
	0,361 + j0,208	0,361 + j0,208	0,693 + j0,368

Tabla 8 Admitancia del alimentador por fase

Fases	A [$\mu\text{S}/\text{km}$]	B [$\mu\text{S}/\text{km}$]	C [$\mu\text{S}/\text{km}$]
Admitancia [ABC]	0 + j53,66	0 + j0	0 + j0
	0 + j0	0 + j53,66	0 + j0
	0 + j0	0 + j0	0 + j53,66

Tabla 9 Impedancia de secuencia positiva y homopolar

	R+jX [Ω/km]	G+jB [$\mu\text{S}/\text{km}$]
Secuencia positiva	0,332 + j0,160	0 + j53,660
Secuencia homopolar	1,415 + j0,784	0 + j53,660

3.2.4. Datos históricos de consumo

Se logró obtener los datos históricos de consumo del Hospital Básico de Yantzaza desde enero del 2023, hasta febrero del 2024. Las variables que nos servirán con la simulación del código más adelante serán las siguientes: **Energía, Potencia activa, Potencia y factor de potencia.**

Tabla 10 Valores de energía del hospital

Energía	
Fecha	kWh
Enero-2023	132.822,360
Febrero-2023	107.859,90
Marzo-2023	126.126,06
Abril-2023	128.216,04
Mayo-2023	132.487,80
Junio-2023	121.278,00
Julio-2023	121.101,54
Agosto-2023	115.421,16
Septiembre-2023	121.241,28
Octubre-2023	145.013,40
Noviembre-2023	125.488,56
Diciembre-2023	121.925,70
Enero-2024	138.588,42
Febrero-2024	130.943,52

Tabla 11 Valores de potencia activa del hospital

Potencia Activa	
Fecha	kW
Enero-2023	2.930.000.000
Febrero-2023	2.300.000.000
Marzo-2023	2.440.000.000
Abril-2023	2.660.000.000
Mayo-2023	2.660.000.000
Junio-2023	2.620.000.000
Julio-2023	2.600.000.000
Agosto-2023	2.530.000.000

Septiembre-2023	2.590.000.000
Octubre-2023	2.720.000.000
Noviembre-2023	3.660.000.000
Diciembre-2023	2.560.000.000
Enero-2024	2.670.000.000
Febrero-2024	2.600.000.000

Tabla 12 Valores de factor de potencia del hospital

Factor de potencia	
Fecha	fp
Enero-2023	0,97
Febrero-2023	0,98
Marzo-2023	0,98
Abril-2023	0,97
Mayo-2023	0,97
Junio-2023	0,98
Julio-2023	0,98
Agosto-2023	0,99
Septiembre-2023	0,99
Octubre-2023	0,98
Noviembre-2023	0,98
Diciembre-2023	0,99
Enero-2024	0,98
Febrero-2024	0,98

3.2.5. Perfiles de carga

Los factores por hora para obtener el perfil de carga del hospital fueron obtenidos de estudios de calidad de energía realizados previamente. Así mismo, es importante tener en cuenta que la mayor carga del hospital es entre las 7am y 10pm, es decir 15 horas de alta demanda.

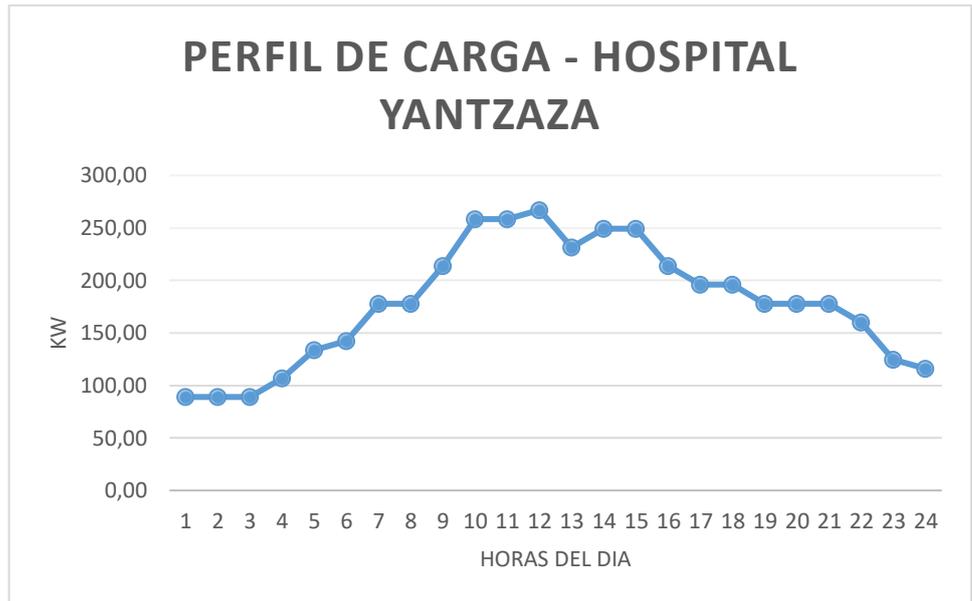


Ilustración 13 Perfil de carga del Hospital Básico de Yantzaza

Por lo tanto, la carga por horas del hospital se lo representa mediante los siguientes datos:

Tabla 13 Carga del hospital de Yantzaza

Hora del día	kW	Valor normalizado de Energía renovable disponible
1	89,040	0,000
2	89,040	0,000
3	89,040	0,000
4	106,850	0,000
5	133,560	0,000
6	142,460	0,02862
7	178,080	0,19002
8	178,080	0,35434
9	213,690	0,50394
10	258,210	0,712
11	258,210	0,84362
12	267,120	0,87968
13	231,500	0,8277
14	249,310	0,72484
15	249,310	0,60992
16	213,690	0,30288
17	195,890	0,07282

18	195,890	0,0019
19	178,080	0,000
20	178,080	0,000
21	178,080	0,000
22	160,270	0,000
23	124,650	0,000
24	115,750	0,000

Para obtener el valor de producción normalizado por horas, fue necesario obtener el valor de la energía renovable disponible. Este valor se lo obtuvo mediante un reporte solar de Global Solar Atlas, el cual se adjunta en los anexos.

La fórmula del valor normalizado es la siguiente:

$$F^{GD} = \frac{P_{hora}}{C_{n-total}} \quad (7)$$

Terminología:

F^{GD} : Factor normalizado de generación fotovoltaica

P_{hora} : Energía del recurso solar disponible

$C_{n-total}$: Capacidad nominal del sistema fotovoltaico disponible

Tomando como base estos datos, se va a optimizar el sistema incorporando elementos de una microrred al hospital. Como se lo detalla a continuación.

3.3. Modelo matemático de programación

3.3.1. Elementos de la microrred propuesta

Los principales elementos de la microrred propuesta son los que se menciona y muestra a continuación:

- 1.- Sistemas de generación fotovoltaica
- 2.- Convertidores DC/AC
- 3.- Sistema BESS
- 4.- Sistemas de generación térmica

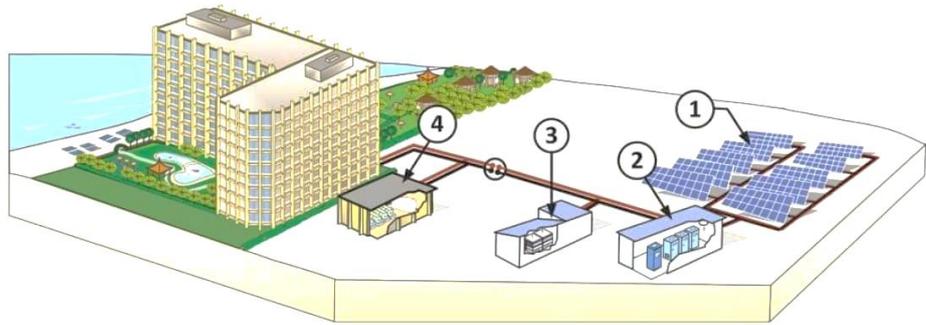


Ilustración 14 Microrred propuesta

3.3.2. Costos de los elementos de la microrred

Los elementos de la microrred conllevan un costo fijo tanto para su implementación como para su operación, estos costos están directamente relacionados con la capacidad de los equipos a instalar y calidad de construcción de los mismo.

Capacidad de la red para entregar energía al hospital

Este valor fue calculado teniendo en cuenta que la empresa distribuidora de energía tiene considerado despachar únicamente el valor de la potencia instalada del hospital. Es decir, 2.7 MVA. Considerando este valor tenemos que la capacidad máxima de la red es de: 2484 kW.

Potencia máxima a instalar del sistema fotovoltaico

El valor de potencia máxima que se puede generar tomando en cuenta la irradiación del sector, y la capacidad física del hospital para instalar paneles solares es de 50 kW.

Costo de instalación de sistema fotovoltaico

Considerando el precio de los paneles solares, inversores, estructuras, medidor bifásico y operación del sistema. Obtenemos un valor aproximado de 800 \$/kW.

Costo por corte de energía

Según el ARCERNNR (*Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables*), antes conocida como ARCONEL, en la resolución Nro. 025/11 indica que el costo de energía no suministrada es de 0.646 \$/kWh.

Potencia y costo de implementación de sistema de generación térmica

El dimensionamiento del generador térmico, va directamente relacionado con la demanda del hospital. Tomando el promedio de energía de consumo, se propone la implementación de un generador de 200 kVA.

Por lo tanto, considerando el precio del generador, del combustible necesario y su operación; el precio referencial para la generación termina sería de 1080,000 \$/kW

Costo de implementación del sistema BESS

Considerando las características por defecto de las baterías para almacenamiento de energía renovable y su precio en el mercado, podemos obtener que en promedio el costo de la capacidad de potencia activa y energía del sistema BESS es de 250 \$/kW.

Tabla 14 Valores para modelo de optimización

Capacidad de la red de subtransmisión para entregar energía al hospital.	2484 kW
Potencia máxima a instalar del sistema de generación fotovoltaica.	50 kW
Costo de instalación de sistema fotovoltaico	800 \$/kW
Costo por corte de energía	0,646 \$/kWh
Tiempo de operación en isla de la microrred	4 horas
Costo de implementación de sistema de generación térmica	1080 \$/kW
Costo de operación de sistema de generación térmica	78,50 \$/kWh

Potencia máxima a instalar del sistema de generación térmica	180 kW
Costo de implementación de capacidad de la potencia activa máxima del almacenador	250 \$/kW
Costo de implementación del sistema BESS	250 \$/kW
Energía inicial del sistema BESS	0%
Eficiencia de las baterías	98%
Tasa de autodescarga del sistema BESS	1%

3.3.3. Técnica de optimización utilizada

Para el resolver el modelo propuesto de optimización se ha utilizado AMPL, que es un lenguaje de modelado algebraico utilizado para describir problemas de programación matemática compleja. Es un lenguaje amigable ya que la sintaxis es similar a la matemática convencional de los problemas de optimización [19]

Función Objetivo:

De acuerdo al costo de los elementos de la microrred propuesta, la función objetivo será minimizar los costos del dimensionamiento de la microrred, tomando en cuenta costos de operación, mantenimiento e implementación.

Optimizar costo de microrred

$$\begin{aligned}
&= (C^{IGD} * P^{GDmax}) + (C^{IT} * P^{Tmax}) + (C^{IPA} \\
&* P^{AEmax}) + (C^{IEA} * E^{AEmax}) + 365 \left(\sum_{t \in T} \delta C_t^{OS} P_t^S \right) \\
&+ 365 \left(\sum_{t \in T} \delta C^{OT} P_t^T \right) + 365 \left(\sum_{t \in T} \delta C^{CC} P_t^D X_t \right)
\end{aligned}$$

El enfoque propuesto plantea que la función objetivo optimice la suma del costo de implementación de generación fotovoltaica, generación térmica, almacenamiento de energía; además, el costo de operación de la generación térmica y el racionamiento de demanda al usuario final.

Terminología:

F^{GD} : Factor normalizado de generación fotovoltaica

C^{IGD} : Costo de capacidad de generación fotovoltaica

P^{GDmax} : Tamaño de generación fotovoltaica

C^{IT} : Costo de capacidad de generación térmica

P^{Tmax} : Tamaño de generación térmica

C^{IPA} : Costo de la capacidad de potencia activa del BESS

P^{AEmax} : Potencia activa máxima de transferencia del BESS

P^{AEe} : Potencia activa de extracción del BESS

P^{AEi} : Potencia activa de inyección del BESS

C^{IEA} : Costo de la capacidad máxima de almacenamiento de energía

E^{AE} : Energía almacenada

E^{AE0} : Energía almacenada inicial

E^{AEmax} : Capacidad máxima de almacenamiento de energía

δ : Variable de conversión

C_t^{OS} : Costo por la compra de energía a la red subtransmisión

P_t^S : Potencia activa entregada por la red de subtransmisión

C^{OT} : Costo de operación del sistema de generación térmica

P_t^T : Potencia activa entregada por la generación térmica

C^{CC} : Costo de energía no suministrada

P_t^D : Demanda por hora en un día típico

X_t^D : Porcentaje de corte de energía

P^{Smax} : Capacidad máxima de la red de subtransmisión

P^S : Capacidad de potencia activa entregada por la red de subtransmisión

α : Eficiencia del BESS

β : Tasa de autodescarga del almacenador

Restricciones del modelo:

➤ *Balance de potencia activa*

Para lograr un correcto balance, la suma de la potencia activa entregada por la red de subtransmisión, la potencia activa entregada por el generador térmico y la potencia activa de la generación fotovoltaica debe estar en equilibrio y ser igual a la suma de la demanda típica del usuario y la potencia activa de transferencia del BESS.

$$P_t^S + P_t^T + F^{GD} * P^{GDmax} = P_t^D * (1 - X_t^D) + P^{AEe} - P^{AEi}$$

➤ *Capacidad de la subestación*

La potencia activa entregada por la red de subtransmisión debe ser menor o igual a la capacidad máxima de transferencia de energía de dicha red.

$$P_t^S \leq P^{Smax}$$

➤ *Capacidad del generador térmico*

La potencia activa entregada por el generador térmico debe ser menor o igual al tamaño total de generación térmica.

$$P_t^T \leq P^{Tmax}$$

➤ *Potencia activa máxima de inyección del BESS*

La potencia activa de inyección del almacenador debe ser menor o igual a la potencia activa máxima de transferencia del BESS.

$$P^{AEi} \leq P^{AEmax}$$

➤ *Potencia activa máxima de extracción del BESS*

La potencia activa de extracción del almacenador debe ser menor o igual a la potencia activa máxima de transferencia del BESS.

$$P^{AEe} \leq P^{AEmax}$$

➤ *Energía almacenada*

La energía almacenada será igual a la suma de la energía que fluye en ese momento y la potencia activa de extracción del BESS, menos la potencia activa de inyección del BESS todos estos valores divididos para la multiplicación entre la tasa de autodescarga del BESS por la energía existe en ese momento.

$$E^{AE} = E^{AE} + \alpha * \delta * P^{AEe} - \delta * P^{AEi} / \alpha - \beta * \delta * E^{AE}$$

➤ *Energía almacenada inicial*

La energía almacenada inicial será igual a la suma de la misma energía almacenada en el BESS 1h antes y la potencia activa de extracción del BESS, menos la potencia activa de inyección del BESS todos estos valores divididos para la multiplicación entre la tasa de autodescarga del BESS por la energía existe en ese momento.

$$E^{AE} = E^{AE0} + \alpha * \delta * P^{AEe} - \delta * P^{AEi} / \alpha - \beta * \delta * E^{AE}$$

➤ *Capacidad máxima de almacenamiento*

La energía almacenada tienes que ser mejor o igual a la energía máxima de almacenamiento dado por la capacidad total del BESS.

$$E^{AE} \leq E^{AEmax}$$

➤ *Operación de subestación bajo contingencia*

Cuando la subestación se encuentre en estado de contingencia, la potencia activa de transmisión será igual a 0, lo que nos garantiza una protección total del SEP

$$P^S = 0$$

CAPÍTULO 4

4. Resultados y Análisis

En esta sección se describen los resultados obtenidos del modelo matemático propuesto, en el que mediante optimización logramos obtener el escenario más óptimo de dimensionamiento de la microrred. Dando como prioridad el uso de energía renovable, dando pequeños pasos hacia una transición energética justa y amigable con el medio ambiente, sin que el SEP deje de ser eficiente y confiable.

4.1. Resultados de modelo de optimización – AMPL

Mediante el modelo explicado en el capítulo anterior, donde se describe la función objetivo y sus respectivas restricciones para lograr una optimización que mejor se adapte a la realidad del Hospital Básico de Yantzaza.

Consideración:

El modelo propuesto, optimiza el costo de la microrred y la operación de los diferentes elementos de acuerdo al perfil de demanda del caso de estudio. Se ha considerado, que debido a la restricción de eficiencia energética y el compromiso de disminuir los gases de efecto invernadero, no se ha considerado el funcionamiento del generador térmico, ya que este funciona a Diesel. Sin embargo, para la confiabilidad del sistema, se considera tener un generador de reserva. Además, se ha priorizado la generación fotovoltaica y el sistema de almacenamiento.

El despacho de la energía renovable considera 2 escenarios:

- (1) La energía renovable disponible abastece el 100% de la demanda del hospital, por lo tanto, el despacho de energía renovable será prioritario y no se considerará otro tipo de energía.

(2) La energía renovable disponible ya no abastece la demanda del hospital, por lo tanto, el despacho de la energía renovable se complementará con los otros elementos de generación dependiendo del horario y la demanda.

Descripción de los resultados:

- *Tamaño de la generación fotovoltaica de la microrred*

Los resultados del modelo nos indican que la capacidad instalada del sistema de generación fotovoltaica es:

$$P^{GDmax} = 424 \text{ kW}$$

- *Costo de implementación de generación fotovoltaica*

De acuerdo a la potencia fotovoltaica optimizada del modelo, el costo total de la implementación de generación fotovoltaica es:

$$C^{IGD} * P^{GDmax} = \$33924,70$$

- *Tamaño de la generación térmica de la microrred*

De la misma manera, el modelo nos optimiza la capacidad a instalar de generación térmica, tomando en cuenta el precio de ventas de energía de la EERSSA, y el recurso solar disponible, el modelo nos indica que no es necesario la implementación de generación térmica a la microrred para cubrir la demanda del hospital, esto por motivos económicos y de eficiencia energética.

- *Potencia activa máxima de inyección y extracción del BESS*

La optimización de los costos de la microrred nos revela que la potencia activa optima de inyección y extracción del BESS es:

$$P^{AEmax} = 119,49 \text{ kW}$$

- *Costo de capacidad de potencia de transferencia del BESS*

De acuerdo a la potencia activa de transferencia del BESS optimizada por el modelo, el precio de inyectar y extraer energía que se requiere de acuerdo al modelo de optimización es de:

$$C^{IPA} * P^{AEmax} = \$2987,33 \text{ kW}$$

- *Capacidad máxima del BESS*

El modelo a optimizado la capacidad instalada del BESS

$$E^{AEmax} = 411,48 \text{ kW}$$

- *Costo de implementación del BESS*

De acuerdo a la potencia instalada del BESS, dimensionada por el modelo, el precio de implementar un Sistema de Almacenamiento basado en Baterías es de:

$$C^{IEA} * E^{AEmax} = \$10286,80 \text{ kW}$$

- *Costo de la compra de energía a la EERSSA*

Así mismo, de acuerdo a los parámetros ingresados del costo de la energía eléctrica y de acuerdo al perfil de cargas del hospital, el modelo a proyectado del costo de compra de energía a la empresa distribuidora, en este caso la EERSSA.

$$\text{Costo de compra de energia EERSSA} = \$63692,20$$

- *Costo de corte de energía*

El modelo también considera que por el contexto que vive el país acerca del estiaje, se tomara en cuenta la posibilidad de cortes de energía programados por parte de la empresa distribuidora de energía.

$$\text{Costo de cortes de energia} = \$893,481$$

En este contexto, el modelo de optimización impulsado por AMPL, ha encontrado el horario en el que la red de distribución proveerá de energía al hospital, tomando en cuenta el costo del kWh, y el recurso solar

disponible. De acuerdo a las horas del día, los escenarios de operación y los posibles cortes de energía. Obtenemos el siguiente resultado:

Tabla 15 Energía entregada por la red de distribución de acuerdo al modelo

Hora	Escenario 1 [kW]	Escenario 2 [kW]	Escenario 3 [kW]	Escenario 4 [kW]
1	89.04	89.04	89.04	89.04
2	89.04	89.04	89.04	89.04
3	89.04	89.04	89.04	89.04
4	106.9	106.9	106.9	106.9
5	133.6	133.6	133.6	133.6
6	130.363	130.363	130.363	130.363
7	97.5204	97.5204	97.5204	97.5204
8	27.8391	27.8391	27.8391	27.8391
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0
16	0	0	0	0
17	45.5269	92.7709	97.6468	102.621
18	75.6011	0	195.094	195.094
19	104.92	0	178.1	178.1
20	178.1	178.1	0	178.1
21	178.1	178.1	0	178.1
22	160.3	160.3	160.3	0
23	124.7	124.7	124.7	0
24	115.8	115.8	115.8	115.8

El modelo nos muestra que debido a factores económicos y disponibilidad de energía renovable y/o almacenada, la red de distribución solamente entregara energía en el horario de 00:00 a 8:00 y de 17:00 a 00:00. La cantidad de potencia suministrada se muestra en la tabla 15.

Tomando en cuenta que los cortes de energía durarían aproximadamente 2h, el modelo de optimización ha simulado escenarios de cortes en diferentes horarios. La siguiente tabla muestra el porcentaje de cortes en los diferentes escenarios.

Tabla 16 Porcentaje de corte de energía de acuerdo a horarios propuestos

Hora	Escenario 1 [%]	Escenario 2 [%]	Escenario 3 [%]	Escenario 4 [%]
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0.385917	0	0
19	0	0.329067	0	0
20	0	0	0.329067	0
21	0	0	0.329067	0
22	0	0	0	0.254565
23	0	0	0	0.041755
24	0	0	0	0

El modelo a considerado la probabilidad de cortes de energía por parte de la empresa distribuidora, de acuerdo a los horarios de suministro, y tomando diferentes escenarios para poder obtener optimizar el costo de la microrred. El porcentaje de corte de energía se muestra en la tabla 16.

De la misma manera, se muestra el resultado del modelo para la inyección de la potencia activa al Sistema de Almacenamiento, es decir, el horario en el que económica es mas rentable para cargar el BESS.

Tabla 17 Potencia Activa de Inyección del BESS

Hora	Escenario 1 [kW]	Escenario 2 [kW]	Escenario 3 [kW]	Escenario 4 [kW]
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0
16	85.2612	85.2612	85.2612	85.2612
17	119.493	72.2492	67.3733	62.3994
18	119.493	119.493	0	0
19	73.1801	119.493	0	0
20	0	0	119.493	0
21	0	0	119.493	0
22	0	0	0	119.493
23	0	0	0	119.493
24	0	0	0	0

Las baterías se cargarán dependiendo de la energía disponible de acuerdo a los escenarios propuestos, es decir, el modelo analiza la viabilidad económica de almacenar energía por la red de distribución o por la generación fotovoltaica.

Igualmente, el modelo optimizó el horario en el que las baterías van a entregar la energía almacenada a la carga del hospital, dependiendo de la demanda, y la interacción con la generación fotovoltaica.

Tabla 18 Potencia Activa de Extracción del BESS

Hora	Escenario 1 [kW]	Escenario 2 [kW]	Escenario 3 [kW]	Escenario 4 [kW]
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	43.7296	43.7296	43.7296	43.7296
11	99.5442	99.5442	99.5442	99.5442
12	105.936	105.936	105.936	105.936
13	119.493	119.493	119.493	119.493
14	58.0745	58.0745	58.0745	58.0745
15	9.34171	9.34171	9.34171	9.34171
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	0	0	0
24	0	0	0	0

El modelo nos indica que, debido a factores económicos y disponibilidad de energía renovable, el Sistema de Almacenamiento entregara energía en el horario único de 10:00 a 15:00. La energía suministrada de complementa con la generación fotovoltaica para cubrir la demanda del hospital.

El modelo también nos brinda la energía almacenada y disponible en los BESS, de manera que se logre tener un respaldo para su despacho. Estos valores también van en consideración con los escenarios planteados. La energía almacenada se lo muestra a continuación:

Tabla 19 Energía Almacenada por horas

Hora	Escenario 1 [kW]	Escenario 2 [kW]	Escenario 3 [kW]	Escenario 4 [kW]
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	42.4307	42.4307	42.4307	42.4307
11	138.598	138.598	138.598	138.598
12	240.015	240.015	240.015	240.015
13	353.582	353.582	353.582	353.582
14	406.431	406.431	406.431	406.431
15	411.471	411.471	411.471	411.471
16	321.257	321.257	321.257	321.257
17	197.352	245.083	250.009	255.034
18	74.6736	121.932	247.534	252.509
19	0	0	245.083	250.009
20	0	0	121.932	247.534
21	0	0	0	245.083
22	0	0	0	121.932
23	0	0	0	0
24	0	0	0	0

ANÁLISIS ECONÓMICO

Luego de optimizar los costos de la microrred, el modelo nos muestra el resultado de la función objetivo. El costo de implementar una microrred en el Hospital Básico de Yantzaza sería de: \$111.784,51.

Adicionalmente, el beneficio económico que brindaría la implementación de la microrred se vería reflejado con el ahorro en la planilla mensual de energía eléctrica. Tomando como punto de partida el mes de abril del 2023 en el que se pagó aproximadamente \$12.800,00. Con el modelo propuesto de microrred, y analizando el requerimiento de energía eléctrica proveniente de la EERSSA que nos da el modelo propuesto, el valor a pagar por concepto de energía sería de \$5.240,18. Es decir, habría un ahorro aproximado de \$7.500,00 al mes.

Con el análisis previo, se calcula el tiempo de retorno de la inversión con la siguiente formula:

$$TIR = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Flujo de efectivo mensual}} = \frac{\$111.784,51}{\$7.500,00} = 15 \text{ meses}$$

Lo que quiere decir que, en aproximadamente 15 meses, el Hospital Básico de Yantzaza recuperaría la inversión realizada por la implementación de la Microrred, dándonos los siguientes beneficios:

Beneficios económicos:

Recuperación rápida de la inversión: El hecho de que el hospital recupere la inversión inicial en 15 meses indica una alta eficiencia en la generación y utilización de energía. Esto significa que los costos de operación del hospital se reducirán significativamente después de este período, lo que podría liberar recursos financieros para otros fines, como mejoras en la infraestructura médica o la contratación de personal adicional.

Reducción de los costos de energía: Al tener una fuente de energía más confiable y económica, el hospital podría reducir sus gastos en servicios

públicos, especialmente en la factura de electricidad. Esto proporcionaría un alivio financiero a largo plazo y aumentaría la viabilidad económica del hospital.

Beneficios ambientales:

Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero: La generación de energía a partir de fuentes renovables, como la energía fotovoltaica y térmica, reduce la dependencia de combustibles fósiles y, por lo tanto, disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto contribuye a la mitigación del cambio climático y al mantenimiento de un entorno más saludable.

Uso sostenible de recursos naturales: Al aprovechar las fuentes de energía renovable disponibles, el hospital promueve un uso más sostenible de los recursos naturales. La energía solar y térmica son recursos abundantes y disponibles de manera continua, lo que garantiza un suministro de energía más estable y predecible sin agotar los recursos naturales limitados.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El análisis detallado de la viabilidad económica y técnica de la microrred en el Hospital Básico de Yantzaza reveló una tasa de retorno de la inversión (TIR) excepcionalmente rápida, con un periodo de recuperación de la inversión de tan solo 15 meses. Este resultado subraya la eficiencia operativa y financiera del sistema de generación y gestión de energía implementado.
- El modelo propuesto ha demostrado su capacidad para optimizar los recursos energéticos disponibles, con un enfoque prioritario en la minimización de costos. Al considerar todos los elementos de la microrred, el modelo ha priorizado el uso de fuentes de energía renovable y sistemas de almacenamiento, lo que ha permitido una gestión más eficiente y rentable de la energía. Este enfoque ha garantizado que el hospital esté completamente abastecido de energía a un costo mínimo, asegurando así la sostenibilidad económica de la operación de la microrred.
- Desde una perspectiva técnica, la microrred ha demostrado ser una solución adaptable y escalable, capaz de integrar múltiples fuentes de energía renovable y almacenamiento de energía para satisfacer las necesidades energéticas cambiantes del hospital y adaptarse a futuras expansiones o modificaciones en la infraestructura.

Recomendaciones

- Explorar oportunidades para expandir y replicar el modelo de microrred implementado en el Hospital Básico de Yantzaza en otras instituciones de salud en la región, aprovechando los beneficios económicos y ambientales que ofrece esta tecnología.
- Considerar la implementación de medidas adicionales de eficiencia energética y conservación de recursos para complementar la operación de la microrred, como la instalación de equipos y sistemas energéticamente eficientes y la promoción de prácticas de uso responsable de la energía entre el personal y los usuarios del hospital.
- Establecer programas de capacitación y sensibilización para el personal del hospital y la comunidad local sobre los beneficios y el funcionamiento de la microrred, fomentando una cultura de sostenibilidad y responsabilidad ambiental en la región.

6. REFERENCIAS

- [1] Merino, L. (2007). Las energías renovables. Madrid, España: Haya Comunicación.
- [2] Ponce-Jara, M. A., M. Castro, M. R. Pelaez-Samaniego, J. L. Espinoza-Abad, y E. Ruiz. 2018. "Electricity sector in Ecuador: An overview of the 2007-017 decade". *Energy Policy*, 113: 513-22. doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.036.
- [3] [1] Organización de las Naciones Unidas. (s.f.). ¿Qué es la energía renovable? Recuperado de: <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy>.
- [4] [4] Departamento de Energía de los Estados Unidos. (s.f.). Eficiencia Energética en Edificios e Industria. Recuperado de: <https://www.energy.gov/eere/energy-efficiency-buildings-and-industry>
- [5] PLANEE. (2017). Plan Nacional de Eficiencia Energética (2016-2030). Quito: Manthra Comunicación.
- [6] Charry Villamagua, J.F. (2021). Implementación de Control predictivo en la Microrred de la Universidad de Cuenca en Ecuador. (Trabajo Fin de Máster Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla.
- [7] G. Delille, B. Francois, G. Malarange, J. L. Fraisse, "Energy Storage Systems in Distribution Grids: New Assets to Upgrade Distribution Networks Abilities," 20th International conference on electricity distribution, CIRED, Prague, June 2009.
- [8] K. Qian, C. Zhou, Z. Li, Y. Yuan, "Benefits Of Energy Storage In Power Systems With High Level Of Intermittent Generation," 20th International conference on electricity distribution, CIRED, Prague, June 2009.
- [9] A. E. Mejía and M. H. Londoño, "SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA Y SU APLICACIÓN EN ENERGIAS RENOVABLES", vol. 1. pp. 12–16. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22517/23447214.549>
- [10] Deluque Pinto, A., Pérez González, E., & Gutiérrez Ramírez, G. (2022). Sistema de gestión de energía para una microrred con almacenamiento en baterías e incorporación de biomasa. *Tecnológicas*, 25(54).
- [11] N. S. Chouhan, M. Ferdowsi, "Review of energy storage systems, " North American Power Symposium (NAPS), 2009, USA.
- [12] Zobaa, A. F. (2013). Energy Storage – Technologies and Applications. In *Energy Efficiency and Renewable Energy: Handbook, Second Edition*. InTech. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/2550>
- [13] A. Aysen "Electromagnetic Transient and Dynamic Modeling and Simulation of a StatCom-SMES Compensator in Power Systems," Doctoral Dissertation, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Virginia, 200.
- [14] Xcel Energy. (s.f.). AppendixE.pdf. Recuperado de: <http://www.xcelenergy.com/SiteCollectionDocuments/AppendixE.pdf>

- [15] S. Chamba, W. Vargas, D. Echeverría, y J. Riofrio, «Regulación Primaria de Frecuencia Mediante Sistemas de Almacenamiento de Energía con Baterías en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano», re, vol. 19, n.o 1, pp. 13-21, jul. 2022, doi: 10.37116/revistaenergia. v19.n1.2022.506.
- [16] O. Palizban, and K. Kauhaniemi, “Energy storage systems in modern grids – Matrix of technologies and applications”, Journal of Energy Storage, vol. 6, pp. 248-259, mayo 2016.
- [17] Regulación Primaria de Frecuencia Mediante Sistemas de Almacenamiento de Energía con Baterías en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano.
- [18] Energy storage systems: power grid and energy market use cases.
- [19] Pesantes, L.; Torres, A. (2022). Diseño Óptimo de Microrredes Híbridas para Electrificación Rural en Comunidades Aisladas de Guayaquil. [Tesis de Grado]. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil.

7. APÉNDICES Y ANEXOS

7.1. Apéndice A

Modelo

```
#elimina elementos de la memoria
reset;

#modelo
model;

#Conjuntos y Parametros
set T;          # conjunto de intervalos de tiempo
set C;          # conjunto de escenarios de operacion

param PD{T};   # demanda de potencia activa de la microred [kW]
param fGD{T};  # informacion estadística diaria normalizada de la generacion
distribuida
                # renovable disponible en funcion de su tamaño
param PSmax;   # capacidad de la red de subtransmisión que entrega
energia a la
                # microred en modo conectado [kW]
param IPGDmax; # limite máximo para el tamaño de la generación distribuida
renovable [kW]
param IPTmax;  # limite máximo para el tamaño de la generación
convencional [kW]
param cIGD;    # costo de la capacidad de la generación distribuida renovable
[$/kW]
param cIT;    # costo de la capacidad de la generación convencional [$/kW]
param cIPA;   # costo de la capacidad de la potencia activa máxima del
almacenador [$/kW].
param cIEA;   # costo de la capacidad máxima de almacenamiento de
energia [$/kWh].
param cOS{T}; # costo por la compra de energia a la red de subtransmisión
[$/kWh]
param cOT;    # costo de operacion del sistema de generación convencional
[$/kWh]
param cCC;    # costo de corte o racionamiento de carga [$/kWh]
param EAE0;   # energia almacenada inicial [kWh]
param alpha;  # eficiencia del almacenador de energia [%]
param beta;   # tasa de auto descarga del almacenador de energia [%]
param delta;  # intervalo de tiempo en horas [h]
param D;      # tiempo de duracion de la microred operando de forma aislada
en horas [h]
param p{C};   # probabilidad del escenario de operacion [%]

#Variables
var PGDmax >= 0, <= IPGDmax; # tamaño de la generacion distribuida renovable
de la microred [kW]
var PTmax >= 0, <= IPTmax;  # tamaño de la generacion convencional de la
microred [kW]
var PAEmax >= 0;            # potencia activa máxima de inyeccion y extraccion del
almacenador [kW]
var EAEmax >= 0;           # capacidad máxima de almacenamiento de energia [kWh]
var PS{T,C} >= 0;         # potencia activa entregada por la red de subtransmisión
[kW]
var PT{T,C} >= 0;         # potencia activa entregada por la generación convencional
[kW]
var xD{T,C} >= 0, <= 1;   # porcentaje de corte o racionamiento de carga [%]
```

```

var PAEi{T,C} >= 0;      # potencia activa de inyeccion del almacenador [kW]
var PAEe{T,C} >= 0;      # potencia activa de extraccion del almacenador [kW]
var EAE{T,C} >= 0;      # energia almacenada [kWh]

# Funcion objetivo
# minimizar el costo del dimensionamiento
minimize costo :
  cIGD * PGDmax + cIT * PTmax + cIPA * PAEmax + cIEA * EAEmax +
  365 * sum{t in T} sum{c in C} (p[c]*delta*cOS[t]*PS[t,c]) +
  365 * sum{t in T} sum{c in C} (p[c]*delta*cOT*PT[t,c]) +
  365 * sum{t in T} sum{c in C} (p[c]*delta*CC*PD[t]*xD[t,c]);

# balance de potencia activa
subject to balance_potencia_activa {t in T, c in C} :
  PS[t,c] + PT[t,c] + fGD[t]*PGDmax = PD[t]*(1-xD[t,c]) + PAEe[t,c] - PAEi[t,c];

subject to capacidad_de_subestacion {t in T, c in C} :
  PS[t,c] <= PSmax;

subject to capacidad_del_generador_convencional {t in T, c in C} :
  PT[t,c] <= PTmax;

subject to potencia_activa_maxima_inyeccion_almacenador {t in T, c in C} :
  PAEi[t,c] <= PAEmax;

subject to potencia_activa_maxima_extraccion_almacenador {t in T, c in C} :
  PAEe[t,c] <= PAEmax;

subject to energia_almacenada {t in T, c in C : t > 1} :
  EAE[t,c] = EAE[t-1,c] + alpha * delta * PAEe[t,c] - delta * PAEi[t,c] / alpha - beta *
  delta * EAE[t,c];

subject to energia_almacenada_inicial {t in T, c in C : t = 1} :
  EAE[t,c] = EAE0 + alpha * delta * PAEe[t,c] - delta * PAEi[t,c] / alpha - beta * delta
  * EAE[t,c];

subject to capacidad_maxima_almacenamiento {t in T, c in C} :
  EAE[t,c] <= EAEmax;

subject to operacion_de_subestacion_bajo_contingencia {c in C, t in
c..min(card(T),c+D/delta-1) : c != 0} :
  PS[t,c] = 0;

# Datos
data;

param: T : PD      fGD  cOS:=
#      [kW]      [$/kWh]
1  89.04  0.000000000  0.10
2  89.04  0.000000000  0.10
3  89.04  0.000000000  0.10
4  106.9  0.000000000  0.10
5  133.6  0.000000000  0.10
6  142.5  0.028620000  0.10
7  178.1  0.190020000  0.10
8  178.1  0.354340000  0.10
9  213.7  0.503940000  0.10
10 258.2  0.712000000  0.10
11 258.2  0.843620000  0.10
12 267.1  0.879680000  0.10

```

```
13 231.5 0.827700000 0.10
14 249.3 0.724840000 0.10
15 249.3 0.609920000 0.10
16 213.7 0.302880000 0.10
17 195.9 0.072820000 0.10
18 195.9 0.001900000 0.10
19 178.1 0.000000000 0.10
20 178.1 0.000000000 0.10
21 178.1 0.000000000 0.10
22 160.3 0.000000000 0.10
23 124.7 0.000000000 0.10
24 115.8 0.000000000 0.10
```

```
;
```

```
param C : p:=
```

```
# [%]
```

```
0 0.985
```

```
18 0.005
```

```
20 0.005
```

```
22 0.005
```

```
;
```

```
param delta := 1; # horas
```

```
param PSmax := 2484; # kW Valor tomando en cuenta la capacidad instalada
```

```
param IPGDmax := 50; # kW Valor tomando en cuenta la irradiacion y el espacio fisico del hospital
```

```
param cIGD := 800; # $/kW Valor tomando en cuenta proyectos pasados
```

```
param cCC := 0.646; # $/kWh Valor tomado de resolucio de ARCONEL
```

```
param D := 4; # horas
```

```
param cIT := 1080; # $/kW Valor tomando en cuenta presupuestando equipos nuevos y precio del combustible
```

```
param cOT := 78.50; # $/kWh Tomando en cuenta el valor del disel
```

```
param IPTmax := 180; # kW Referencia Hospital espacio
```

```
param cIPA := 250; # $/kW Valor tomando en cuenta proyectos pasados
```

```
param cIEA := 250; # $/kWh Valor tomando en cuenta proyectos pasados
```

```
param EAE0 := 0; # kWh Valor de acuerdo a DataSheet
```

```
param alpha := 0.98; # porcentaje de acuerdo a Datasheet
```

```
param beta := 0.01; # porcentje de acuerdo a Datasheet
```

```
# define CPLEX como solver
```

```
option solver cplex;
```

```
# resolver el modelo
```

```
solve costo;
```

```
# mostrar los resultados
```

```
display PGDmax;
```

```

display cIGD * PGDmax;
display PTmax;
display cIT * PTmax;
display PAEmax;
display cIPA * PAEmax;
display EAEmax;
display cIEA * EAEmax;
display 365 * sum{t in T} sum{c in C} (p[c]*delta*cOS[t]*PS[t,c]);
display 365 * sum{t in T} sum{c in C} (p[c]*delta*cOT*PT[t,c]);
display 365 * sum{t in T} sum{c in C} (p[c]*delta*cCC*PD[t]*xD[t,c]);
display PS;
display xD;
display PT;
display PAEi;
display PAEe;
display EAE;}

```

7.2. Apéndice B

Resultado

```

CPLEX 12.6.0.0: IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Commercial
Edition
optimal solution; objective 111784.4482
315 dual simplex iterations (0 in phase I)

PGDmax = 424.058

cIGD*PGDmax = 33924.7

PTmax = 0

cIT*PTmax = 0

PAEmax = 119.493

cIPA*PAEmax = 2987.33

EAEmax = 411.471

cIEA*EAEmax = 10286.8

365*(sum{t in T} sum{c in C} p[c]*delta*cOS[t]*PS[t,c]) = 63692.2

365*(sum{t in T} sum{c in C} p[c]*delta*cOT*PT[t,c]) = 0

365*(sum{t in T} sum{c in C} p[c]*delta*cCC*PD[t]*xD[t,c]) = 893.481

PS [*,*]
:   0      18      20      22      :=
1  89.04   89.04   89.04   89.04
2  89.04   89.04   89.04   89.04
3  89.04   89.04   89.04   89.04
4  106.9   106.9   106.9   106.9
5  133.6   133.6   133.6   133.6
6  130.363 130.363 130.363 130.363

```

```

7  97.5204  97.5204  97.5204  97.5204
8  27.8391  27.8391  27.8391  27.8391
9   0       0       0       0
10  0       0       0       0
11  0       0       0       0
12  0       0       0       0
13  0       0       0       0
14  0       0       0       0
15  0       0       0       0
16  0       0       0       0
17  45.5269  92.7709  97.6468  102.621
18  75.6011  0       195.094  195.094
19  104.92   0       178.1   178.1
20  178.1   178.1   0       178.1
21  178.1   178.1   0       178.1
22  160.3   160.3   160.3   0
23  124.7   124.7   124.7   0
24  115.8   115.8   115.8   115.8
;

```

```

xD [*,*]
:  0  18  20  22  :=
1  0  0  0  0
2  0  0  0  0
3  0  0  0  0
4  0  0  0  0
5  0  0  0  0
6  0  0  0  0
7  0  0  0  0
8  0  0  0  0
9  0  0  0  0
10 0  0  0  0
11 0  0  0  0
12 0  0  0  0
13 0  0  0  0
14 0  0  0  0
15 0  0  0  0
16 0  0  0  0
17 0  0  0  0
18 0  0.385917  0  0
19 0  0.329067  0  0
20 0  0  0.329067  0
21 0  0  0.329067  0
22 0  0  0  0.254565
23 0  0  0  0.041755
24 0  0  0  0
;

```

```

PT [*,*]
:  0  18  20  22  :=
1  0  0  0  0
2  0  0  0  0
3  0  0  0  0
4  0  0  0  0
5  0  0  0  0
6  0  0  0  0
7  0  0  0  0
8  0  0  0  0
9  0  0  0  0
10 0  0  0  0

```

```

11 0 0 0 0
12 0 0 0 0
13 0 0 0 0
14 0 0 0 0
15 0 0 0 0
16 0 0 0 0
17 0 0 0 0
18 0 0 0 0
19 0 0 0 0
20 0 0 0 0
21 0 0 0 0
22 0 0 0 0
23 0 0 0 0
24 0 0 0 0
;

```

PAEi [*,*]

```

: 0 18 20 22 :=
1 0 0 0 0
2 0 0 0 0
3 0 0 0 0
4 0 0 0 0
5 0 0 0 0
6 0 0 0 0
7 0 0 0 0
8 0 0 0 0
9 0 0 0 0
10 0 0 0 0
11 0 0 0 0
12 0 0 0 0
13 0 0 0 0
14 0 0 0 0
15 0 0 0 0
16 85.2612 85.2612 85.2612 85.2612
17 119.493 72.2492 67.3733 62.3994
18 119.493 119.493 0 0
19 73.1801 119.493 0 0
20 0 0 119.493 0
21 0 0 119.493 0
22 0 0 0 119.493
23 0 0 0 119.493
24 0 0 0 0
;

```

PAEe [*,*]

```

: 0 18 20 22 :=
1 0 0 0 0
2 0 0 0 0
3 0 0 0 0
4 0 0 0 0
5 0 0 0 0
6 0 0 0 0
7 0 0 0 0
8 0 0 0 0
9 0 0 0 0
10 43.7296 43.7296 43.7296 43.7296
11 99.5442 99.5442 99.5442 99.5442
12 105.936 105.936 105.936 105.936
13 119.493 119.493 119.493 119.493
14 58.0745 58.0745 58.0745 58.0745

```

```

15 9.34171 9.34171 9.34171 9.34171
16 0 0 0 0
17 0 0 0 0
18 0 0 0 0
19 0 0 0 0
20 0 0 0 0
21 0 0 0 0
22 0 0 0 0
23 0 0 0 0
24 0 0 0 0
;

```

EAE [*,*]

```

: 0 18 20 22 :=
1 0 0 0 0
2 0 0 0 0
3 0 0 0 0
4 0 0 0 0
5 0 0 0 0
6 0 0 0 0
7 0 0 0 0
8 0 0 0 0
9 0 0 0 0
10 42.4307 42.4307 42.4307 42.4307
11 138.598 138.598 138.598 138.598
12 240.015 240.015 240.015 240.015
13 353.582 353.582 353.582 353.582
14 406.431 406.431 406.431 406.431
15 411.471 411.471 411.471 411.471
16 321.257 321.257 321.257 321.257
17 197.352 245.083 250.009 255.034
18 74.6736 121.932 247.534 252.509
19 0 0 245.083 250.009
20 0 0 121.932 247.534
21 0 0 0 245.083
22 0 0 0 121.932
23 0 0 0 0
24 0 0 0 0
;

```

<<< Process finished (PID=16304). (Exit code 0)

7.3. Apéndice C

Perfil de promedio de potencia de generación fotovoltaica – Hospital Básico de Yantzaza

Average hourly profiles

Total photovoltaic power output [kWh]

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5												
5 - 6												
6 - 7	1.261	0.775	0.911	1.431	1.508	1.072	0.831	1.165	2.415	3.979	4.116	2.420
7 - 8	8.979	7.472	8.332	9.501	9.821	8.629	8.261	9.798	12.696	14.743	14.993	11.234
8 - 9	17.604	15.250	16.742	17.717	18.313	16.060	15.764	19.075	23.077	25.438	26.269	20.639
9 - 10	25.561	22.242	24.026	25.197	24.587	21.737	21.698	27.753	33.224	36.725	36.626	29.363
10 - 11	34.130	31.009	33.500	35.600	33.599	29.172	29.126	37.845	43.556	47.438	47.802	38.424
11 - 12	40.086	37.652	41.090	42.181	40.043	34.938	35.237	43.617	48.480	52.457	53.620	44.551
12 - 13	42.647	43.503	43.582	43.984	41.740	36.820	36.759	44.008	47.588	53.840	55.959	46.898
13 - 14	44.019	42.130	41.567	41.385	39.330	34.945	34.482	40.375	43.493	46.431	50.708	45.529
14 - 15	36.342	33.301	36.278	36.242	36.211	32.117	31.111	34.856	37.414	39.574	41.560	38.140
15 - 16	31.221	28.709	30.496	30.747	29.144	26.341	26.816	28.558	29.749	30.429	31.190	30.576
16 - 17	19.616	20.984	18.832	15.144	10.746	10.397	13.846	14.694	14.661	14.201	14.279	14.941
17 - 18	5.285	5.691	5.014	3.641	2.868	2.971	3.454	3.836	3.511	2.940	3.166	4.144
18 - 19	0.621	0.744	0.381	0.095		0.020	0.083	0.089	0.045		0.005	0.140
19 - 20												
20 - 21												
21 - 22												
22 - 23												
23 - 24												
Sum	307	289	301	303	288	255	257	306	340	368	380	327

Ilustración 15 Promedio de Energía Solar, Global Solar Atlas (World Bank Group)