



**METODOLOGÍA PARA DIMENSIONAR EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA
TIPO “BESS” EN GRANJAS SOLARES FOTOVOLTAICAS INTERCONECTADAS CON
POTENCIA ENTRE 1 MW Y 19,9 MW**

CRISTIAN CAMILO CAICEDO ZULETA

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERIA CON ÉNFASIS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2023**



**METODOLOGÍA PARA DIMENSIONAR EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA
TIPO “BESS” EN GRANJAS SOLARES FOTOVOLTAICAS INTERCONECTADAS CON
POTENCIA ENTRE 1 MW Y 19,9 MW**

**TRABAJO DE PROFUNDIZACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE MÁSTER EN INGENIERÍA
CON ÉNFASIS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

CRISTIAN CAMILO CAICEDO ZULETA

DIRECTORES:

**Ph.D. JAIRO ARCECIO PALACIOS PEÑARANDA
Ph.D. HAROLD JOSÉ DÍAZ MARTÍNEZ**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERIA CON ÉNFASIS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2023**

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está dedicado en primer lugar a Dios, a mi familia, especialmente a mi esposa Leydi Johana, a mis hijas Luciana, Mariana y Maria Camila, así como a mis padres Jairo y Margarita que me acompañaron durante este largo y arduo proceso.

Agradezco también a los profesores de la escuela de ingeniería eléctrica y electrónica de la Universidad del Valle, a mis directores de tesis Ph.D Jairo Palacios, Ph.D. Harold Diaz y a mis compañeros de trabajo y amigos, que con su experiencia me aportaron grandes cosas para culminar con éxito este proyecto.

¡A todos y cada uno, mil gracias!

Cristian Caicedo.

Santiago de Cali, 2023

RESUMEN

El incremento en los últimos años en la implementación de sistemas eléctricos basados en energías renovables no convencionales especialmente la fotovoltaica, requiere de nuevas tecnologías para el desarrollo de sistemas de almacenamiento seguros y confiables, con el fin de lograr una adecuada transición hacia una matriz energética renovable. El reto de reducir la variabilidad de estas fuentes de energía renovables, debido a la intermitencia propia de su naturaleza, supondrá además un desafío importante para el equilibrio de los sistemas eléctricos y el suministro continuo de electricidad.

El desarrollo de diferentes tecnologías de almacenamiento especialmente las baterías, hasta el momento son la clave del modelo energético, ya que permiten integrar de manera efectiva gran capacidad de potencia producto de fuentes de energía renovables no convencionales a la red eléctrica.

Así pues, el presente trabajo tiene como objetivo definir una metodología para dimensionar el sistema de almacenamiento de energía tipo BESS (Battery Energy Storage System) que permita aprovechar los excesos de energía en granjas solares fotovoltaicas interconectadas con potencia entre 1 MW y 19,9 MW (sin sistema de almacenamiento), considerando la disponibilidad del recurso y la variación de la demanda. El trabajo se desarrollará mediante un análisis descriptivo de cada uno de los componentes del sistema de almacenamiento por baterías, identificando los criterios operacionales y normativos de dichos sistemas, además se considerará la disponibilidad del recurso, la variación de la demanda y el comportamiento de las variables eléctricas principales mediante un análisis en el software DigSilent Power Factory.

Palabras clave: Sistemas de almacenamiento de energía, BESS (Battery Energy Storage System), sistema de gestión de baterías (BMS), energías renovables, granjas solares fotovoltaicas.

ABSTRACT

The increase in recent years in the implementation of electrical systems based on non-conventional renewable energy, especially photovoltaics, requires new technologies for the development of safe and reliable storage systems, to achieve an adequate transition towards a renewable energy matrix. The challenge of reducing the variability of these renewable energy sources, due to the intermittency of their nature, will also pose a significant challenge for the balance of electrical systems and the continuous supply of electricity.

The development of different storage technologies, especially batteries, have so far been the key to the energy model, since they allow for the effective integration of large power capacity from non-conventional renewable energy sources into the electrical grid.

Thus, the objective of this work is to define a methodology to dimension the BESS type energy storage system to take advantage of the excess energy in interconnected solar photovoltaic farms with power between 1 MW and 19.9 MW (without storage system), considering the availability of the resource and the variation of the demand. The work will be developed through a descriptive analysis of each of the components of the battery storage system, identifying the operational and regulatory criteria of such systems, in addition, the availability of the resource, the variation of the demand and the behavior of the main electrical variables will be considered through an analysis in the DigSilent Power Factory software.

Keywords: Energy storage systems, BESS (Battery Energy Storage System), battery management system (BMS), renewable energy, photovoltaic solar farms.

INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
INDICE DE CONTENIDO	6
INDICE DE TABLAS	9
INDICE DE FIGURAS	10
INTRODUCCIÓN	12
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
JUSTIFICACIÓN.....	14
MARCO TEORICO	15
OBJETIVOS	17
CAPITULO 1. ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA	18
1.1 Almacenamiento mecánico	18
1.1.1 Bombeo hidráulico	18
1.1.2 Aire comprimido.....	19
1.1.3 Volante de inercia.....	19
1.2 Almacenamiento químico.....	20
1.2.1 Hidrogeno.....	20
1.3 Almacenamiento eléctrico	21
1.3.1 Super condensadores	21
1.3.2 Super conductores eléctricos	21
1.4 Almacenamiento térmico	21
1.4.1 Sales fundidas.....	21
1.5 Almacenamiento electroquímico	22
1.5.1 Baterías secundarias.....	22
1.5.2 Baterías de flujo.....	23
1.6 Comparación de tecnologías para almacenamiento de energía	24
1.7 Proyectos relevantes sistemas de almacenamiento BESS	26
1.7.1 Proyectos a nivel nacional	26
1.7.2 Proyectos a nivel internacional	27
1.8 Normatividad	27
CAPITULO 2. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO TIPO BESS.....	30
2.1 Características generales	30
2.1.1 Baterías.....	30
2.1.2 Sistema de control de conversión (PCS).....	31

2.1.3	Sistema de gestión de baterías (BMS)	32
2.1.4	Controlador (SCADA).....	32
2.2	Aplicaciones de sistemas de almacenamiento tipo BESS.....	33
2.2.2	Generación eléctrica	33
2.2.3	Transmisión eléctrica.....	34
2.2.4	Distribución eléctrica.....	35
2.3	Criterios operacionales de los componentes principales	37
2.3.1	Baterías de ion-litio	37
2.3.2	Sistema de Gestión de Baterías.....	37
2.3.3	Sistema de conversión de potencia	39
CAPITULO 3. METODOLOGÍA PARA DIMENSIONAR EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TIPO “BESS” EN GRANJAS SOLARES FOTOVOLTAICAS.....		40
3.1	Curva de producción	40
3.2	Curva de demanda	41
3.3	Cuantificación de excedentes	41
3.4	Propósito de excedentes.....	42
3.4.1	Autoconsumo.....	42
3.4.2	Nivelación de carga	42
3.5	Cálculo de baterías	43
3.5.1	Potencia de la batería	43
3.5.2	Energía de la batería	44
3.5.3	Tiempos de carga y descarga de la batería.....	46
3.6	Sistema de control de conversión (PCS)	46
3.6.1	Inversor.....	46
3.6.2	Transformador de potencia	47
3.6.3	Esquema de protección del sistema de almacenamiento.....	47
3.7	Sistema de gestión de baterías (BMS)	48
CAPITULO 4. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TIPO “BESS” PARA UNA GRANJA SOLAR FOTOVOLTAICA INTERCONECTADA		49
4.1	Características técnicas de la granja solar	49
4.2	Curvas de producción de la granja solar	53
4.3	Curva de demanda	54
4.4	Cuantificación de excedentes	55
4.5	Propósito de excedentes.....	57
4.6	Cálculo de baterías	58
4.6.1	Potencia de la batería	58
4.6.2	Energía de la batería	59
4.6.3	Tiempos de carga y descarga de la batería.....	60
4.7	Selección de baterías.....	61

4.8	Contenedores de las baterías	62
4.9	Cajas de combinación de baterías (DCP)	63
4.10	Sistema de control de conversión (PCS)	64
4.10.1	Inversores.....	64
4.10.2	Transformador de potencia	65
4.11	Sistema de gestión de baterías (BMS)	67
4.12	Celdas de media tensión	69
4.13	Cables aislados de media tensión.....	70
4.14	Cables aislados de baja tensión	73
4.14.1	Cables aislados de baja tensión AC transformador de potencia	73
4.14.2	Cables aislados de baja tensión AC para inversores	73
4.15	Diagrama unifilar sistema de almacenamiento BESS propuesto.....	74
4.16	Disposición del sistema de almacenamiento tipo BESS en la granja solar.....	75
4.17	Análisis de variables eléctricas del sistema de almacenamiento	76
4.17.1	Análisis de flujo de carga.....	77
4.17.2	Análisis de cortocircuito	79
4.17.3	Análisis de armónicos	79
4.17.4	Análisis de carga y descarga de la batería.....	80
4.18	Análisis económico para implementación de sistema tipo BESS	82
4.18.1	Presupuesto de inversión para implementación	82
4.18.2	Amortización de inversión propuesta.....	83
4.19	Evaluación de impactos ambientales del sistema de almacenamiento tipo BESS	84
CAPITULO 5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	86
5.1	Trabajos futuros	88
Bibliografía.....		89
Anexo 1.	Diagrama unifilar general del proyecto.....	91
Anexo 2.	Arquitectura del sistema de automatización y control del proyecto	92
Anexo 3.	Resultados flujo de carga.....	93
Anexo 4.	Resultados cortocircuito	100
Anexo 5.	Resultados análisis de armónicos	104
Anexo 6.	Matriz de impactos ambientales para sistemas de almacenamiento tipo BESS.....	106

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de tecnologías para almacenamiento de energía.....	24
Tabla 2. Comparación de costos de tecnologías para almacenamiento de energía.....	25
Tabla 3. Normatividad nacional e internacional aplicable.	27
Tabla 4. Normatividad nacional complementaria.	29
Tabla 5. Características eléctricas generales en la granja solar.....	52
Tabla 6. Radiación solar promedio en la granja fotovoltaica.....	52
Tabla 7. Datos de generación de la granja fotovoltaica.	54
Tabla 8. Datos de consumo medio y máximo cliente industrial.	54
Tabla 9. Excedentes de energía.....	55
Tabla 10. Resumen de variables.	56
Tabla 11. Excedentes medios almacenados.....	59
Tabla 12. Cantidad optima de energía para almacenar	60
Tabla 13. Energía total almacenada en sistema tipo BESS	61
Tabla 14. Características técnicas celdas de media tensión.....	69
Tabla 15. BESS Cálculo de la sección mínima a utilizar para los cables de potencia	71
Tabla 16. Factor de corrección de temperatura al aire cables aislados.....	72
Tabla 17. Características técnicas cables de media tensión.....	72
Tabla 18. Resultados flujo de carga.....	79
Tabla 19. Resultados cortocircuito	79
Tabla 20. Distorsión armónica de voltaje sin sistema de almacenamiento.....	80
Tabla 21. Distorsión armónica de voltaje con sistema de almacenamiento.....	80
Tabla 22. Presupuesto de inversión sistema de almacenamiento tipo BESS.....	82

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Capacidad de generación renovable en el mundo.....	15
Figura 2. Conexión a la red de un sistema BESS.	16
Figura 3. Sistemas de almacenamiento de energía.	18
Figura 4. Esquema de bombeo hidráulico.	18
Figura 5. Esquema de almacenamiento por aire comprimido.	19
Figura 6. Esquema de almacenamiento por volante de inercia.....	20
Figura 7. Esquema de celda de hidrogeno.	20
Figura 8. Esquema de almacenamiento de energía térmica.	21
Figura 9. Esquema de almacenamiento de energía térmica.	22
Figura 10. Esquema de celda de batería secundaria.	22
Figura 11. Esquema de celda de batería de flujo REDOX.	24
Figura 12. Costos por tecnología de almacenamiento.	26
Figura 13. Esquema sistema de almacenamiento tipo BESS.....	30
Figura 14. Esquema PCS en sistema BESS.....	31
Figura 15. Esquema de inversor en sistema BESS.	32
Figura 16. Funciones principales de un BMS.	32
Figura 17. Aplicación de BESS en la regulación de frecuencia de un BMS.	33
Figura 18. Aplicación de BESS como soporte a la generación renovable.....	34
Figura 19. Aplicación de BESS como reserva operativa.....	35
Figura 20. Aplicación de BESS en nivelación de carga.....	35
Figura 21. Aplicación de BESS en calidad de suministro.	36
Figura 22. Aplicación de BESS en reducción de picos de demanda - Peak Shaving.	36
Figura 23. Metodología para el dimensionamiento del sistema tipo BESS en granjas solares.	40
Figura 24. Curva de producción o generación granja solar típica.....	40
Figura 25. Curva de demanda o perfil de consumo del sistema eléctrico colombiano.	41
Figura 26. Curva de demanda vs Curva de producción.	41
Figura 27. Modelo de contrato PPA (Power Purchase Agreement).....	42
Figura 28. Cálculo de potencia de la batería de sistemas BESS.	43
Figura 29. Cálculo de la energía a almacenar en sistemas BESS.....	44
Figura 30. Degradación de sistemas de almacenamiento tipo BESS.	45
Figura 31. Esquema de control tipo de BMS para BESS.....	48
Figura 32. Ubicación y disposición de la granja solar.....	49
Figura 33. Diagrama unifilar granja solar.....	50
Figura 34. Diagrama unifilar de interconexión granja solar.....	51

Figura 35. Diagrama de radicación de la granja solar.....	53
Figura 36. Curva de producción de la granja solar.	53
Figura 37. Curva de consumo cliente industrial.....	54
Figura 38. Cuantificación de excesos medios de energía.	55
Figura 39. Curva de excesos medios de energía.	56
Figura 40. Resumen de variables.....	57
Figura 41. Propósito de excedentes de energía.....	58
Figura 42. Distribución de energía.....	59
Figura 43. Características técnicas modulo LUNA2000-2.0MWH-2H1.....	61
Figura 44. Energía del sistema de almacenamiento tipo BESS.....	62
Figura 45. Características de contenedores LUNA2000-2.0MWH-2H1.....	62
Figura 46. Smart Rack Controller LUNA2000-2.0MWH-2H1.....	64
Figura 47. Inversor LUNA2000-200KTL-H0.....	64
Figura 48. Panel DCBOX-9/5-H0.....	65
Figura 49. Smart transformer STS-3000K-H1.....	66
Figura 50. Arreglo propuesto del sistema de almacenamiento tipo BESS.....	66
Figura 51. Características técnicas Smartlogger3000.....	68
Figura 52. Arquitectura general del sistema de gestión.....	68
Figura 53. Características técnicas celdas 8DA10.....	69
Figura 54. Diagrama unifilar sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto.....	75
Figura 55. Ubicación sistema de almacenamiento tipo BESS.....	76
Figura 56. Esquema de interconexión de granja solar con el sistema interconectado.....	78
Figura 57. Esquema de red propuesto para conexión del sistema de almacenamiento tipo BESS.....	78
Figura 58. Curva de descarga rack de batería LUNA2000-2.0MWH-2H1.....	81
Figura 59. Circuito de carga / descarga de batería.....	81
Figura 60. Ciclo de carga / descarga rack de batería LUNA2000-2.0MWH-2H1.....	82
Figura 61. Valoración matriz de Leopold.....	85

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la generación de energía mediante fuentes renovables no convencionales concretamente la fotovoltaica, presenta tendencia al aumento debido a que son más baratas que las energías convencionales en buena parte del mundo. Las principales tecnologías renovables están reduciendo drásticamente sus costos, de forma que ya son plenamente competitivas con las convencionales en un número creciente de emplazamientos. Las economías de escala y la innovación están ya consiguiendo que las energías renovables lleguen a ser la solución más sostenible, no sólo ambiental sino también económicamente, para mover el mundo.

La energía solar fotovoltaica ha experimentado en la última década una drástica reducción de costos que la ha convertido, junto con la eólica, en una de las tecnologías energéticas con mayor proyección de futuro. Así, si la potencia fotovoltaica instalada en el mundo se situaba al cierre de 2018 en 495 GW, la Agencia Internacional de la Energía prevé que para 2040 se haya multiplicado por seis, hasta superar los 3.000 GW (e incluso los 4.800 MW en su escenario más sostenible).

El mayor inconveniente de estas energías no convencionales se basa en la disponibilidad del recurso; especialmente las plantas solares fotovoltaicas no funcionan ordinariamente de noche; sin embargo, los impresionantes avances registrados en tecnologías de almacenamiento y el descenso de costos están haciendo cada vez más frecuente su vinculación a energías renovables intermitentes, de forma que sea posible almacenar la energía cuando hay disponibilidad de recurso, aunque no exista demanda, y luego suministrarla cuando lo requiera el usuario o la red.

El desarrollo de diferentes tecnologías de almacenamiento especialmente las baterías, hasta el momento son la clave del modelo energético, ya que permiten integrar de manera efectiva gran capacidad de potencia producto de fuentes de energía renovables no convencionales a la red eléctrica. La capacidad de un sistema de almacenamiento de energía depende de las características de compensación que se ofrecen. El tipo y la capacidad del sistema de almacenamiento empleado son parámetros que deben ser seleccionados adecuadamente (Guacaneme, Velasco, & Trujillo, 2013).

En la actualidad se han desarrollado diversas tecnologías para el almacenamiento de energía mediante baterías, las baterías de Ion-Litio presentan mayores ventajas técnicas y operativas para almacenamiento a gran escala, debido a su buen comportamiento a periodos continuos de carga y descarga, además del largo periodo de vida útil y su alta eficiencia (Atallah, Abdel-Sattar, & El-Dessouki, 2019).

Otro aspecto importante es la definición del sistema de gestión de las baterías (BMS) convirtiéndose este en el eje fundamental del sistema de almacenamiento, ya que de este depende la operación optima de las baterías; actualmente existen diferentes algoritmos para lograr una gestión adecuada de las baterías, los cuales se basan en la tecnología o tipo de baterías y consideran el monitoreo de variables importantes como la temperatura, el voltaje y corriente de cada una de las celdas, el porcentaje de carga y nivel mínimo de descarga.

El propósito del presente trabajo es definir una metodología que permita dimensionar el sistema de almacenamiento de energía tipo BESS (Battery Energy Storage System) para granjas solares fotovoltaicas interconectadas con potencia entre 1 MW y 19,9 MW (sin sistema de almacenamiento) con el fin de aprovechar los excesos de energía. El trabajo se desarrollará mediante un análisis descriptivo de cada uno de los componentes del sistema de almacenamiento por baterías, identificando los criterios operacionales y normativos de dichos sistemas, además se considerará la disponibilidad del recurso, la variación de la demanda y el comportamiento de las variables eléctricas principales mediante un análisis en DigSilent Power Factory; por último se aplicará la metodología desarrollada en una planta fotovoltaica definida, con el fin de dimensionar el sistema de almacenamiento tipo “BESS”.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente el proceso de diversificación de la matriz energética a nivel mundial ha conllevado al aumento en la generación de energía eléctrica mediante fuentes de energía renovables no convencionales de tipo fotoeléctrico, por su forma de generar energía limpia, inagotable y cada vez más eficiente (Agency International Energy, 2020). Esta condición ha incrementado las limitaciones operativas de los sistemas eléctricos, debido a que la disponibilidad aleatoria de la energía primaria da como consecuencia períodos con déficit y exceso de energía, teniendo en cuenta que esta energía debe ser aprovechada en el momento en que se produce, además, de no permitir funciones esenciales como: seguimiento de la demanda, control de voltaje o control de frecuencia.

Con el fin de aprovechar los periodos de exceso de energía y brindar flexibilidad operativa a los sistemas eléctricos, se han desarrollado diferentes tecnologías para el almacenamiento de energía: supercondensadores, sistemas de bombeo hidráulico, sistemas de aire comprimido, volantes de inercia, baterías, entre otros; estas tecnologías permiten diversas formas para almacenar la energía sobrante a fin de utilizarla cuando sea necesario y las condiciones de operación del sistema eléctrico lo requieran.

Uno de los sistemas de almacenamiento que posee mayor flexibilidad es el almacenamiento por baterías o “BESS” (Battery Energy Storage System). Este sistema brinda grandes ventajas en cuanto a la respuesta de carga y descarga, además de tener altos niveles de eficiencia (Mercier, Cherkaoui, & Oudalov, 2009). Los sistemas “BESS” corresponde a un conjunto de celdas conectadas en serie, paralelo, o ambas configuraciones a la vez, las cuales tienen la capacidad de almacenar la energía en forma electroquímica, estos sistemas a su vez están conformados por un sistema de conversión de potencia (PCS) y un sistema de monitoreo de batería (BMS), los cuales se encargan de controlar los niveles de voltaje, temperatura, tasa de carga, etc.

Los sistemas “BESS” cada vez son más efectivos y competitivos económicamente, permitiendo ser integrados a los sistemas de servicios auxiliares de las plantas, con el fin de mejorar su respuesta en el seguimiento de las consignas de la red (Pino, 2018); no obstante, es importante tener en cuenta que estos sistemas de almacenamiento requieren grandes espacios físicos para su ubicación y su tiempo de vida útil obliga a varios recambios durante el ciclo de vida del proyecto.

Ante la anterior problemática se plantea la siguiente pregunta de profundización: ¿Cómo dimensionar un sistema de almacenamiento de energía tipo “BESS” para aprovechar los excesos energéticos en granjas fotovoltaicas interconectadas con potencia entre 1 MW y 19,9 MW sin sistema de almacenamiento?

El alcance de esta propuesta de profundización considera la elaboración de una metodología para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía tipo “BESS” en granjas fotovoltaicas interconectadas con potencia entre 1 MW y 19,9 MW (sin sistema de almacenamiento), considerando la disponibilidad del recurso, la variación de la demanda y el comportamiento de las variables eléctricas mediante un análisis en DigSilent Power Factory.

JUSTIFICACIÓN

Las energías renovables como la fotovoltaica presenta inconvenientes debido a su aleatoriedad (no están siempre disponibles), en este caso, los sistemas de almacenamiento permiten guardar los excesos de energía con el fin de usarla cuando sea requerida. Hoy en día, el costo de implementación de los sistemas de almacenamiento es cada vez más bajo debido al desarrollo de tecnologías específicas que son técnicamente competitivas y ecológicas.

El almacenamiento de energía está creciendo en interés e importancia en la planificación y gestión de sistemas energéticos de todos los tipos y tamaños. Su importancia se debe principalmente a las ventajas que ofrece a los sistemas eléctricos en cuanto a flexibilidad y al desacoplamiento entre la generación y la demanda.

Los efectos de los sistemas de almacenamiento de energía se pueden analizar desde aspectos técnicos, ambientales y económicos, ya que brindan flexibilidad a los sistemas eléctricos, permitiendo que estos puedan realizar funciones de seguimiento de la demanda, control de voltaje o control de frecuencia; a su vez garantizan una operación dinámica de los mercados de energía.

MARCO TEORICO

En la actualidad, el continuo crecimiento en la generación de energía mediante fuentes renovables no convencionales ha conllevado al aumento de proyectos de generación fotovoltaicos por su forma de generar energía limpia, inagotable y cada vez más eficiente (Agency International Energy, 2020); sin embargo, esta condición ha incrementado las limitaciones operativas de los sistemas eléctricos, debido a que la disponibilidad aleatoria de la energía primaria da como consecuencia períodos con déficit y exceso de energía.

Con el fin de aprovechar los periodos de exceso de energía y brindar flexibilidad operativa a los sistemas eléctricos, se han desarrollado sistemas de almacenamiento por baterías “BESS” que poseen grandes ventajas en cuanto a la flexibilidad, respuesta a la carga y descarga, además de tener altos niveles de eficiencia (Mercier, Cherkaoui, & Oudalov, 2009).

Actualmente se han desarrollado diferentes investigaciones que ofrecen una amplia perspectiva del estado de las tecnologías de baterías, con el fin de determinar sus aplicaciones sobre la red eléctrica y que permitan proporcionar estos servicios de forma segura y rentable, así mismo, se han desarrollado diferentes investigaciones sobre los sistemas de control (BMS) con el fin de brindar una gestión optima de dichos sistemas de almacenamiento.

• ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

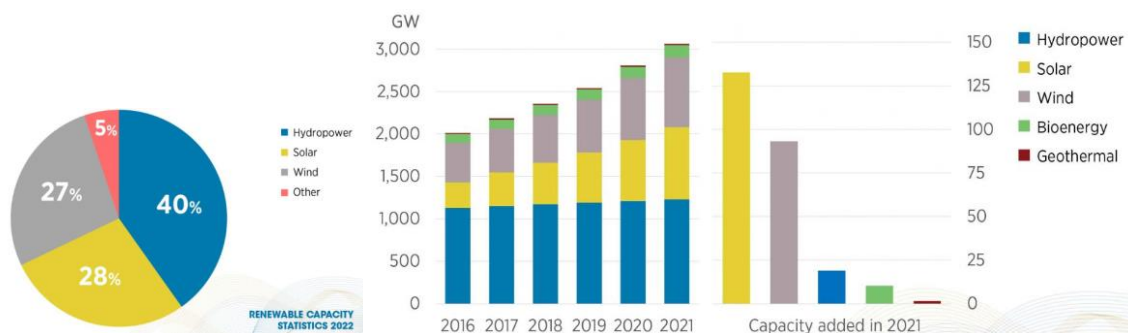
La energía solar fotovoltaica es aquella que se obtiene al convertir la luz solar en electricidad empleando una tecnología basada en el efecto fotoeléctrico. Se trata de un tipo de energía renovable e inagotable que puede producirse en instalaciones que van desde los pequeños generadores para autoconsumo hasta las grandes plantas fotovoltaicas.

Las instalaciones con conexión a la red cuentan con tres elementos básicos:

- Paneles fotovoltaicos: Se trata de grupos de celdas fotovoltaicas montadas entre capas de silicio que captan la radiación solar y transforman la luz (fotones) en energía eléctrica (electrones).
- Inversores: convierten la corriente eléctrica continua que producen los paneles en corriente alterna, apta para el consumo a través de la infraestructura eléctrica de distribución.
- Transformadores: La corriente alterna generada por los inversores es de baja tensión (380-800 V), por lo que se utiliza un transformador para elevarla a media tensión (hasta 36 kV).

En la actualidad se presenta un crecimiento continuo en la implementación de proyectos de generación fotovoltaica, tal como se observa en la Figura 1. Es importante destacar que actualmente China es el líder mundial por capacidad fotovoltaica instalada, con una potencia a finales del año 2022 de 392 GW (International Renewable Energy Agency, 2023).

Figura 1. Capacidad de generación renovable en el mundo



Fuente: International Renewable Energy Agency - IRENA.

OBJETIVOS

Objetivo general

El objetivo principal del presente trabajo de profundización es definir la metodología para dimensionar el sistema de almacenamiento de energía tipo “BESS” que permita aprovechar los excesos de energía en granjas solares fotovoltaicas interconectadas con potencia entre 1 MW y 19,9 MW, considerando la disponibilidad del recurso y la variación de la demanda.

Objetivos específicos

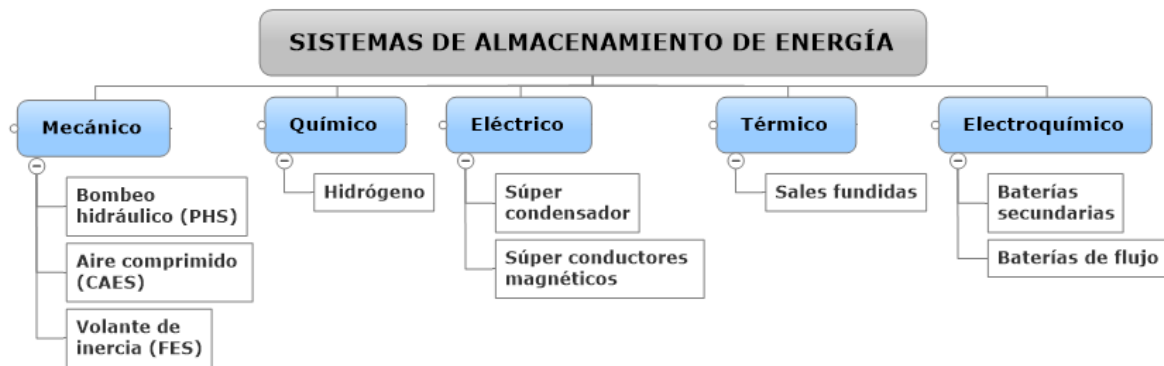
1. Identificar los criterios operacionales y normativos para definir los elementos del sistema de almacenamiento de energía tipo “BESS” en granjas fotovoltaicas interconectadas con potencia entre 1 MW y 19,9 MW.
2. Definir el esquema de gestión que requiere el sistema de almacenamiento de energía tipo “BESS” para granjas fotovoltaicas interconectadas con potencia entre 1 MW y 19,9 MW.
3. Validar la aplicabilidad de la metodología propuesta mediante la implementación en una granja fotovoltaica interconectada sin sistema de almacenamiento.

CAPITULO 1. ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA

Los distintos sistemas eléctricos de los países desarrollados se enfrentan cada vez más a una mayor penetración de energías renovables, especialmente energía eólica y solar, lo que demandará una mayor flexibilidad al sistema eléctrico.

El almacenamiento eficiente de energía es un pilar fundamental de la transición energética, ya que permite flexibilizar la producción de energía renovable y garantizar su integración en el sistema. En la Figura 3 se describen las tecnologías de almacenamiento de energía más representativas.

Figura 3. Sistemas de almacenamiento de energía.

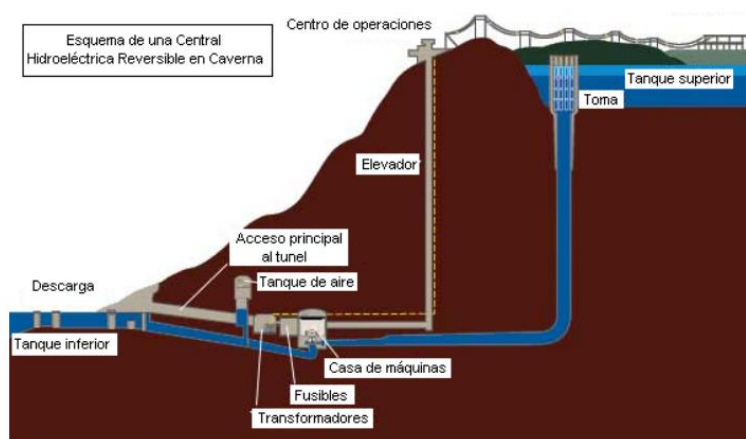


1.1 Almacenamiento mecánico

1.1.1 Bombeo hidráulico

La tecnología de almacenamiento de energía por bombeo hidráulico PHS (siglas del inglés Pumped Hydro Storage) es la más madura de todas. Se basa en almacenar energía mediante el bombeo de agua desde un embalse inferior o río hasta un embalse superior. El desnivel adecuado que se debe de dar entre los dos embalses para que dicha tecnología sea eficiente debe de ser de al menos 100 m. En la Figura 4 se presenta el esquema de una Central Hidroeléctrica Reversible (Ventura, Burgos, & Roldan, 2016).

Figura 4. Esquema de bombeo hidráulico.



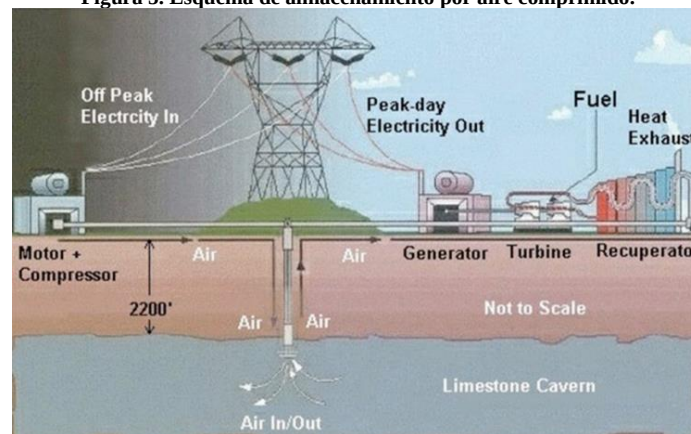
Fuente: Análisis Global de los Sistemas de Almacenamiento. Ventura, L; Burgos, M & Roldan, J.

El bombeo del agua del tanque inferior al superior se da en las horas valle (horas nocturnas), de esta forma se utiliza la energía sobrante para el funcionamiento de la turbina y así retornar el agua al tanque superior para almacenar la energía. Durante el día, cuando la demanda de electricidad es mayor, la central actúa como una central hidroeléctrica convencional, el agua del tanque superior cae por la tubería o túnel de conducción hasta la central, donde se encuentra el generador y los transformadores que transforman la energía mecánica en energía eléctrica.

1.1.2 Aire comprimido

Los sistemas CAES (siglas del inglés Compressed Air Energy Storage), utilizan la energía comprimida asociada al aire presurizado contenido en depósitos subterráneos, consistente en cavidades naturales o antiguas minas o en acuíferos porosos o en depósitos construidos por el hombre. El almacenamiento se realiza comprimiendo el aire durante horas de baja demanda de energía eléctrica. Durante horas de alta demanda, el aire comprimido se calienta y expande a través de una turbina de combustión para generar energía eléctrica, con una alta eficiencia relativa. Si bien es cierto que este proceso requiere un ciclo combinado, el consumo de gas natural para calentar el aire comprimido es menor que si se usaran las centrales de gas convencionales para generar electricidad (Ribeiro, Johnson, Crow, Arsoy, & Liu, 2001). En la Figura 5 se presenta en el esquema típico de este sistema (Calderón, 2021).

Figura 5. Esquema de almacenamiento por aire comprimido.



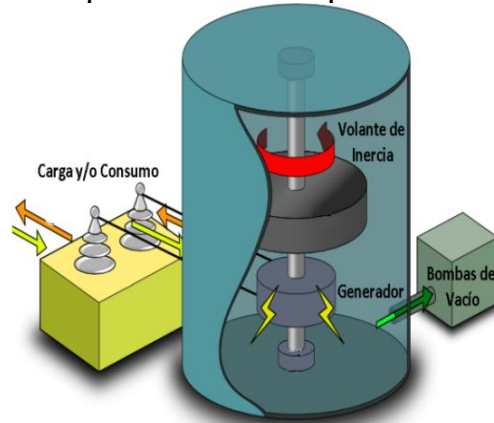
Fuente: Seminario de sistemas de almacenamiento de energía - Univalle. Calderón, J.

Hoy en día las instalaciones más comunes de CAES van desde los 35MW hasta los 300 MW con una eficiencia entre 70% y 80% (Vázquez, Lukic, Galvan, Franquelo, & Carrasco, 2010). Tienen la ventaja de poder utilizarse con sistemas a gran escala y poseer periodos de almacenamiento largos debido al hecho de que las pérdidas son muy pequeñas.

1.1.3 Volante de inercia

Los volantes de inercia FES (siglas del inglés Flywheel Energy Storage), almacenan energía mediante la aceleración de un rotor (volante) a una velocidad muy alta y la energía se mantiene en el sistema como energía cinética. Cuando la energía se extrae del sistema, la velocidad de rotación del volante se reduce como consecuencia del principio de conservación de la energía. Al inyectar energía al sistema resulta en un aumento de la velocidad del volante. El sistema consiste en un rotor suspendido por rodamientos (magnéticos en los grandes sistemas) y en un recinto al vacío para reducir el rozamiento (Bolund, Bernhoff, & Leijon, 2007). En la Figura 6 se observa el esquema de almacenamiento por volante de inercia – FES (Calderón, 2021).

Figura 6. Esquema de almacenamiento por volante de inercia.



Fuente: Seminario de sistemas de almacenamiento de energía - Univalle. Calderón, J.

La velocidad de giro del volante va de 20.000 a más de 100.000 rpm en recintos al vacío. Estos volantes pueden llegar a la velocidad máxima en cuestión de minutos, mucho más rápido que algunas otras formas de almacenamiento de energía (Bai, Zhang, & Wang, 2012). La eficiencia de estos dispositivos puede llegar al 90% (Hittinger, Whitacre, & Apt, 2012). Como estrategia para disminuir las pérdidas se usan superconductores en la construcción del generador.

1.2 Almacenamiento químico

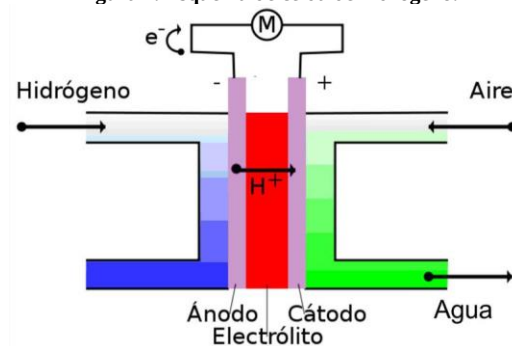
1.2.1 Hidrógeno

El hidrógeno es un combustible limpio que no emite CO_2 a la hora de su utilización y que se puede obtener desde la electrólisis o el reformado (obtención de hidrógeno a partir de gas natural, petróleo o alcoholes). El almacenamiento de energía en "forma" de Hidrógeno es equivalente a almacenar carbón o diésel, para usarlo en procesos posteriores de generación de energía. La principal ventaja del almacenamiento de hidrógeno es que cuenta con una gran densidad energética.

Uno de los usos principales del hidrógeno se da en las celdas de combustibles, las cuales se basan en el proceso de electrólisis del hidrógeno molecular y de la óxido reducción de este (produciendo moléculas de agua) para la generación de energía eléctrica.

El sistema consta de tres componentes principales: en primer lugar, la electrólisis del agua para formar este hidrógeno molecular, este proceso se realiza en general mediante energía eléctrica. En segundo lugar, los tanques de hidrógeno, en los cuales se almacena el hidrógeno molecular producido mediante electrólisis del agua, y en tercer lugar, la celda de hidrógeno, en donde se hace reaccionar (mediante intercambio protónico) el hidrógeno molecular con oxígeno molecular, generando energía, y produciendo agua. En la Figura 7 se presenta el esquema de las celdas de hidrógeno.

Figura 7. Esquema de celda de hidrógeno.



Fuente: Seminario de almacenamiento de energía. Ospina, B.

1.3 Almacenamiento eléctrico

1.3.1 Super condensadores

Este tipo de almacenamiento se basa en el uso de capacitores para almacenar energía en forma de campo eléctrico. Su funcionamiento es el mismo que cualquier capacitor regular usado en electrónica, se basa en almacenar cargas electrostáticas para formar un campo eléctrico, y así almacenar la energía.

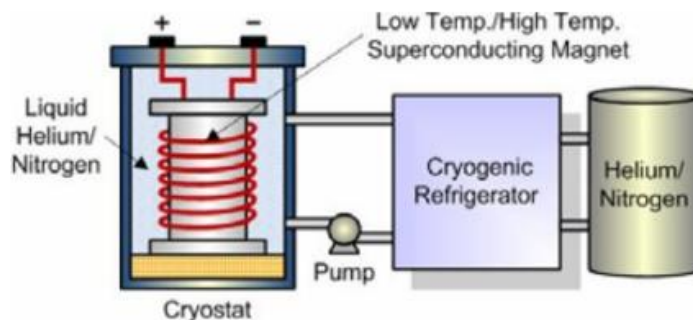
Existen diferentes tipos de supercondensadores, que se clasifican según su construcción, los principales son capacitores electroquímicos de doble capa (ECDL), que funcionan a través de electrodos de carbón activado, sumergidos en un electrolito líquido. Además, existen pseudo capacitores, contruidos con metales y polímeros, y capacitores híbridos, que tienen tanto características electroquímicas como electroestáticas.

1.3.2 Super conductores eléctricos

Los super conductores eléctricos SMES (siglas del inglés Superconducting Magnetic Energy Storage), son una tecnología que se centra en el almacenamiento energético mediante campo magnético creado por una bobina superconductora por la que fluye corriente continua.

La energía eléctrica puede liberarse del sistema cuando sea necesario y el sistema cuenta con un inversor que permite transformar la corriente en alterna y continua. Para mantener muy baja resistencia, la bobina debe mantenerse por debajo de una temperatura critica, alrededor de 4 K, empleando para ello Helio o Nitrógeno líquido. La baja temperatura hace que las perdidas resistivas sean insignificantes y se mantiene el estado superconductor de la bobina.

Figura 8. Esquema de almacenamiento de energía térmica.



Fuente: Energystoragesense.

Este sistema permite operar a densidades energéticas muy altas y una eficiencia del 90%, además la energía puede ser almacenada en periodos de tiempo prácticamente indefinidos, dado que las pérdidas de conducción son mínimas; empleándose en almacenamiento de elevadas potencias.

1.4 Almacenamiento térmico

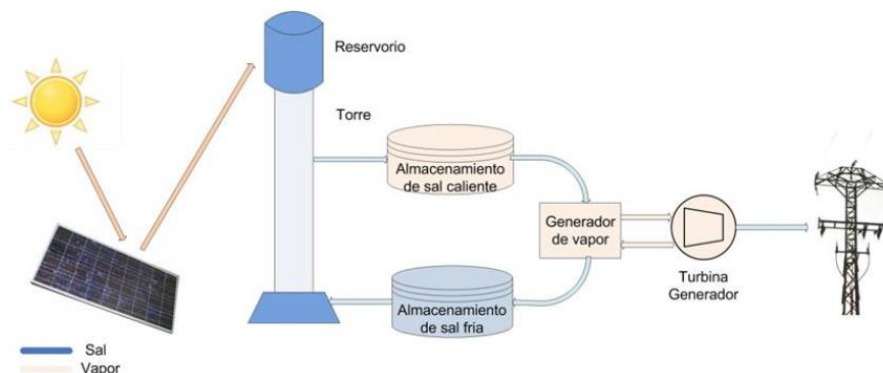
1.4.1 Sales fundidas

Este tipo de tecnologías aprovecha la reversibilidad de los procesos termodinámicos y termoquímicos para almacenar y transferir energía en forma de calor, calentando distintos materiales a temperaturas extremas, y almacenando estos en recipientes térmicamente aislados, para luego usar ese calor para generar electricidad.

En general, la energía para almacenar se obtiene mediante concentradores de energía solar y se utiliza para calentar sales a temperaturas más altas que su punto de fusión, almacenándose en estado líquido. Debido a esto, las plantas de almacenamiento térmico permiten continuidad de abastecimiento energético independiente de las horas de radiación solar directa, con autonomías del orden de 18 horas continuas.

En la Figura 9 se presenta el esquema de un sistema de almacenamiento de energía térmica TES (Guacaneme, Velasco, & Trujillo, 2013).

Figura 9. Esquema de almacenamiento de energía térmica.



Fuente: Revisión de las Características de Sistemas de Almacenamiento de Energía para Aplicaciones en Micro Redes. Guacaneme, J.; Velasco, D.; Trujillo, C.

1.5 Almacenamiento electroquímico

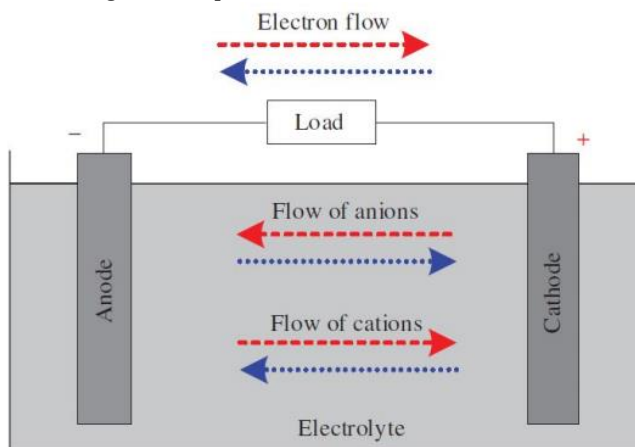
1.5.1 Baterías secundarias

Los sistemas de almacenamiento en base a baterías recargables (secundarias) denominados BESS (siglas del inglés Battery Energy Storage Systems) corresponden a celdas electroquímicas que aprovechan el proceso de oxidoreducción para generar energía eléctrica. Cada celda consiste en un ánodo y un cátodo, formados por distintos metales con distintas propiedades electroquímicas sumergidos en soluciones acuosas ácidas (electrolito), unidos a través de un conductor.

Una batería está constituida por la conexión eléctrica de varias unidades (celdas) en serie o paralelo para producir mayor cantidad de energía. Es precisamente su naturaleza electroquímica lo que hace que estas baterías tengan un ciclo limitado de vida, determinado por la capacidad eléctrica de los materiales que la componen, y típicamente medido en cantidad de cargas posibles.

En la Figura 10 se presenta el esquema de una batería secundaria (Ospina, 2021).

Figura 10. Esquema de celda de batería secundaria.



Fuente: Seminario de almacenamiento de energía. Ospina, B.

Las baterías se pueden clasificar de acuerdo con los materiales utilizados para su construcción, los cuales le dan características distintas a cada tipo, las más relevantes en el mercado para el almacenamiento a gran escala objeto del presente trabajo, son las siguientes:

1.5.1.1 Plomo ácido

Estas baterías están compuestas por dos electrodos de plomo sumergidos en solución ácida. El electrodo positivo se compone de una placa de plomo recubierta por óxido de plomo (II), PbO_2 , y el electrodo negativo por plomo esponjoso, además utilizan como electrolito una disolución de ácido sulfúrico.

Las baterías de plomo-ácido son el tipo de baterías recargables más antiguas. Se consideran como una tecnología muy madura, son fáciles de instalar y poseen bajos costos debido a su fácil fabricación, además de no requerir mantenimiento (válvula regulada). Tienen varias desventajas, como su peso excesivo (ya que están hechas de plomo), su baja densidad de energía, el hecho de que no admiten sobrecargas ni descargas profundas, viendo disminuida su vida útil, y una vez desechadas, son muy contaminantes.

1.5.1.2 Níquel - Cadmio

Estas baterías utilizan un cátodo de hidróxido de níquel y un ánodo de un compuesto de cadmio. El electrolito es de hidróxido de potasio.

Sus principales ventajas son: que admiten sobrecargas (pueden seguir ‘cargándose’ a pesar de estar completamente cargadas), que pueden funcionar a altas temperaturas sin perder sus propiedades y que pueden ser descargadas completamente. Sus desventajas son que tienen una baja densidad de energía (aunque mayor que las de plomo), tienen un alto efecto memoria (pérdida de capacidad debido a cargas incompletas), son más costosas que las de plomo ácido y son muy contaminantes.

1.5.1.3 Sulfuro de Sodio

Es un tipo de batería de sal fundida construida a partir de líquido de sodio (Na) y azufre (S). Este tipo de batería tiene una alta densidad de energía, alta eficiencia de carga / descarga y un largo ciclo de vida y se fabrica a partir de materiales abundantes y de bajo costo. Sin embargo, debido a las temperaturas de funcionamiento de 300 a 350 °C y la altamente corrosiva naturaleza del polisulfuro de sodio, tales células son principalmente adecuadas para aplicaciones no móviles a gran escala, tales como el almacenamiento de energía en la red eléctrica.

1.5.1.4 Ion - Litio

Este tipo de baterías emplea como electrolito una sal de litio que consigue los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo.

Esta tecnología se ha masificado en los últimos años, debido a los avances en sus procesos de fabricación, lo que ha reducido los costos. Además, tiene una gran densidad de energía, y un ciclo de vida mayor (si es que opera en “buenas” condiciones), además, sufren mínimamente de efecto memoria. Su principal desventaja es que debe operar en temperaturas reguladas, y no se comporta bien antes descargas completas, pudiendo reducir mucho su vida útil si es que llegan a suceder.

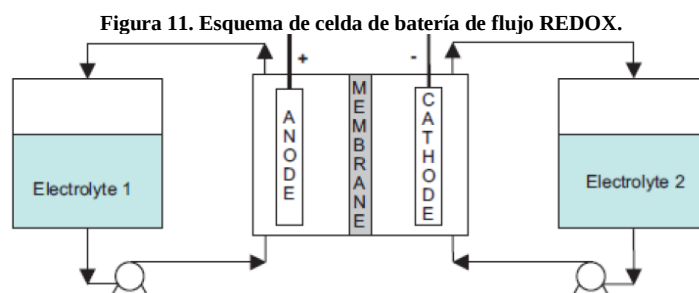
1.5.2 Baterías de flujo

Se diferencian de las baterías secundarias en que tanto el electrolito como el ánodo y el cátodo se encuentran en tanques externos a la celda, siendo bombeados desde ellos hacia la celda. Las baterías de flujo son una tecnología que aún se encuentra en desarrollo y que se desarrollan para aplicaciones de almacenamiento a gran escala.

La principal característica de las baterías de flujo es la independencia entre la capacidad de potencia y la energía que pueden manejar. La capacidad de almacenamiento depende exclusivamente de la cantidad de los electrolitos utilizados, mientras que la potencia depende del área activa de la celda.

Las reacciones que se producen son de reducción-oxidación, por lo cual también se conocen como baterías REDOX, las tecnologías de fabricación de las celdas de flujo en desarrollo son: Zinc-Bromuro, ZnBr; Reducción de Vanadio VRB; Zinc – Air, entre otros. Presentan una alta eficiencia, alta capacidad de potencia y energía, son de recarga rápida, los electrolitos no son tóxicos y pueden reemplazarse fácilmente, trabajan a bajas temperaturas y pueden tener una vida útil bastante alta. La desventaja de las baterías de flujo es la movilidad de los electrolitos y la necesidad de bombeo con su correspondiente consumo de energía.

En la Figura 11 se puede observar el esquema de una celda de batería de flujo REDOX (Bilbao, 2013).



Fuente: Dimensionamiento óptimo de sistemas de almacenamiento para centrales eólicas. Bilbao, P.

1.6 Comparación de tecnologías para almacenamiento de energía

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las características más relevantes de las tecnologías de almacenamiento de energía analizadas en el presente capítulo. La información fue recopilada de diferente literatura (Barbón, Coto, & Santos, 2018) (Bilbao, 2013) (Guacaneme, Velasco, & Trujillo, 2013) (Sanchez & Zarco, 2018), donde se realiza el estudio del estado del arte de las tecnologías existentes para sistemas de almacenamiento de energía y sus diferentes aplicaciones.

Tabla 1. Comparación de tecnologías para almacenamiento de energía.

Sistema de almacenamiento	Densidad de energía (Wh/kg)	Densidad de potencia (W/kg)	Eficiencia	Auto descarga	Vida útil	Capacidad de ciclos	Impacto ambiental
Mecánico							
Bombeo hidráulico (PHS)	0.3	-	70-85%	10-100 h ¹	30 - 50 años	2*10 ⁴ -5*10 ⁴	-
Aire comprimido (CAES)	10-30	-	60-90%	1-50 h ¹	30 - 40 años	1*10 ⁴ -3*10 ⁴	-
Volante de inercia (FES)	100-130	180-1800	90-95%	20% a 50% en 2 horas ¹	20 años	1*10 ⁵ -1*10 ⁷	-
Químico							
Hidrogeno	33.3 kWh/litro	-	40-80%	-	5-10 años	-	-
Eléctrico							
Supercondensadores	3-5	6000	95%	Hasta 5%/día Hasta 14%/ mes	8-20 años	1*10 ⁴ -1*10 ⁶	-
Térmico							
Sales fundidas	12 kWh/m ³	-	8-30%	1-15 h ¹	20-30 años	-	-
Electroquímico							
Pb - Acido	30-40	180	50-90%	3-20%/mes	5-10 años	200-1500	Muy contaminante
Ni - Cd	60-120	150	70-90%	10%/mes	8-13 años	1000-1500	Muy contaminante

¹ Corresponde al tiempo medio de descarga

Na - S	100	155	75-90%	20%/día	8-10 años	2500	Muy contaminante
Li - Ion	100-265	250-350	80-90%	0.1-0.3%/día	14-16 años	1500-3500	Muy contaminante
Baterías de flujo REDOX	80-140	80-150	65-90%	Baja o nula, en función del bombeo de electrolito	8-20 años	1000-13000	Muy contaminante

Donde:

- Densidad de energía: Cantidad de energía almacenada por unidad de peso/volumen.
- Densidad de potencia: Cantidad de potencia por unidad de peso/volumen.
- Eficiencia: Round-trip, presentada en porcentaje. Rangos se deben a valores mínimos y máximos encontrados en la literatura.
- Autodescarga: Reducción de la carga en porcentaje sin que exista conexión con un circuito externo.
- Vida útil: Estimada en años. Rangos se deben a valores mínimos y máximos encontrados en la literatura.
- Capacidad de ciclos: Cantidad que representa la vida operativa útil de la tecnología en número de ciclos carga-descarga. Rangos se deben a valores mínimos y máximos encontrados en la literatura.

En la Tabla 2 se presenta una comparación de los costos de inversión y operación asociado con cada tipo de tecnología de almacenamiento entregado por la ESA (Energy Storage Association, 2020), este es un parámetro económico muy importante a la hora de invertir, es por eso, que algunas tecnologías sólo pueden ser viables si se cumplen ciertos requisitos. Por esta razón, es importante considerar el costo total del sistema (incluyendo durabilidad de los equipos y costos en inversión) para concluir si es beneficioso o factible instalar alguna de estas tecnologías.

Tabla 2. Comparación de costos de tecnologías para almacenamiento de energía.

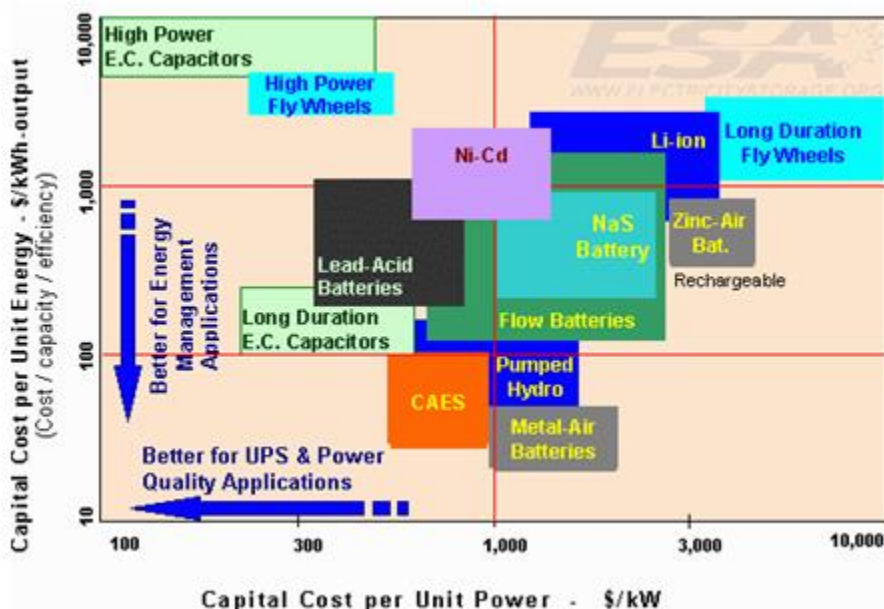
Sistema de almacenamiento	Costo de inversión (USD/kW)	Costo de operación (USD/kWh)
Mecánico		
Bombeo Hidráulico (PHS)	700-1500	80-300
Aire comprimido (CAES)	600-1000	50-100
Volante de inercia (FES)	Alta potencia: 250-650 Larga duración: 4000-10000	Alta potencia: 5000-9000 Larga duración: 1000-6000
Químico		
Hidrogeno	3200-3500	3200-3500
Eléctrico		
Supercondensadores	Alta potencia: 0-600 Larga duración: 200-700	Alta potencia: 9000-10000 Larga duración: 100-500
Térmico		
Sales fundidas	2500-4000	120-180
Electroquímico		
Pb - Acido	400-900	400-1000
Ni-Cd	800-1400	500-1000
Na-S	1000-2900	420-1000
Li-ion	1200-5000	800-5000
Baterías de flujo REDOX	1450-3700	400-1500

Donde:

- Costo inversión: representa el costo de inversión por unidad de potencia nominal, en dólares por kilowatt, de la instalación de almacenamiento.
- Costo de operación: presentado en dólares por kilowatt-año, es el costo anualizado de operación para un año de operación.

En la Figura 12 se presentan los rangos aproximados de costos para una serie de tecnologías de almacenamiento de energía. El costo de la energía fue dividido por la eficiencia de almacenamiento para obtener un costo unitario de energía útil (Energy Storage Association, 2020).

Figura 12. Costos por tecnología de almacenamiento.



Fuente: Energy Storage Association.

El ancho (horizontal) de cada bloque corresponde al costo de inversión por unidad de potencia, y el alto (vertical) al costo de operación por unidad de energía. Además, en la Figura 12, existen 2 flechas que direccionan hacia qué lado del gráfico cada tecnología es mejor. La horizontal señala hacia donde una tecnología es mejor para UPS y aplicaciones de potencia de calidad (horizontal), y la vertical para aplicaciones de manejo de energía (vertical).

1.7 Proyectos relevantes sistemas de almacenamiento BESS

A continuación, se nombrarán algunos proyectos a nivel nacional e internacional en los cuales el sistema de almacenamiento de energía mediante baterías (BESS) es pieza fundamental.

1.7.1 Proyectos a nivel nacional

En Colombia la empresa italiana Enel-Emgesa puso en servicio en el año 2020 el primer sistema de almacenamiento de energía de baterías de gran capacidad (BESS) del país, en la central térmica Termozipa de 225 MW. Este sistema tiene una potencia de 7 MW/3,9 MWh y utiliza baterías de iones de litio. El sistema de almacenamiento tuvo una inversión de aproximadamente seis millones de dólares y aporta a la central eléctrica la capacidad de reserva requerida por el sistema eléctrico colombiano, ya que aumenta su capacidad efectiva neta en 7 MW. (Fuente: Enel-Emgesa).

A través de la convocatoria UPME STR 01-2020 “Almacenamiento de Energía con Baterías “BESS” – Atlántico”, La Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME) está seleccionando un inversionista y un interventor para el diseño, adquisición de los suministros, construcción, operación y mantenimiento de sistemas de

almacenamiento de energía eléctrica con baterías en el departamento de Atlántico. El sistema de almacenamiento tendrá una capacidad máxima de entrega de 45 MW y duración mínima de entrega de una (1) hora. (Fuente: Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME).

1.7.2 Proyectos a nivel internacional

A nivel internacional el Grupo Enel está desarrollando diversos proyectos para posicionarse en el sector de los sistemas de almacenamiento de energía de baterías a escala industrial. Actualmente, ya tiene un BESS autónomo de 25 MW/12,5 MWh en Tynemouth, en el Reino Unido, y un BESS de 20 MW/11,7 MWh en conjunto con la central térmica de Litoral en España. Adicionalmente, Enel está desarrollando un portafolio de proyectos BESS en los países donde tiene presencia y está construyendo dos proyectos BESS: uno de 14 MW/8 MWh en conjunto con la central térmica de Ventanilla en Perú y otro de 10 MW/11 MWh junto con la central térmica de Torrevaldaliga en Italia. (Fuente: Enel).

La filial de Enel, Enel Green Power Alemania (EGP Alemania), la empresa alemana de energía renovable ENERTRAG y la compañía de soluciones de almacenamiento de energía con sede en Suiza Leclanché, inauguraron el sistema de almacenamiento de energía 'Cremzow batería 22MW (BESS), ubicada en Cremzow, en el estado alemán de Brandeburgo. El sistema de almacenamiento contó con una inversión total de aproximadamente 17 millones de euros y permite respaldar la estabilidad de la red eléctrica alemana al brindar servicios de regulación de frecuencia al mercado de la Reserva de Control Primario (PCR) del país.

Otra empresa líder en este sector de los sistemas de almacenamiento por baterías es TESLA, empresa que se encuentra inmersa en una multitud de proyectos de almacenamiento de energía en baterías (BESS) por todo el mundo. De entre ellos se destaca la instalación en Australia de un sistema BESS de 20 MW para apoyar la generación de una planta eólica.

Por otro lado, en Sudamérica el gobierno chileno apuesta fuertemente por las energías renovables lo que conlleva la inversión en sistemas de almacenamiento de energía. Se puede decir que Chile es uno de los países que más ha invertido en esta materia y que cuenta con multitud de ejemplos tanto en subestaciones eléctricas como en centrales de generación. Entre ellos se encuentra el sistema BESS de la subestación eléctrica de los Andes en el norte del país, capaz de entregar energía durante 15-20 minutos a la red eléctrica y la instalación de un sistema BESS en la central termoeléctrica Angamos capaz de entregar energía durante un periodo de 20 minutos (Sanchez & Zarco, 2018).

1.8 Normatividad

En la Tabla 3 se presenta la normatividad nacional e internacional aplicable a los sistemas de baterías y sistemas de almacenamiento mediante baterías (BESS).

Tabla 3. Normatividad nacional e internacional aplicable.

NORMA	TITULO	DESCRIPCIÓN
BATERIAS		
IEC 62933-2-1	Electric energy storage systems (EES systems) – Part 2-1: Unitary parameters and test methods – General specifications	Define los parámetros de unidad y los métodos de ensayo de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica (EES)
IEC 61960	Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes. Secondary lithium cells and batteries for portable applications	Especifica las pruebas de rendimiento, designaciones, marcas, dimensiones y otros requisitos para baterías y pilas individuales de litio secundarias para aplicaciones portátiles.
IEC 61960-1	Secondary lithium cells and batteries for portable applications. Secondary lithium cells	Especifica las pruebas de rendimiento, designaciones, marcas, dimensiones y otros requisitos para celdas de litio secundarias para aplicaciones portátiles.
IEC 61960-2	Secondary lithium cells and batteries for portable applications. Secondary lithium batteries	Especifica las pruebas de rendimiento, designaciones, marcas, dimensiones y otros requisitos para baterías de litio secundarias para aplicaciones portátiles.
IEC 62133-2	Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for portable sealed secondary lithium cells, and for batteries made from them,	Especifica los requisitos y pruebas para el funcionamiento seguro de equipos portátiles, pilas y baterías de litio secundarias selladas que contienen electrolito no ácido.

NORMA	TÍTULO	DESCRIPCIÓN
	for use in portable applications - Part 2: Lithium systems	
IEC 62281	Safety of primary and secondary lithium cells and batteries during transport	Especifica los métodos de prueba y los requisitos para pilas y baterías de litio secundarias (recargables) para garantizar su seguridad durante el transporte que no sea para reciclaje o eliminación.
IEC 62485-1	Safety requirements for secondary batteries and battery installations - Part 1: General safety information	Especifica los requisitos y las definiciones relativos a la seguridad, fiabilidad, esperanza de vida, resistencia mecánica, estabilidad cíclica, resistencia interna y temperatura para las baterías de plomo y Níquel-Cadmio
IEC 62485-2	Safety requirements for secondary batteries and battery installations - Part 2: Stationary batteries	Especifica los requisitos sobre aspectos de seguridad asociados al montaje, uso, inspección, mantenimiento y desecho de baterías secundarias de plomo-acido, Níquel-Cadmio y Níquel-Hidruro metálico.
IEC 62619:2017	Storage elements and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for lithium storage elements and batteries for use in industrial applications	Define requisitos y pruebas para el funcionamiento seguro de baterías y pilas de litio secundarias utilizadas en aplicaciones industriales, incluidas las aplicaciones estacionarias.
IEC 62620:2016	Accumulators and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Accumulators and lithium batteries for use in industrial applications	Especifica el marcado, las pruebas y los requisitos para celdas y baterías de litio secundario, utilizadas en aplicaciones industriales, incluidas aplicaciones estacionarias.
UL 1642	Standard of Lithium-Ion batteries	Especifica los requisitos para las baterías de litio primarias (no recargables) y secundarias (recargables).
UL 1973	Standard for batteries for use in stationary, vehicle auxiliary power and light electric rail applications	Especifica los requisitos para las baterías para su uso como almacenamiento de energía para aplicaciones estacionarias como PV, almacenamiento de turbinas eólicas, para aplicaciones de UPS o para aplicaciones ferroviarias, etc.
BESS		
CREG 098/2019		Define los mecanismos para incorporar sistemas de almacenamiento con el propósito de mitigar inconvenientes presentados por la falta o ausencia de redes de transporte de energía en el Sistema Interconectado Nacional.
CREG 074/2019		Define las exigencias de calidad de servicio para los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en cuanto a las necesidades que suplen en el STN y STR.
Acuerdo 1300 de 2020 del CNO		Condiciones técnicas para la conexión y pruebas que deben cumplir los Sistemas de Almacenamiento de Energía Eléctrica con Baterías (SAEB) antes de su entrada en operación comercial, definición y formato de reporte de los parámetros técnicos (SAEB) y requisitos de entrada en operación comercial de los SAEB.
CNO 1354/2020		Condiciones técnicas para la conexión y pruebas que deben cumplir los Sistemas de Almacenamiento de Energía Eléctrica con Baterías (SAEB) antes de su entrada en operación comercial, definición y formato de reporte de los parámetros técnicos (SAEB) y requisitos de entrada en operación comercial de los SAEB.
IEC 62933-1	Electrical energy storage (EES) systems – Part 1: Vocabulary	Define los términos de aplicación para los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica (EES), incluyendo los términos necesarios para la definición de los parámetros de la unidad, los métodos de ensayo, la planificación, la instalación la seguridad y las cuestiones ambientales.
IEC 62933-2-1	Electrical energy storage (EES) systems - Part 2-1: Unit parameters and testing methods - General specification	Define los parámetros de unidad y los métodos de ensayo de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica (EES).
IEC 62933-3-1	Electrical energy storage (EES) systems - Part 3-1: Planning and performance assessment of electrical energy storage systems - General specification	Considera las especificaciones generales para los sistemas de almacenamiento conectados a la red, considerando las funciones y capacidades necesarias, elementos y métodos de evaluación de rendimiento, requisitos para la conexión a la red y los requisitos para el intercambio de información del sistema.
IEC 62933-4-1	Electrical energy storage (EES) systems - Part 4-1: Guidance on environmental issues - General specification	Describe cuestiones medioambientales asociados con los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica (EES), y presenta directrices para abordar los impactos ambientales hacia

NORMA	TÍTULO	DESCRIPCIÓN
		y desde los sistemas EES, incluidos los impactos en los seres humanos.
IEC 62933-5-1	Electrical energy storage (EES) systems - Part 5-1: Safety considerations for grid-integrated EES systems - General specification	Especifica consideraciones de seguridad (por ejemplo, identificación de peligros, evaluación de riesgos, mitigación de riesgos) aplicable a los sistemas EES integrado con la red eléctrica.
IEC 62933-5-2	Electrical energy storage (EES) systems - Part 5-2: Safety requirements for grid-integrated EES systems - Electrochemical-based systems	Describe principalmente aspectos de seguridad para las personas y cuando corresponda, cuestiones de seguridad relacionados con el entorno y los seres vivos, para el almacenamiento de energía conectado a la red y sistemas donde se utiliza un subsistema de almacenamiento electroquímico. Esta norma de seguridad es aplicable a todo el ciclo de vida del BESS (desde el diseño hasta el final del servicio gestión de la vida).
IEEE 1375	Guide for the protection of stationary battery systems	Proporciona una guía para la protección eléctrica de baterías estacionarias. Esta guía analiza las formas de protección pasiva y activa de las baterías estacionarias con y sin conexión a tierra. Se discuten los principios generales de coordinación de los dispositivos de protección para el disparo selectivo. Los principios descritos en este documento se aplican a todas las tecnologías de baterías estacionarias. Los sistemas de protección interna, es decir, los componentes antes de los terminales de la batería, utilizados en ciertas tecnologías de batería avanzadas están fuera del alcance de este documento.
NFPA 855	Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems	Esta norma proporciona los requisitos mínimos para mitigar los peligros asociados con sistemas de almacenamiento de energía eléctrica (ESS)
UL 9540A	Standard for Energy Storage Systems and Equipment	Estándar para la seguridad de los sistemas y equipos de almacenamiento de energía

En la Tabla 4 se presenta la normativa colombiana complementaria aplicable a granjas solares fotovoltaicas interconectadas al sistema eléctrico colombiano.

Tabla 4. Normatividad nacional complementaria.

NORMA	DESCRIPCIÓN
CREG 024 de 1995	Reglamenta los aspectos comerciales del mercado mayorista de energía en el sistema interconectado nacional, que hacen parte del Reglamento de Operación.
CREG 086 de 1986	Reglamenta la actividad de generación con plantas menores de 20 MW que se encuentra conectado al Sistema Interconectado Nacional (SIN)
CREG 030 de 2018	Regula los aspectos operativos y comerciales para permitir la integración de la autogeneración a pequeña escala y de la generación distribuida al Sistema Interconectado Nacional
CREG 127 de 2018	Establecen los mecanismos para incorporar sistemas de almacenamiento en el sistema interconectado nacional.
CREG 060 de 2019	Se hacen modificaciones y adiciones transitorias al reglamento de operación para permitir la conexión y operación de plantas solares fotovoltaicas y eólicas al SIN.
NTC 2050	Norma técnica colombiana 2050, establece el Código eléctrico colombiano; el cual tiene como objetivo salvaguardar a las personas y bienes de los riesgos que pueden surgir por el uso de la electricidad, establecido procedimientos necesarios para la seguridad.
RETIE	Reglamento técnico de instalaciones eléctricas y establece los procedimientos para garantizar la seguridad de las personas, la vida animal, vegetal y la preservación del medio ambiente, previniendo, minimizando o eliminando los riesgos de origen eléctrico

CAPITULO 2. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO TIPO BESS

En el mundo, cada vez se invierte más dinero en generación de energía proveniente de fuentes renovables, especialmente en la energía solar fotovoltaica. Los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica aún no están preparados para estas condiciones de funcionamiento, con gran dependencia de la climatología, por lo cual se hace necesario un sistema que brinde apoyo a la red eléctrica en momentos críticos. Así, los sistemas de almacenamiento de energía tipo BESS resultan idóneos en esta etapa de transición energética a nivel mundial. Un sistema de almacenamiento de energía tipo BESS es un conjunto de baterías, capaces de almacenar energía de forma electroquímica y entregarla a la red cuando sea necesario. Este sistema posee uno de los niveles más altos de flexibilidad en cuanto a la respuesta de carga y descarga, además de tener altos niveles de eficiencia.

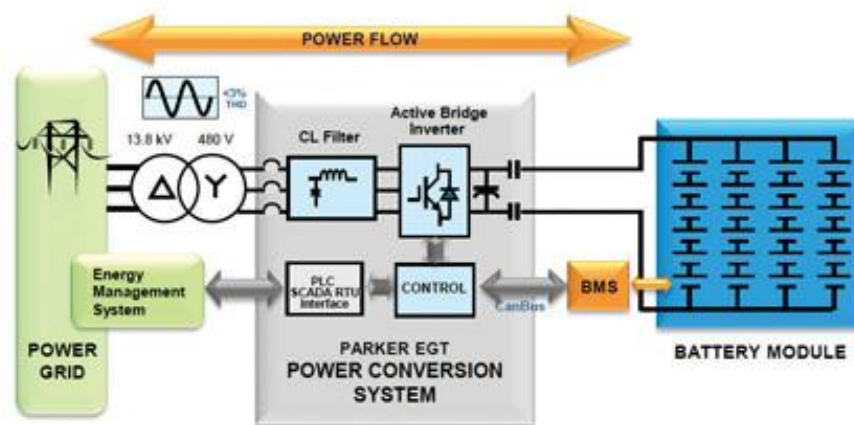
2.1 Características generales

El sistema BESS está conformado por un sistema de conversión de potencia (PCS, por sus siglas en inglés) y un sistema de monitoreo de batería (BMS), los cuales se encargan de controlar los niveles de voltajes, temperatura, tasa de carga, etc. Estos sistemas de almacenamiento por baterías no pueden ser conectados directamente a la red de alta tensión, por lo general son conectados mediante un autotransformador el cual regula la tensión a la cual se conecta el PCS, el que a su vez es protegido mediante un interruptor de media tensión en caso de fallas.

El PCS incluye un inversor bidireccional, el cual le permite operar al BESS en los cuatro cuadrantes de energía, entre sistemas de corriente directa y alterna. Durante la descarga el convertidor funciona en modo inversor y durante la carga como rectificador. También contiene un conjunto de sofisticadas protecciones las cuales se encargan de proteger el equipo.

En la Figura 13 se presenta el esquema típico de un sistema de almacenamiento tipo BESS.

Figura 13. Esquema sistema de almacenamiento tipo BESS.



Fuente: Parker Hannifin Energy Grid Tie Division.

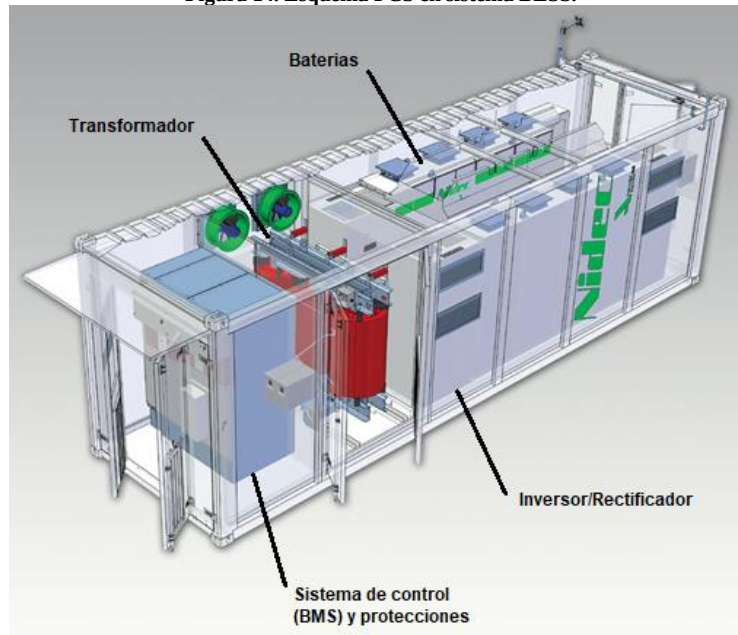
2.1.1 Baterías

Existen distintas tecnologías a la hora de elegir una batería; sin embargo, de acuerdo con la Tabla 1, en este momento las baterías de ion-litio presentan mayores ventajas técnicas y operativas, ya que admiten un gran número de ciclos de carga/descarga, tienen una gran eficiencia y una larga vida útil que unido al hecho de que las descargas internas son del orden del 0,3% diario, que las hace ideales para la aplicación en estudio (Sanchez & Zarco, 2018).

2.1.2 Sistema de control de conversión (PCS)

Se trata del sistema de conversión de potencia y de control ubicados dentro de un container, aunque también pueden estar separados dependiendo del fabricante (Sanchez & Zarco, 2018). Este sistema está basado en electrónica de potencia y su función principal es regular la transferencia de energía entre el sistema de almacenamiento de energía y la red. En la Figura 14 se presenta el esquema típico de un container de la empresa Nidec Industrial Solutions, empresa líder en el sector industrial que brinda soluciones innovadoras de sistemas y controles de potencia.

Figura 14. Esquema PCS en sistema BESS.



Fuente: Adaptado de Nidec Industrial Solutions.

2.1.2.1 Transformador

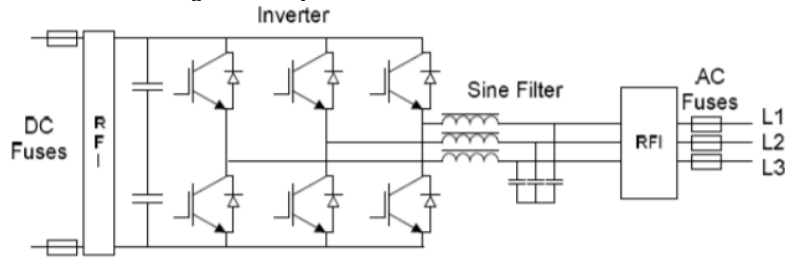
Es un transformador de potencia trifásico para elevar la tensión a la salida del inversor y realizar la interconexión con la red eléctrica. Este transformador generalmente cuenta con aislamiento en resina epóxica; sin embargo, también se usan transformadores sumergidos en aceite.

Las características del transformador elevador (número de devanados, potencia nominal, relación de tensión, etc.) se eligen de acuerdo con criterios técnicos, económicos y ambientales, pero deben ser adecuados para satisfacer las prestaciones globales requeridas por el sistema BESS. Además, el transformador debe tener características adecuadas y optimizadas para las prestaciones del PCS al que esté conectado, especialmente teniendo en cuenta los posibles efectos de calentamiento de las emisiones de espectro armónico del PCS (factor K).

2.1.2.2 Inversor

El inversor permite la conexión de las baterías, que operan en corriente continua, con la red eléctrica por la que circula corriente alterna. Permite el flujo de energía en los dos sentidos para la carga y descarga de las baterías. Una característica importante de los inversores en este tipo de sistemas es que aceptan tensiones de entrada en el lado de continua dentro de un determinado rango mientras que la tensión de salida en alterna varía entre 380 - 1500 V. Esta característica es necesaria, puesto que el voltaje en el lado de las baterías depende del estado de carga de estas (Sanchez & Zarco, 2018). En la Figura 15 se presenta el esquema de un inversor para un sistema BESS.

Figura 15. Esquema de inversor en sistema BESS.



Fuente: Aplicación y dimensionamiento de equipos de un sistema BESS en una central térmica. Sanchez, R & Zarco, P.

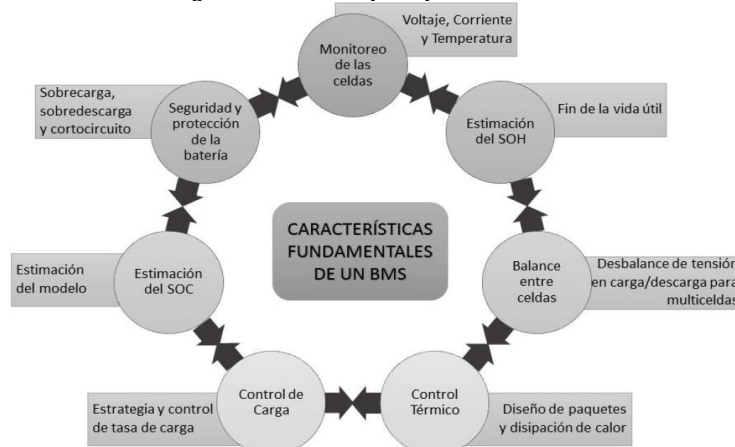
2.1.2.3 Sistema de protecciones

Engloba interruptores, transformadores de medida y relés de protección numéricos multifuncionales que se encargan de proteger al sistema cuando se detecte alguna anomalía tanto en el lado de corriente alterna como de corriente continua (Sanchez & Zarco, 2018).

2.1.3 Sistema de gestión de baterías (BMS)

Es un componente esencial compuesto por un hardware y un software que controla y monitorea todos los componentes del sistema, principalmente aspectos de carga y descarga de la batería, garantizando al mismo tiempo una operación confiable y segura. Esto implica el control de los niveles de corriente y tensión, de las condiciones de carga y descarga, de la limitación de la ventana de operación respecto al SoC (State of Charge) y/o la temperatura, de la gestión térmica, del balance en tensión entre las celdas, etc, por lo tanto, un apropiado sistema de gestión es capaz de predecir la máxima energía y potencia disponible para una conexión y desconexión segura de las baterías con el fin de mejorar su uso y por ende los costos asociados (Chaturvedi, Klein, Christensen, Ahmed, & Kojic, 2010). Un BMS usualmente contiene las características presentadas en la Figura 16, que no solo controlan las funciones de almacenamiento para optimizar la vida útil, eficiencia y seguridad del dispositivo, si no que provee una precisa estimación de los estados de la batería para la gestión energética (Rahimi-Eichi, Ojha, Baronti, & Chow, 2013).

Figura 16. Funciones principales de un BMS.



Fuente: Sistemas de gestión de baterías (BMS) y su importancia para los sistemas de almacenamiento de baterías (BESS). Rodríguez, D; Gomez, R; Campos A.

2.1.4 Controlador (SCADA)

Se encarga de asegurar el correcto funcionamiento del sistema completo. Recibe señales del BMS para ejecutar acciones según sea necesario, como activar las protecciones cuando se produce un defecto o controlar la temperatura. También, se encarga de las comunicaciones con otros sistemas ajenos al BESS, que en el caso en estudio se comunicará con la granja solar fotovoltaica. Cuenta con una interfaz gráfica en forma de SCADA que permite a los encargados de

operar el sistema visualizar todos los parámetros importantes y poder ejecutar acciones manualmente a través de él (Sanchez & Zarco, 2018).

2.2 Aplicaciones de sistemas de almacenamiento tipo BESS

(Ventura, Burgos, & Roldan, 2016) (Sanchez & Zarco, 2018) muestran un resumen de los servicios y aplicaciones que pueden prestar los sistemas de almacenamiento de energía tipo BESS.

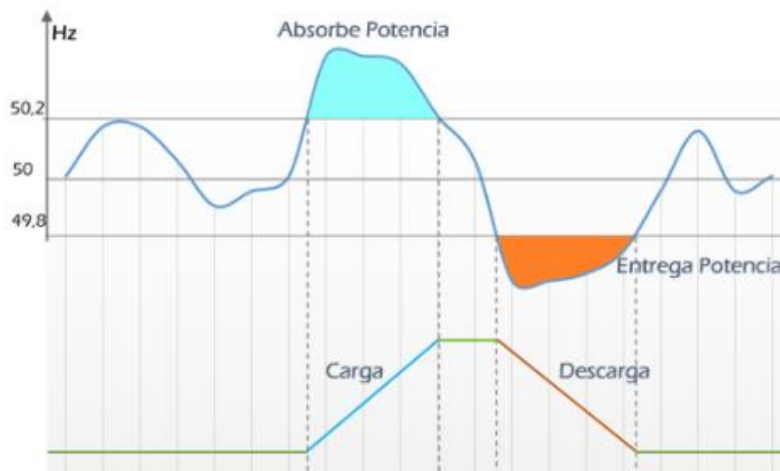
2.2.2 Generación eléctrica

2.2.2.1 Regulación de frecuencia

La frecuencia de toda red eléctrica debe mantenerse dentro de un rango determinado. Las distintas variaciones en la carga producen cambios pequeños en la frecuencia de la red, con lo que se hace necesario algún sistema que corrija estas pequeñas desviaciones. También, cuando se producen fallas en la red debido a que alguna máquina deja de generar energía por un fallo, produciendo la consiguiente caída de la frecuencia que es necesaria corregir al momento con un aporte de potencia activa.

Lo que hace ideal a este sistema para regular la frecuencia es su flexibilidad y su larga vida en cuanto a ciclos de carga/descarga se refiere, además de tardar solo unos milisegundos en funcionar una vez se haya detectado la variación de la frecuencia. En la Figura 17 se presenta un ejemplo de uso.

Figura 17. Aplicación de BESS en la regulación de frecuencia de un BMS.



Fuente: Aplicación y dimensionamiento de equipos de un sistema BESS en una central térmica. Sanchez, R & Zarco, P.

2.2.2.2 Soporte a la generación renovable

Las energías renovables, debido a su dependencia de la climatología, son muy difíciles de pronosticar y controlar, por lo que el sistema BESS sirve de apoyo cuando se prevea que alguna fuente renovable esté generando, pero por motivos climatológicos no proporcione energía. De esta manera, entra a funcionar el sistema de baterías en vez de hacer que la planta de generación encargada de realizar funciones de seguimiento entre a funcionar para contrarrestar ese déficit de energía. En la Figura 18 se observa el comportamiento de las baterías cuando realizan funciones de soporte a la generación renovable.

Figura 18. Aplicación de BESS como soporte a la generación renovable.



Fuente: Aplicación y dimensionamiento de equipos de un sistema BESS en una central térmica. Sanchez, R & Zarco, P.

2.2.2.3 Amortiguación eléctrica en centrales de generación

Este sistema permite a las viejas centrales térmicas, que cuentan con elementos mecánicos sensibles y que requieren mucho mantenimiento, no realizar labores de seguimiento de la curva de demanda eléctrica en tiempo real, para lo que no fueron diseñadas, consiguiendo un significativo ahorro en mantenimiento de elementos críticos de la central como pueden ser las turbinas o generadores. Con lo que este sistema auxiliar dotará a la planta de la flexibilidad necesaria en un sistema eléctrico cada vez más influenciado por las energías renovables.

2.2.2.4 Arranque autónomo (Black Start)

Los sistemas de almacenamiento proporcionan una reserva activa de potencia y energía en la red que puede usarse para energizar las líneas de transmisión y distribución permitiéndole a las plantas de generación conectarse después de una falla grave en la red.

Los sistemas de almacenamiento pueden suministrar alimentación inicial a las grandes plantas de generación, si el almacenamiento se encuentra convenientemente situado y hay un camino de transmisión claro desde la ubicación del sistema de almacenamiento hasta la planta de generación.

2.2.3 Transmisión eléctrica

2.2.3.1 Regulación de tensión y apoyo a subestaciones eléctricas

Una aplicación más es la de servir de respaldo en caso de emergencias o corte de energía, como por ejemplo manteniendo el funcionamiento de los servicios auxiliares de las subestaciones hasta que se arregle la falla. De la misma manera, su uso puede resultar atractivo a la hora de compensar la energía reactiva de la línea de transmisión para tener más potencia activa disponible.

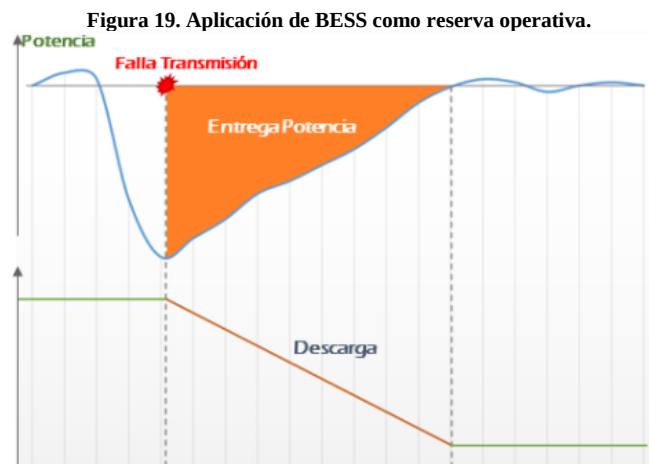
2.2.3.2 Regulación de frecuencia

La frecuencia de toda red eléctrica debe mantenerse dentro de un rango determinado. Las distintas variaciones en la carga producen cambios pequeños en la frecuencia de la red, con lo que se hace necesario algún sistema que corrija estas pequeñas desviaciones. También, cuando se producen faltas en la red debido a que alguna máquina deja de generar energía por un fallo, produciendo la consiguiente caída de la frecuencia que es necesaria corregir al momento con un aporte de potencia activa.

2.2.3.3 Reserva operativa

La reserva operativa es la capacidad de generación disponible para el operador del sistema dentro de un corto intervalo de tiempo para satisfacer la demanda en caso de que un generador se caiga o exista una interrupción del suministro.

Para proveer una reserva operativa efectiva, el sistema BESS debe mantener un mínimo nivel de carga preparado para responder en caso de que se den problemas de generación o transporte de energía. Dependiendo de la aplicación, el sistema puede responder en milisegundos o minutos y suministrar la potencia necesaria para mantener la continuidad de la red mientras el generador de apoyo empieza a generar energía, haciendo posible un uso óptimo de los generadores. También puede eliminar la necesidad de tener un generador de apoyo inactivo. La Figura 19 muestra el comportamiento del sistema BESS cuando se presenta una falla en la generación.

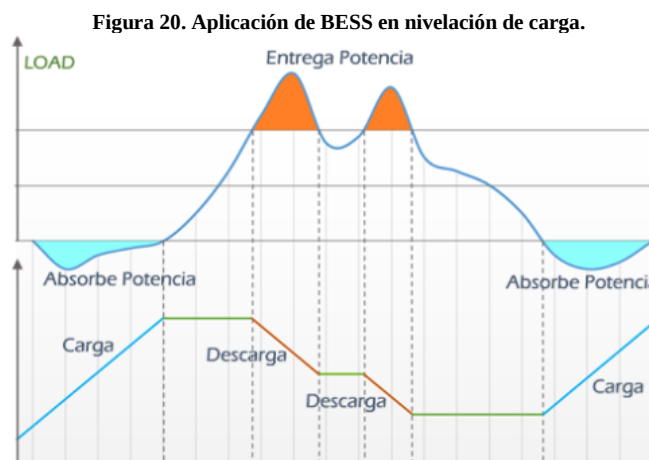


Fuente: Aplicación y dimensionamiento de equipos de un sistema BESS en una central térmica. Sanchez, R & Zarco, P.

2.2.4 Distribución eléctrica

2.2.4.1 Nivelación de carga

La nivelación de carga suele involucrar almacenamiento de energía durante períodos de poca demanda (valle) en el sistema y de entrega de energía en periodos donde la demanda es alta (punta). Durante estos períodos de alta demanda, el sistema BESS suministra potencia, reduciendo la carga de las centrales generadoras más costosas, permitiendo un ahorro. Esto permite posponer la inversión de nuevas centrales de generación para aumentar la capacidad del sistema. En la Figura 20 se observa un ejemplo de la aplicación.

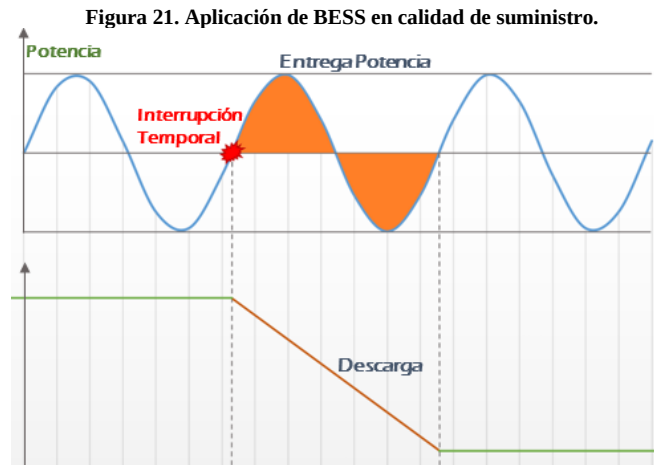


Fuente: Aplicación y dimensionamiento de equipos de un sistema BESS en una central térmica. Sanchez, R & Zarco, P.

Se puede hacer uso de la flexibilidad del sistema BESS en cuanto a su carga y descarga se refiere para comprar energía en horas donde su precio es barato, valle, y venderla cuando el precio de esta sea más caro, punta, con lo que se obtiene un beneficio. Criterios técnicos y operacionales de sistemas BESS (almacenamiento a gran escala).

2.2.4.2 Calidad del suministro

El sistema BESS ayuda a proteger las cargas aguas abajo frente a fallas de corta duración que afectan la calidad de la energía entregada. De esta manera los consumidores finales evitan cortes de suministro, con lo que no interrumpen sus operaciones. Un ejemplo de esta aplicación se presenta en la Figura 21.



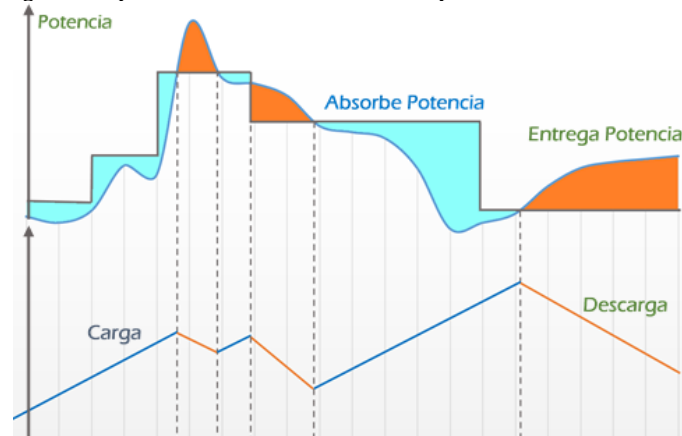
Fuente: Aplicación y dimensionamiento de equipos de un sistema BESS en una central térmica. Sanchez, R & Zarco, P.

2.2.4.3 Reducción de picos de demanda

Es un uso similar al nivelado de carga, pero su propósito es reducir el pico de demanda más que conseguir una operación más económica. El objetivo es evitar la instalación de más capacidad de generación para suministrar en las puntas de demandas. Estas instalaciones suelen ser propiedad de grandes consumidores en vez de empresas de eléctricas. Un ejemplo de su uso se encuentra en la Figura 22. Entre los beneficios se encuentran:

- La factura eléctrica de los clientes se ve reducida gracias a que la punta de demanda es más pequeña.
- Las empresas generadoras reducen el costo de generar energía durante las puntas de demandas.
- La inversión en infraestructura se ve reducida, puesto que la demanda de las cargas es más plana y las puntas de demanda son más pequeñas.

Figura 22. Aplicación de BESS en reducción de picos de demanda - Peak Shaving.



Fuente: Aplicación y dimensionamiento de equipos de un sistema BESS en una central térmica. Sanchez, R & Zarco, P.

2.3 Criterios operacionales de los componentes principales

2.3.1 Baterías de ion-litio

Son las baterías más usadas en la actualidad para almacenamiento de energía a gran escala, debido a que no requieren mantenimiento y tienen una tasa de autodescarga muy baja, tal como se presenta en la Tabla 1.

Por otro lado, estas baterías son muy delicadas y su estructura es frágil, por lo que requieren un circuito de seguridad. Este circuito limita el voltaje máximo que puede alcanzar cada celda durante la carga y también limita el voltaje mínimo de éstas durante la descarga.

A continuación, se describen los principales parámetros operacionales de las baterías de ion-litio:

Estado de carga / State Of Charge (SoC) %: Es la expresión que indica el estado de carga de la batería de manera porcentual. El estado de carga es el 100% cuando la batería tiene almacenada la máxima energía posible.

Profundidad de descarga / Depth of Discharge (DoD) %: Es la relación entre la capacidad en amperios-hora (Ah) entregada por una batería durante su descarga y la capacidad nominal de la misma. Es un parámetro alternativo al SoC para saber el estado de carga de la batería. Cuando el SoC disminuye, el DoD aumenta.

Tensión de vacío (V_0): Es la tensión que la batería tiene entre sus terminales cuando no hay ningún elemento conectado a ellos. Su valor queda determinado por las características intrínsecas de la batería.

Tensión en circuito cerrado (V): Es la tensión que aparece en los terminales de la batería cuando esta está conectada a una carga. La tensión en circuito cerrado de la batería disminuye al conectarla a una carga dependiendo de la corriente que le ceda.

Resistencia interna: Consiste en un concepto que ayuda a modelar en forma de resistencia todas las consecuencias eléctricas de las complejas relaciones químicas que se producen dentro de la batería. Al ser un concepto teórico, no se puede medir directamente de la batería, pero se puede calcular mediante los datos de corriente y voltaje medidos sobre ella. Cuando se aplica una carga a la batería, la resistencia interna de ésta se puede calcular con las ecuaciones (1) o (2):

$$R_B = \frac{V_0 - V}{I} \quad (1)$$

$$R_B = \frac{V_0}{I} - R_L \quad (2)$$

Siendo:

R_B : Resistencia interna de la batería.

V_0 : Tensión de vacío de la batería.

V : Tensión de la batería con la carga.

I : Intensidad suministrada por la batería.

La resistencia interna no es un parámetro fijo, sino que varía con la edad de la batería. La mayoría de las baterías comerciales tienen una resistencia interna del orden de 1Ω .

2.3.2 Sistema de Gestión de Baterías

Como indica (González & Trejos, 2017), para asegurar la confiabilidad y eficiencia de las baterías es necesario contar con un Sistema de Gestión de Baterías o BMS. Este sistema lleva a cabo el monitoreo de las condiciones de operación de la batería, que se basa en el cálculo de los parámetros más relevantes de la batería: el estado de carga o SoC (State of Charge) y el estado de salud o SoH (State of Health).

Esos parámetros no son medibles directamente por medio de sensores, por tanto, se deben estimar a través de algoritmos basados en modelos equivalentes de la batería. Existen diversos modelos equivalentes para representar el comportamiento de la batería y la complejidad y precisión del método de cálculo de los parámetros de diagnóstico depende en cierto grado del modelo elegido. Sin embargo, la forma de operar las variables del modelo (el algoritmo de cálculo) juega también un papel fundamental en el desempeño del sistema de gestión de baterías (Liu Henke, Scherler & Jacobitz, 2017; Trejos & Ramos-Paja, 2015).

Es importante mencionar que el monitoreo constante del voltaje de celda, de cada celda en un rack de baterías, es esencial para determinar la salud del rack en general. Todas las celdas tienen una ventana de voltaje de operación en la que debe realizarse el proceso de carga/descarga para asegurar el funcionamiento apropiado y la vida útil de la batería (Jeon, Yun & Bae, 2015; Jin Park, Young Choi & Young Kim, 2014).

La combinación de estas mediciones con los datos del modelo de la batería, la temperatura y la información del envejecimiento, mejora la precisión de los parámetros de la misma. Dependiendo de los algoritmos elegidos, se obtendrán diferentes niveles de lectura y estimación del rendimiento del sistema (Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS, 2013).

2.3.2.1 Estado de Carga - SoC

El estado de carga se define como la relación entre la capacidad actual de la batería Q_a y la capacidad nominal Q_n (Young, 2013), tal y como se expresa en la ecuación (3).

$$SoC = \frac{Q_a}{Q_n} \quad (3)$$

Existen diversos métodos para calcular el SoC, tales como los de medida directa, que son aquellos en los cuales se utilizan propiedades físicas de la batería, como el voltaje o la impedancia. En esta categoría se destaca el método de espectroscopia de impedancia electroquímica (Lasia, 2002). Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). Los métodos de estimación por conteo utilizan la integración en el tiempo de corrientes de carga y descarga inyectadas a la batería; a esta categoría pertenecen métodos como el contador de Coulomb y su versión mejorada. Por su parte, los sistemas adaptativos utilizan métodos matemáticos avanzados para ajustarse automáticamente a los cambios del sistema y aproximar el SoC para diferentes condiciones de operación. A esta categoría pertenecen métodos como redes neuronales, lógica difusa y filtros de Kalman. Finalmente, los sistemas híbridos combinan métodos de las categorías mencionadas anteriormente, para beneficiarse de las ventajas de cada método (Trejos & Ramos-Paja, 2015).

2.3.2.2 Estado de salud - SoH

El estado de salud se define como la relación de la capacidad máxima instantánea entregable por la batería en un momento $t - Q_{\max}(t)$ y su capacidad cuando la batería estaba nueva Q_{nuevo} (Juang, Kollmeyer & Jahns, 2012). La ecuación (4) expresa la relación a través de la cual se calcula el SoH. Por tanto, este parámetro es un indicador del nivel de degradación del desempeño de la batería, indica su envejecimiento y sirve para estimar su tiempo de vida restante (Juang, 2010; Trejos & Ramos-Paja, 2015).

$$SoH = \frac{Q_{\max}(t)}{Q_{\text{nuevo}}} \quad (4)$$

2.3.2.3 Equilibrio de celdas

Las celdas se pueden conectar en serie y paralelo para formar un rack de baterías. Una conexión en paralelo aumenta la corriente total de la batería, mientras que una conexión en serie aumenta el voltaje total (Danilov, Lyedovskikh & Notten, 2011), (Yun, Yeo & Park, 2013); en general las condiciones de la carga definen los requerimientos de conexión de las celdas (Berdichevsky, Kelty, Straubel & Toomre, 2006; Ci, Lin & Wu, 2016; Lee & Drury, 2013).

Debido a las diferencias de material, fabricación y temperatura, estas celdas no se cargan o descargan en la misma proporción. Como consecuencia, su voltaje diferirá en el tiempo, esto conlleva a que cualquier celda se aproxime al límite de descarga y disminuya la capacidad de todo el sistema. Los circuitos de equilibrio de celdas igualan los niveles

variables de voltaje de cada celda para restaurar la capacidad de la batería diseñada inicialmente; esto presenta como resultado una configuración distribuida en un rack de baterías (Dewey, Chandler & Tamura, 1995), (Roderick, 2015), (Yun, Yeo & Park, 2013).

Existen diferentes técnicas de equilibrio de celdas que difieren en la eficiencia energética, el esfuerzo físico y el espacio de la tarjeta electrónica (Kauer, Narayanaswamy, & Steinhorst 2017; Juang, 2010; Räber, Abdeslam & Heinzlmann, 2017).

2.3.2.4 Temperatura

Las mediciones de temperatura se usan no solo para evitar incendios y/o deterioro de las baterías garantizando un sistema de almacenamiento confiable, sino también, para determinar si es deseable cargar o descargar una batería en tiempos específicos (Ashdown & Tullius, 1998), (Gepp, Filimon & Koffel, 2015), (Roderick, 2015).

Los sensores de temperatura monitorean cada celda de los sistemas de almacenamiento de energía. Los termistores son alimentados por una referencia de voltaje interna que se usa comúnmente para monitorear la temperatura de cada circuito. De esta forma, una referencia interna contribuye a reducir las imprecisiones de la lectura de temperatura frente a los cambios de temperatura externa (Hui Chang, Jie Huang, Pang Huang & Shi Lu, 2010), (Lu, Wei & Pour, 2017), (Chin Wang, Je Lu, & Yi Tsai, 2013), (Chin Wang, Je Lu, & Yi Tsai, 2014).

2.3.3 Sistema de conversión de potencia

El sistema de conversión de potencia (Power Conversion System), es el dispositivo intermediario entre el sistema de almacenamiento por baterías y la red eléctrica, este dispositivo de conversión de potencia es bidireccional, permitiendo que la energía de la red sea convertida a corriente continua para cargar las baterías de forma controlada o permitiendo que la energía almacenada en las baterías se "invierta" a corriente alterna para alimentar la red.

El corazón del PCS es un inversor que contiene una serie de semiconductores de potencia denominados IGBT (transistores bipolares de puerta aislada), capaces de conmutar alta potencia a altas velocidades. Dentro del inversor, los semiconductores de potencia se informan cuando encender y apagar mediante controladores secuenciados que son coordinados por un algoritmo interno, impulsados por entradas de un sistema de supervisión. Otros elementos que componen un PCS son responsables de conectar físicamente a la red y al elemento de almacenamiento, así como para protección, detección, calidad de energía y seguridad. Dado que el PCS suele estar operativo las 24 horas del día, los 7 días de la semana y en un rango de condiciones ambientales potencialmente extremas, generalmente se incluye un sistema de gestión térmica para el monitoreo de los inversores y sus componentes auxiliares, así como un sistema de refrigeración HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning).

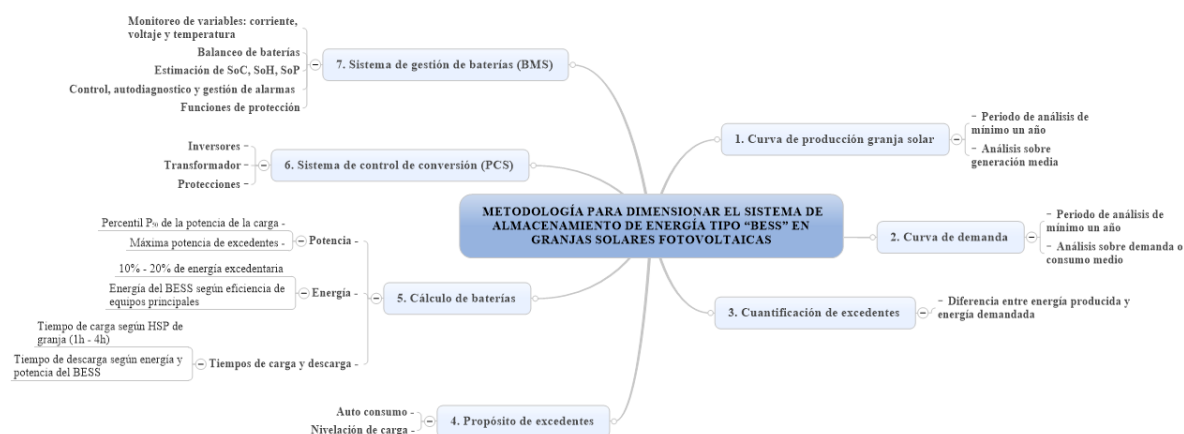
Dada la naturaleza en el funcionamiento de este dispositivo, gran parte del diseño debe incluir medidas para reducir los armónicos, así mismo, la onda de salida debe ser lo más cercana a una onda senoidal pura.

El PCS debe poder sincronizarse con la frecuencia de la red, responder a las condiciones cambiantes del sistema, proporcionando energía a una velocidad de rampa controlada, inyectar energía rápidamente para corregir las fluctuaciones de frecuencia a corto plazo, tener capacidad de controlar dinámicamente el factor de potencia, suministrando a la red la cantidad de potencia activa o reactiva bajo demanda.

CAPITULO 3. METODOLOGÍA PARA DIMENSIONAR EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TIPO “BESS” EN GRANJAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

En el presente capítulo se define una metodología para dimensionar el sistema de almacenamiento de energía tipo “BESS” que permita aprovechar los excesos de energía en granjas solares fotovoltaicas interconectadas con potencia entre 1 MW y 19,9 MW (sin sistema de almacenamiento), considerando la disponibilidad del recurso y la variación de la demanda; tal como se presenta en la Figura 23.

Figura 23. Metodología para el dimensionamiento del sistema tipo BESS en granjas solares.

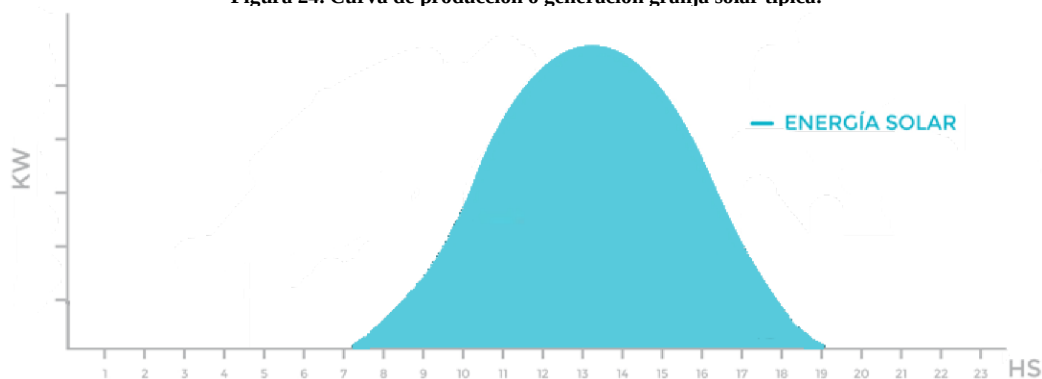


3.1 Curva de producción

La curva de producción o generación es la representación gráfica de como varia la generación eléctrica de la instalación fotovoltaica en el transcurso del tiempo, los intervalos de tiempo de esta curva son generalmente horarios. Es importante tener presente que la generación fotovoltaica no es constante en el periodo de tiempo analizado, ya que depende directamente del recurso solar (radiación); por lo tanto, para este tipo de instalaciones se debe considerar en los análisis la generación media para un periodo de tiempo de mínimo un año.

En la Figura 24 se presenta una curva de producción o generación típica de una granja solar con intervalos de tiempo horario.

Figura 24. Curva de producción o generación granja solar típica.

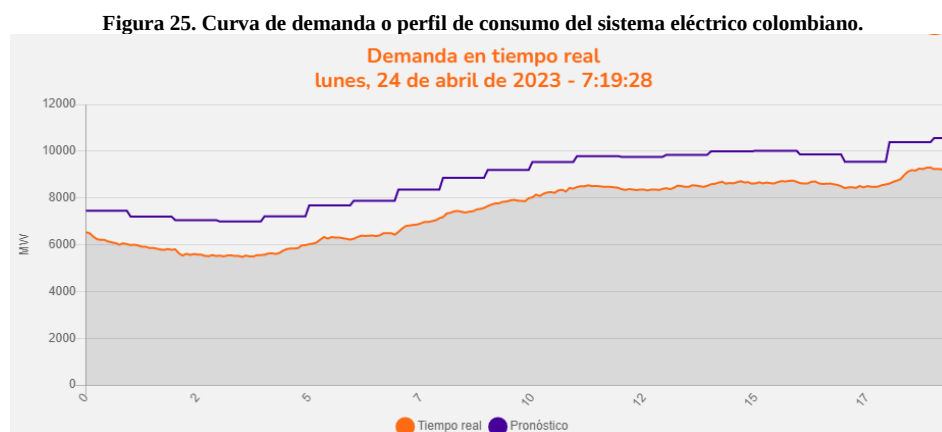


Fuente: Impacto de la relación de consumo y demanda. RIC Energy.

3.2 Curva de demanda

La curva de demanda o perfil de consumo es una representación gráfica de como varia la demanda o carga eléctrica en el transcurso del tiempo, los intervalos de tiempo de esta curva pueden ser horarios, diarios, semanales, mensuales o anuales; sin embargo, para un análisis estadístico optimo se recomienda que el intervalo de tiempo sea horario dentro de un periodo de análisis de mínimo un año. Es importante tener presente que la carga no es constante en el periodo de tiempo analizado; por lo tanto, se deben considerar los consumos medios.

En la Figura 25 se presenta la curva de demanda o perfil de consumo del sistema eléctrico colombiano en la segunda semana del mes de febrero del año 2007.



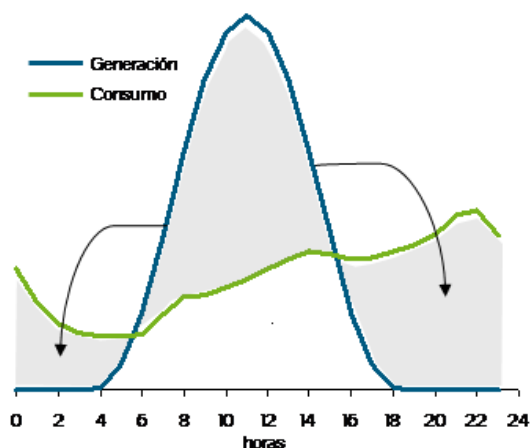
Fuente: Características del sistema eléctrico colombiano. XM.

3.3 Cuantificación de excedentes

Se denomina excedente energético a la cantidad de energía que produce una granja solar fotovoltaica que se exporta a la red y que no se consume o almacena. En algunas granjas solares los excedentes energéticos pueden ser cantidades de energía que no se producen por restricciones operativas de la granja o del sistema eléctrico. Este excedente se puede perder (no se produce), se puede almacenar en baterías para un uso futuro o se puede entregar a la red eléctrica.

Una vez determinada el perfil de demanda y la curva de producción de la granja solar se realiza una representación gráfica entre ambas curvas con el fin de cuantificar los excedentes de energía, tal como se muestra en la Figura 26.

Figura 26. Curva de demanda vs Curva de producción.



Fuente: Autoconsumo y balance neto. Energía y Sociedad.

Como se presenta en la Figura 26, los excedentes de energía serán la diferencia entre la energía solar fotovoltaica generada y la energía consumida por la carga o entregada a la red.

3.4 Propósito de excedentes

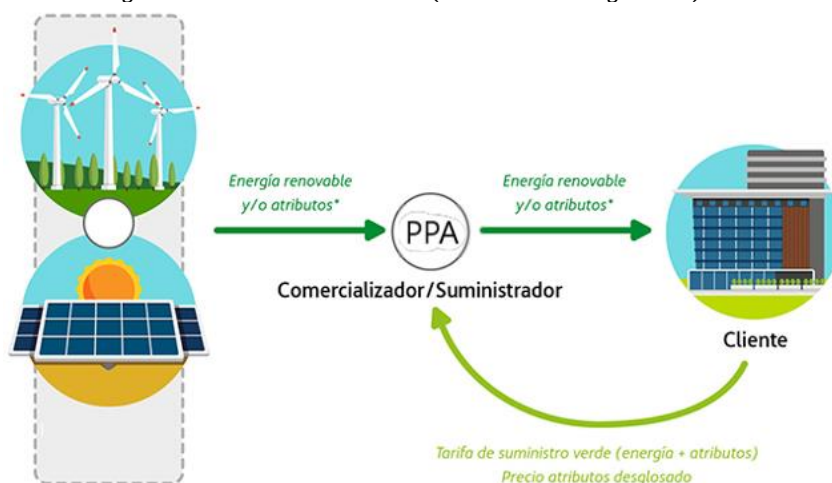
Como se indica en el apartado 2.2 del presente documento, los excedentes energéticos se pueden almacenar para ser usados en diferentes servicios; sin embargo, en el presente documento se considera el almacenamiento de los excedentes energéticos para propósito de autoconsumo y/o nivelación de carga, basados en la regulación de Colombia para plantas no despachadas centralmente, según la resolución CREG 086 de 1996 “*Por la cual se reglamenta la actividad de generación con plantas menores de 20 MW que se encuentra conectado al Sistema Interconectado Nacional (SIN)*”.

3.4.1 Autoconsumo

El propósito principal es el almacenamiento de energía con el fin de suplir la propia demanda en los periodos de baja generación, especialmente en horas nocturnas donde la generación solar es nula. Este tipo de solución es posible desarrollarla en granjas solares interconectadas que además cuenten con conexión de carga directa, generalmente industrial (carga dedicada).

En la actualidad en el mercado eléctrico colombiano, las granjas solares interconectadas que cuentan con cargas dedicadas realizan contratos de compraventa de energía denominados PPA (Power Purchase Agreement). Un PPA es un tipo de contrato de compraventa que le permite a los grandes consumidores adquirir la energía eléctrica a un precio mucho más bajo que el estándar del mercado, mediante una negociación de tarifa a largo plazo. Estos PPA’s se logran mediante plantas de autogeneración construidas por el suministrador o comercializador donde el cliente o consumidor no realiza inversión alguna, mediante el PPA se provee la energía por un tiempo negociado, a un costo que representa una importante disminución en el gasto y, además, con el beneficio de que el cliente será dueño de la planta al finalizar el contrato. En la Figura 27 se representa el modelo de contrato PPA.

Figura 27. Modelo de contrato PPA (Power Purchase Agreement).



Fuente: Adaptado de Acciona.

3.4.2 Nivelación de carga

Como se indica en el apartado 2.2.4.1, la nivelación de carga suele involucrar almacenamiento de energía durante periodos de poca demanda (valle) en el sistema y de entrega de energía en periodos donde la demanda es alta (punta); por lo tanto, se puede hacer uso de la flexibilidad del sistema de almacenamiento por baterías tipo BESS en cuanto a su carga y descarga se refiere, para almacenar los excedentes de energía en horas solares pico y venderlos a la red eléctrica cuando el precio de esta sea más caro, con lo que se obtiene un beneficio.

3.5 Cálculo de baterías

3.5.1 Potencia de la batería

La potencia de la batería (Watts o Vatios) (P_{BESS}) es la cantidad de energía eléctrica entregada o absorbida por la batería en un momento o instante de tiempo determinado.

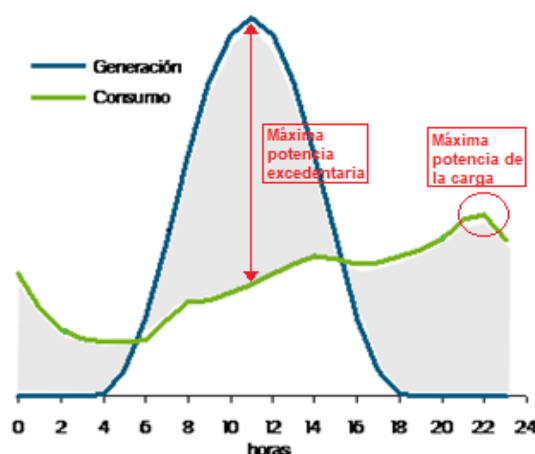
Para el cálculo de la potencia de la batería para el sistema de almacenamiento tipo BESS se debe considerar lo siguiente:

- Potencia de excedentes; una vez cuantificado los excedentes, se debe determinar la potencia media y máxima de los excedentes que se podrán almacenar en la batería y que deberá ser capaz de absorber o entregar la batería en un instante de tiempo determinado.
- Potencia de la carga; corresponde la potencias media o máxima consumida por la carga en un instante de tiempo determinado.

Una vez calculada la potencia de los excedentes y la carga, se determina mediante un análisis estadístico la potencia optima del sistema de almacenamiento tipo BESS; en este análisis se deberá tener en cuenta lo siguiente:

- Si se requiere captar la totalidad de los excedentes de una granja solar fotovoltaica con carga conectada directamente, se deberá considerar la máxima potencia excedentaria entregada a la red, esto con el fin de que la batería esté en condiciones de captar la máxima potencia entregada por la granja solar fotovoltaica al sistema eléctrico interconectado (excedentes), durante un instante de tiempo determinado.
- Si se quiere garantizar el autoconsumo de la carga conectada directamente a la granja solar fotovoltaica a través del sistema de almacenamiento tipo BESS, se debe determinar mediante percentiles la potencia optima de la batería, se recomienda considerar el percentil 50 – P_{50} (garantiza el autoconsumo para la potencia media de la carga) o la máxima potencia media de la carga (garantiza el autoconsumo en cualquier rango de potencia media de la carga), tal y como se muestra en la Figura 28.

Figura 28. Cálculo de potencia de la batería de sistemas BESS.



Fuente: Adaptado de Autoconsumo y balance neto. *Energía y Sociedad*.

En caso de granjas solares fotovoltaicas interconectadas que no cuenten con conexión directa de carga y que cuenten con limitación de potencia en sus inversores (ajuste en el sistema de inversores para no exceder la potencia de generación ajustada y declarada ante el operador de la red); la potencia de la batería podrá calcularse

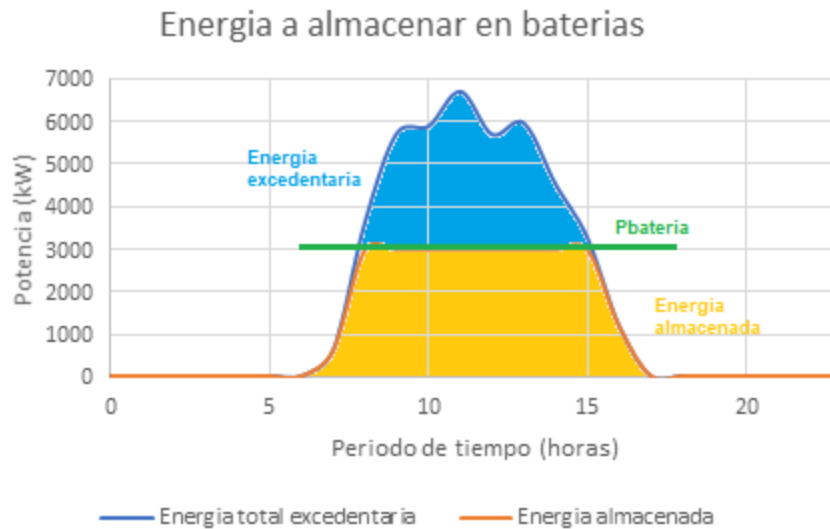
como la diferencia entre la potencia nominal de la granja y la potencia máxima entregada según el ajuste de los inversores.

3.5.2 Energía de la batería

La energía acumulada en una batería (Watts por hora - Wh) representa la capacidad de la batería de entregar una determinada potencia a lo largo de un periodo o espacio de tiempo determinado.

Una vez determinada la potencia de la batería (P_{BESS}) es necesario determinar la máxima energía diaria a almacenarse en la batería (E_{imax}); para determinar esta energía se analiza cada periodo de tiempo, según el registro de datos (diario u horario) teniendo en cuenta los excedentes entregados a la red, es decir, una vez se determine la potencia P de la batería, esta empezará a almacenar energía en los periodos de tiempo donde la potencia generada por la granja solar sea mayor a la potencia consumida por la carga, hasta valores instantáneos de P , tal como se muestra en la Figura 29. Si la potencia generada por la granja solar fotovoltaica en determinados periodos de tiempo es mayor a la potencia de la batería P , esta será considerada energía excedentaria no almacenada.

Figura 29. Cálculo de la energía a almacenar en sistemas BESS.



En caso de granjas solares fotovoltaicas interconectadas que no cuenten con conexión directa de carga y que cuenten con limitación de potencia en sus inversores; la energía almacenada (E_{imax}) será la sumatoria de potencias durante el periodo de tiempo analizado (generalmente 24 horas) donde la potencia generada sea mayor a la potencia entregada a la red y declarada ante el operador del mercado.

Para determinar la energía óptima a almacenarse en la batería (E_i) se realiza un análisis estadístico mediante percentiles de la energía excedentaria almacenable a la potencia P_{BESS} durante todo el tiempo de análisis, se recomienda considerar el percentil P_{50} , ya que garantiza el almacenamiento medio de los excedentes de la granja solar. Una vez determinado el percentil P_{50} de la energía excedentaria se realiza un análisis de sensibilidad para determinar el porcentaje de energía que se desea almacenar en el sistema de almacenamiento teniendo en cuenta variables como: espacio físico disponible para instalación del sistema de almacenamiento, disponibilidad de punto de conexión, potencia y energía para fabricación del sistema de almacenamiento y costo del sistema de almacenamiento. Considerando las variables antes indicadas, típicamente para sistemas de almacenamiento a gran escala con propósitos de autoconsumo, se recomienda almacenar entre el 10% y el 20% de la energía excedentaria media disponible en la granja solar fotovoltaica, con el fin de lograr su amortización durante el periodo de vida útil del sistema de almacenamiento tipo BESS.

Una vez determinada la energía a almacenar en las baterías (E_i), para determinar la Energía del final sistema de almacenamiento (E_f) se deben tener en cuenta factores como eficiencia de componentes principales, profundidad de descarga de las baterías, degradación del sistema de almacenamiento tipo BESS durante la vida útil del proyecto, de acuerdo con la Ecuación (5).

$$E_f = \frac{E_i}{DoD * \eta_{PCS} * \eta_{TRF} * \eta_{LT} * \eta_{BAT}} \quad (5)$$

Donde:

E_f = Energía final del sistema de almacenamiento tipo BESS

DoD = Profundidad de descarga de las baterías (para baterías de ion de litio se considera un valor de 95%).

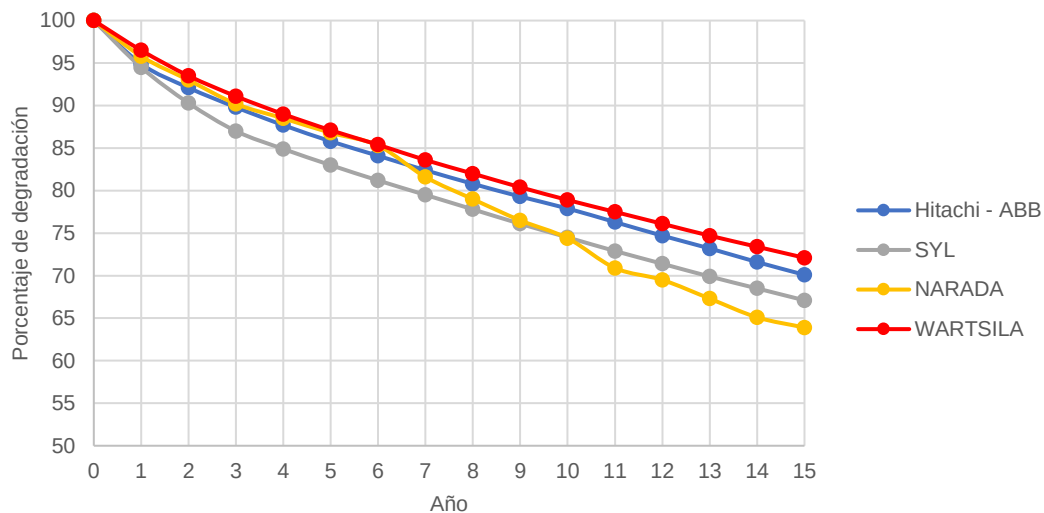
η_{PCS} = Eficiencia del sistema de conversión de potencia. La eficiencia del PCS varía en función de la potencia consumida por la carga, para sistemas de almacenamiento donde se entrega la potencia nominal, estos equipos presentan eficiencias por encima del 98%.

η_{TRF} = Eficiencia del transformador de potencia. Los transformadores son máquinas eléctricas muy eficientes, con un porcentaje de eficiencia alrededor de 99% según su diseño.

η_{LT} = Eficiencia de la red de transmisión hasta el punto de conexión. La eficiencia de las redes eléctricas dependerá de la potencia a transportar y la distancia al punto de conexión.

η_{BAT} = Eficiencia del sistema de almacenamiento tipo BESS al final de la vida útil del proyecto. En caso de considerar el reemplazo de baterías durante la vida útil del proyecto se debe tener presente que la eficiencia final será mayor. En la Figura 30 se muestra la degradación de sistemas de almacenamiento tipo BESS para los principales fabricantes del mercado.

Figura 30. Degradación de sistemas de almacenamiento tipo BESS.



Para mantener la energía óptima a almacenarse en la batería (E_i) durante la vida útil del proyecto (generalmente 15 años para este tipo de proyectos), se puede realizar generalmente de dos formas; mediante el dimensionamiento de un sistema de almacenamiento con una energía final (E_f) desde el año 0 o considerando el reemplazo de cierto porcentaje de baterías a lo largo de la vida útil de las mismas, según su curva de degradación, lo cual permite dimensionar el sistema de almacenamiento con una energía final (E_f) menor pero con costos adicionales asociados a los reemplazos de baterías.

Una vez determinada la potencia y energía requeridas por la batería es necesario buscar la solución comercial que mejor se ajuste a los requerimientos particulares del proyecto, para esto es importante determinar la cantidad de módulos necesarios apoyándose en soluciones de fabricantes de baterías para almacenamiento a gran escala como Narada, CATL (ABB), Huawei, entre otros.

3.5.3 Tiempos de carga y descarga de la batería

Para los sistemas de almacenamiento tipo BESS los tiempos de carga y descarga de las baterías dependerán de la cantidad de excesos a almacenar según la curva de producción de la granja solar fotovoltaica (energía a almacenar disponible), de la potencia entregada por la batería durante un periodo de tiempo determinado y de condiciones de operación específicas como tasa de potencia de carga y tasa de potencia de descarga respectivamente.

En la actualidad los tiempos de carga de las baterías de sistemas de almacenamiento tipo BESS para granjas solares fotovoltaicas se calculan teniendo en cuenta las horas solares pico (HSP) de la granja solar fotovoltaica, ya que son los periodos de máxima generación donde se cuenta con mayor cantidad de energía excedentaria disponible. Es así como los tiempos de carga de las baterías para sistemas de almacenamiento tipo BESS a gran escala (≥ 1 MWh) pueden estar entre 1 y 4 horas, según las horas solares pico del proyecto y según las condiciones de fabricación del sistema.

Los tiempos de descarga de las baterías en sistemas de almacenamiento tipo BESS varían según la potencia de la batería, la energía almacenada y la tasa de descarga del sistema. Actualmente para sistemas de almacenamiento tipo BESS a gran escala, los principales fabricantes presentan soluciones comerciales con tiempos de descarga entre 0.5 horas y 4 horas.

El tiempo de descarga del sistema de almacenamiento tipo BESS está dado como el cociente entre la energía total almacenada en el sistema de almacenamiento y la potencia nominal de dicho sistema a entregar por la batería en cada periodo de tiempo determinado.

$$t_d = \frac{E_f}{P_{BESS}} \quad (6)$$

Donde:

t_d = Tiempo de descarga del sistema BESS

E_f = Energía final del sistema BESS

P_{BESS} = Potencia nominal de la batería

3.6 Sistema de control de conversión (PCS)

3.6.1 Inversor

El inversor permite la conexión de las baterías que operan en corriente continua con la red eléctrica que opera en corriente alterna, además debe permitir el flujo de energía en ambos sentidos (operación en los 4 cuadrantes) con el fin de permitir la carga y descarga de las baterías.

Una característica importante de los inversores en este tipo de sistemas es que debe ser modular según la potencia final del arreglo; a continuación, se describen las características más relevantes que se deben tener en cuenta para la selección del inversor:

- *Voltaje de operación de corriente continua*, este voltaje generalmente es ajustable hasta un máximo de 1500 Vcc.
- *Voltaje de operación de corriente alterna*, para sistemas de almacenamiento a gran escala el voltaje de corriente alterna generalmente se especifica entre 600 Vac y 800 Vac.

- *Potencia*, según sea la potencia total del sistema de almacenamiento se deben seleccionar la cantidad de módulos necesarios; para sistemas de almacenamiento a gran escala se recomiendan módulos por encima de 200 kW para reducir costos de instalación mejorar eficiencia y lograr redundancia del sistema.

Generalmente la flexibilidad del inversor permite que se pueda trabajar en un rango amplio de operación, en donde se cambien las variables de voltaje de entrada, voltaje de salida, temperatura y factor de potencia. Lo anterior quiere decir que en caso de que se trabaje por debajo de la temperatura ambiente, la capacidad de potencia del inversor puede aumentar. De manera similar, si se baja el voltaje de entrada o salida, la capacidad del inversor es mayor.

Dentro de la filosofía de operación de los PCS, generalmente se debe contar con un módulo de cabecera, en donde se realiza el control y agrupación de conexiones AC. Un módulo de cabecera puede tener hasta 3 módulos de potencia, con lo cual, un tren de PCS (1 cabecera + 3 módulos de potencia), se denomina tren o estación de PCS.

Una vez determinados los requerimientos de potencia y energía de las baterías se debe determinar la solución comercial que mejor se ajuste a los requerimientos particulares determinados para el inversor, para ello es importante determinar la cantidad de racks de baterías y su mejor agrupación apoyándose en soluciones de fabricantes como GPTech, Power Electronics, Huawei, entre otros.

3.6.2 Transformador de potencia

Es un transformador de potencia trifásico para elevar la tensión a la salida del inversor y realizar la interconexión con la red eléctrica. Este transformador generalmente cuenta con aislamiento en resina epóxica; sin embargo, también se usan transformadores sumergidos en aceite.

A continuación, se describen las características más relevantes que se deben tener en cuenta para la selección del transformador.

- Voltaje nominal de operación primaria (según el voltaje del punto de conexión).
- Voltaje nominal de operación secundaria (según el voltaje seleccionado para los inversores, usualmente entre 600 Vac y 800 Vac).
- Potencia, según el arreglo de inversores definido.
- Numero de devanados, (Se pueden usar bidevanados o tridevanados según la solución a implementar)
- Tipo de aplicación, se debe tener en cuenta que estos transformadores son de rectificación, por lo tanto, es importante considerar en el diseño el factor K (usualmente se usa K-4).
- Grupo de conexión.
- Calentamiento (factor K).
- Clase de aislamiento.

3.6.3 Esquema de protección del sistema de almacenamiento

Para sistemas de almacenamiento a gran escala el sistema de protecciones está basado en relés numéricos multifuncionales los cuales operan directamente sobre el interruptor principal para conectar y desconectar el sistema de almacenamiento según sea la condición de operación, este sistema de protecciones generalmente se instala en el punto de conexión a la red (generalmente media tensión) y cuenta con funciones de protección de sobrecarga (ANSI 49), sobre corriente de fases y tierra (ANSI 50/5, 50N/51N), sobre tensión (ANSI 59) y sub tensión (ANSI 57).

3.7 Sistema de gestión de baterías (BMS)

El sistema de gestión de las baterías (BMS, por sus siglas en inglés) es un componente esencial de los sistemas BESS compuesto por un hardware y un software cuya finalidad es monitorear las variables principales y a su vez controlar la carga y descarga de las baterías con el fin de garantizar una operación confiable y segura.

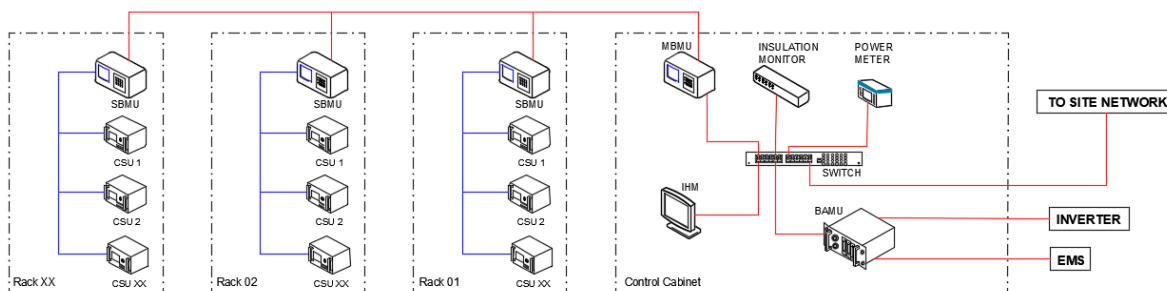
Dentro de las principales funciones del BMS se debe considerar el ajuste o configuración del sistema con el fin de determinar los momentos de conexión y desconexión del sistema de almacenamiento tipo BESS según sea la curva de producción de la granja solar fotovoltaica, esto con el fin de garantizar que el sistema de almacenamiento aproveche los excesos de energía provenientes de la granja solar y no se generen importaciones provenientes de la red.

Para sistemas de almacenamiento tipo BESS a gran escala, los fabricantes cuentan con algoritmos de desarrollo propio que permiten una operación segura de dichos sistemas. Para el objetivo propuesto en el presente trabajo se considera que el sistema de gestión óptimo para los sistemas de almacenamiento por baterías tipo BESS en granjas solares fotovoltaicas entre 1 MW y 19.9 MW debe realizar como mínimo las siguientes funciones:

- Monitoreo de temperatura ambiente.
- Monitoreo del voltaje de cada batería o celda.
- Monitoreo de la corriente de cada batería o celda.
- Monitoreo del voltaje del rack de baterías.
- Monitoreo de la corriente del rack de baterías.
- Monitoreo del estado de aislamiento del sistema.
- Balance de celdas.
- Autodiagnóstico y reporte.
- Gestión de alarmas.
- Estimación del SoC (Estado de carga)
- Estimación del SoH (Estado de salud)
- Estimación del SoP (Estado de potencia)
- IHM o controlador
- Comunicación con dispositivos a nivel superior.
- Protecciones de sobrecarga, sobretensión, sobrecorriente, sobre y bajo voltaje, falla a tierra.
- Control del sistema de refrigeración.
- Desconexión de emergencia.

En la Figura 31 se presenta el esquema de control y comunicaciones típico de los sistemas de gestión de baterías tipo BESS con cada uno de los racks y el sistema de control principal.

Figura 31. Esquema de control tipo de BMS para BESS.



CAPITULO 4. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TIPO “BESS” PARA UNA GRANJA SOLAR FOTOVOLTAICA INTERCONECTADA

En el presente capítulo se implementará la metodología definida en el capítulo 3, con el fin de dimensionar el sistema de almacenamiento de energía tipo “BESS” que permita aprovechar los excesos de energía en una granja solar fotovoltaica de 9.9 MW, interconectada a la red, que no cuente con sistema de almacenamiento y la cual alimenta una carga o cliente industrial.

4.1 Características técnicas de la granja solar

La granja solar a la cual se le dimensionará el sistema de almacenamiento de energía tipo BESS se encuentra localizada en Colombia, tiene una capacidad instalada de 12499 kWp (DC) – 9900 kW (AC) y se encuentra interconectada con el Sistema Interconectado Nacional - SIN a través de una subestación de 34.5 kV, a su vez esta granja solar abastece un cliente industrial de la zona. En la Figura 32 se presenta la disposición y ubicación de la granja solar y en la Figura 33 y Figura 34 se presentan los diagramas unifilares.

Figura 32. Ubicación y disposición de la granja solar.



La granja solar cuenta con un sistema de supervisión, control y medida que le permite contar con la información y las herramientas necesarias para tomar las medidas y atender los requisitos que requiere el Centro Nacional de Despacho (CND) en cumplimiento con el Código de Redes y el Código de Operación promulgado por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y que a su vez cumplan con los requerimientos establecidos por el operador de red (OR) de la zona.

Figura 33. Diagrama unifilar granja solar

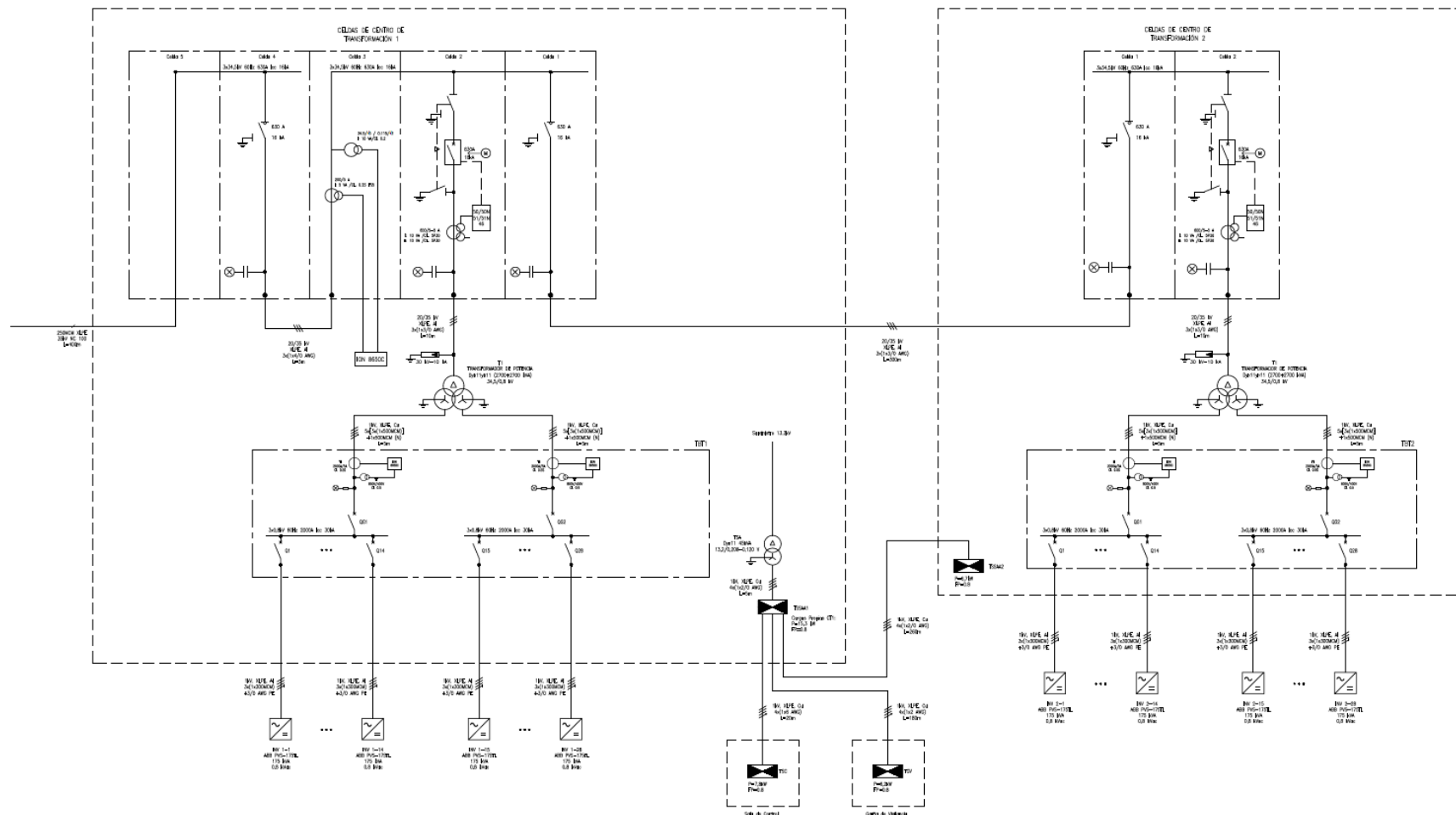
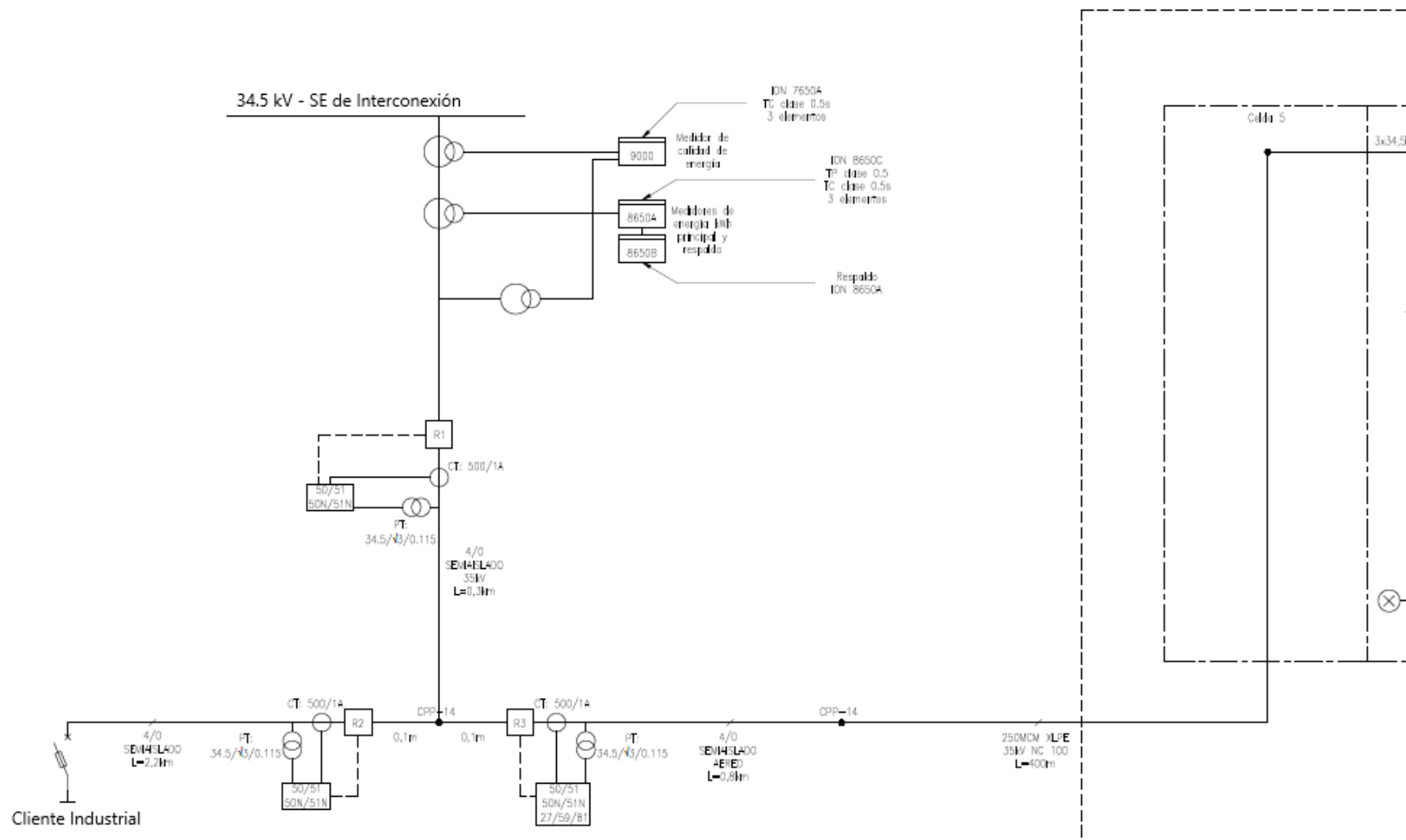


Figura 34. Diagrama unifilar de interconexión granja solar



La granja solar cuenta con dos centros de transformación, cada uno con una potencia nominal de 5400 kVA a los cuales se conectan 37876 paneles solares, cada uno con una potencia nominal de 330 kWp y 58 inversores, cada uno con una potencia nominal de 175 kW ac. En la Tabla 5 se presentan las características eléctricas generales de la granja solar

Tabla 5. Características eléctricas generales en la granja solar.

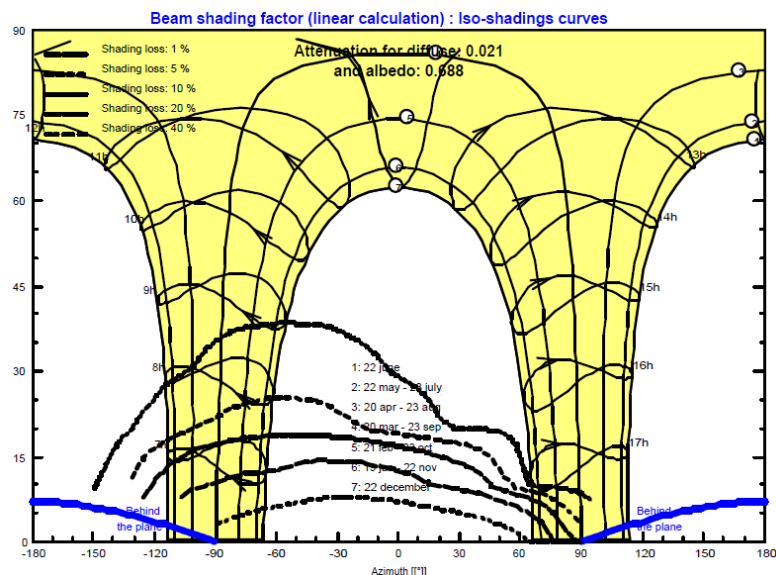
Parámetros	Unidad	Valor
Potencia solar Instalada (DC)	kWp	12499
Potencia solar Instalada (AC)	kWp	9900
Voltaje de interconexión	kV	34.5
Número de paneles	-	37876
Potencia nominal de panel solar (DC)	kWp	330
Número de inversores	-	58
Potencia nominal de inversores (AC)	kW	175

Según los diseños de la granja solar, se tiene una producción estimada de 20.5 GWh/año, una producción específica de 1.64 MWh/MWp/año y un coeficiente de rendimiento (PR) de 80.23%. En la Tabla 6 y la Figura 35 se presenta la radiación solar anual de diseño de la granja solar fotovoltaica.

Tabla 6. Radiación solar promedio en la granja fotovoltaica.

Mes	Radiación Horizontal Global	Radiación Horizontal Difusa	Radiación Global incidente en el plano de los paneles	Radiación Global incidente en el plano de los paneles Corregida con IAM y sombras
	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²
Enero	173,7	75,7	182,5	170,8
Febrero	159,5	76,4	164,5	154,2
Marzo	172,4	90,7	173,6	162,4
Abril	163,5	80,7	160,6	150,0
Mayo	171,0	77,5	164,5	153,4
Junio	163,6	70,7	155,5	144,9
Julio	177,2	73,2	169,3	158,1
Agosto	179,6	80,1	175,2	163,9
Septiembre	175,5	79,5	175,0	163,9
Octubre	176,4	79,6	180,8	169,3
Noviembre	160,1	73,8	167,7	156,5
Diciembre	165,8	73,3	175,0	163,9
Año	2038,3	931,19	2044	1911,3

Figura 35. Diagrama de radicación de la granja solar.

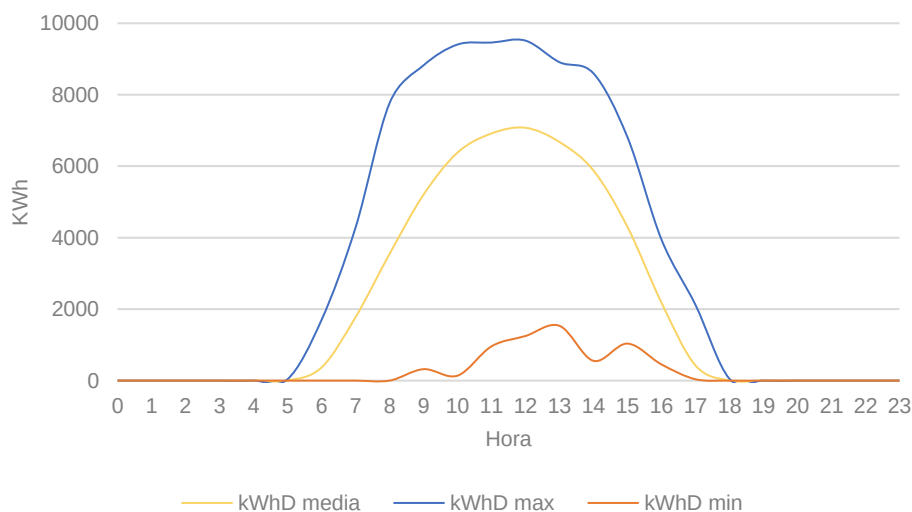


4.2 Curvas de producción de la granja solar

En la Figura 36 se presenta la curva de producción mínima, media y máxima de la granja solar fotovoltaica. Los 8784 datos analizados corresponden a un periodo de 366 días entre el 10/09/2020 y 10/09/2021, con una frecuencia de registro horaria; en el periodo analizado se enmarca la presencia del fenómeno de la niña durante gran parte del periodo, según lo indicado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2021).

Los datos analizados fueron tomados de los medidores tarifarios marca SCHNEIDER, referencia ION8650C que permiten el registro de potencia activa y reactiva en los cuatro cuadrantes, es decir, permiten el registro de potencia activa y reactiva entregada y/o recibida de la red. Como se muestra en los diagramas unifilares, los medidores se encuentran ubicados en la salida de la granja solar y en la llegada a la subestación de interconexión a 34,5 kV. Los medidores se encontraban calibrados y certificados por el operador de red al momento de descargar los datos.

Figura 36. Curva de producción de la granja solar.



En la Tabla 7 se presentan los datos de generación mínima, media y máxima de la granja solar fotovoltaica, los periodos horarios que no se presentan en la tabla corresponden a periodos nocturnos donde no se presentó generación.

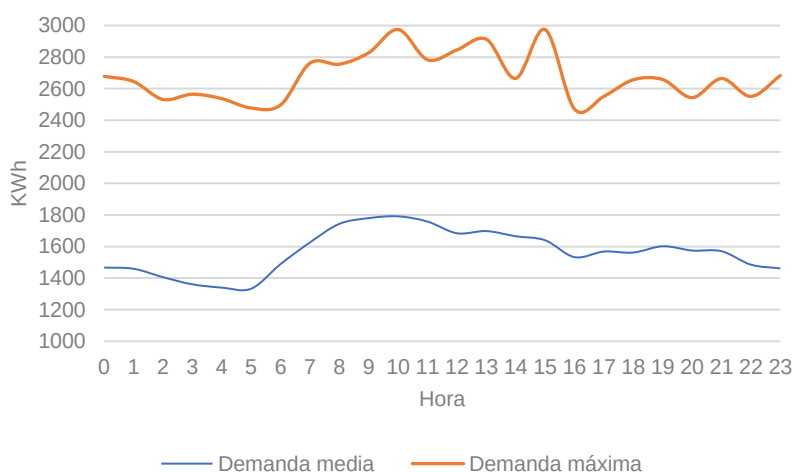
Tabla 7. Datos de generación de la granja fotovoltaica.

Hora	5	6	7	8	9	10	11
kWh media	2,73	366,26	1772,68	3542,62	5201,05	6380,63	6916,25
kWh max	37,50	1694,88	4279,34	7761,43	8821,94	9405,01	9459,99
kWh min	-	-	-	-	319,94	138,04	958,60
Hora	12	13	14	15	16	17	18
kWh media	7075,21	6676,97	5878,68	4300,12	2180,00	423,24	1,35
kWh max	9513,94	8910,58	8596,45	6809,14	3946,43	2118,30	50,75
kWh min	1248,24	1533,12	552,61	1035,53	452,32	37,87	-

4.3 Curva de demanda

En la Figura 37 se presenta la curva de demanda o curva de consumo del cliente industrial conectado a la granja solar a 34.5 kV. Los 8784 datos analizados corresponden a un periodo de 366 días entre el 10/09/2020 y 10/09/2021, con una frecuencia de registro horaria.

Figura 37. Curva de consumo cliente industrial.



En la Tabla 8 se presentan los datos de consumo medio y máximo de la carga industrial conectada a 34,5 kV de la granja solar fotovoltaica.

Tabla 8. Datos de consumo medio y máximo cliente industrial.

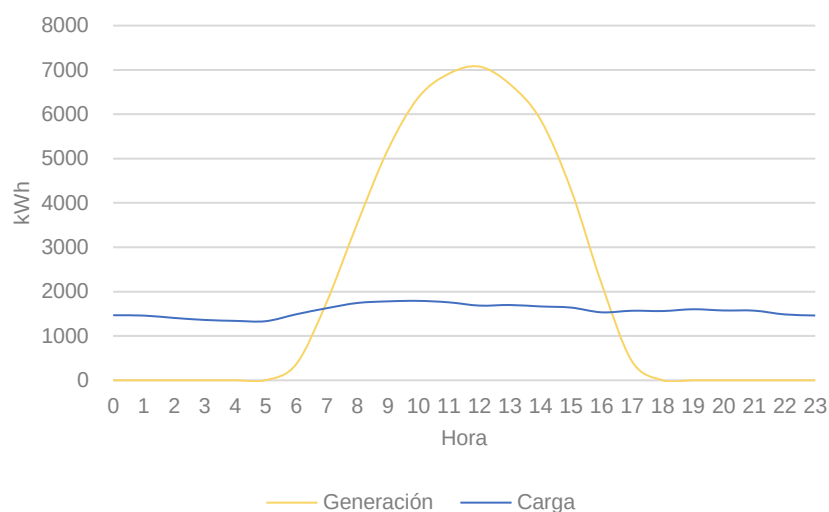
Hora	0	1	2	3	4	5	6	7
kWh media	1466,84	1459,35	1406,27	1360,88	1340,12	1332,94	1488,73	1626,11
kWh max	2678,48	2645,61	2531,85	2564,85	2537,03	2477,49	2496,57	2761,52

Hora	8	9	10	11	12	13	14	15
kWh media	1743,73	1780,04	1791,33	1758,12	1684,38	1697,99	1665,34	1639,82
kWh max	2755,09	2827,71	2975,08	2783,05	2845,49	2913,30	2665,20	2974,77
Hora	16	17	18	19	20	21	22	23
kWh media	1532,79	1568,40	1561,93	1602,06	1574,79	1570,46	1485,35	1461,51
kWh max	2470,68	2551,48	2656,69	2658,04	2543,07	2664,45	2551,33	2683,19

4.4 Cuantificación de excedentes

Para cuantificar los excedentes de energía se realiza la representación gráfica entre las curvas de producción media de la granja solar y la curva de demanda o consumo medio de la carga industrial, tal como se muestra en la Figura 38.

Figura 38. Cuantificación de excesos medios de energía.



Posteriormente se procede a calcular los excedentes de energía como la diferencia entre la generación y el consumo medios; en la Tabla 9 se presentan los excedentes medios de energía.

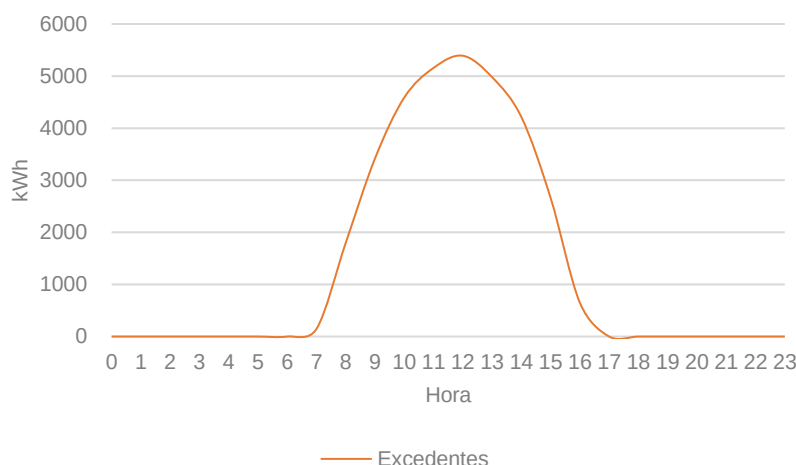
Tabla 9. Excedentes de energía.

Hora	0	1	2	3	4	5	6	7
Generación (kWh)	-	-	-	-	-	2,73	366,26	1772,68
Consumo (kWh)	1466,84	1459,35	1406,27	1360,88	1340,12	1332,94	1488,73	1626,11
Excedentes (kWh)	-	-	-	-	-	-	-	146,57
Hora	8	9	10	11	12	13	14	15
Generación (kWh)	3542,62	5201,05	6380,63	6916,25	7075,21	6676,97	5878,68	4300,12
Consumo (kWh)	1743,73	1780,04	1791,33	1758,12	1684,38	1697,99	1665,34	1639,82
Excedentes (kWh)	1798,89	3421,01	4589,30	5158,13	5390,83	4978,98	4213,34	2660,30

Hora	16	17	18	19	20	21	22	23
Generación (kWh)	2180,00	423,24	1,35	-	-	-	-	-
Consumo (kWh)	1532,79	1568,40	1561,93	1602,06	1574,79	1570,46	1485,35	1461,51
Excedentes (kWh)	647,21	-	-	-	-	-	-	-

En la Figura 39 se muestra la curva de excesos medios de energía.

Figura 39. Curva de excesos medios de energía.



Teniendo en cuenta que la granja solar en horas nocturnas no genera energía eléctrica, la carga industrial debe importar energía de la red eléctrica para su operación; a su vez, la interconexión de la granja solar con la red eléctrica permite que los excesos de energía sean inyectados o entregados a la red en las horas de máxima generación (generalmente las horas solares pico – HSP). En la Tabla 10 se muestra un resumen con los valores medios de generación de la granja solar, consumo de la carga industrial, excedentes de energía entregados a la red y la energía importada de la red.

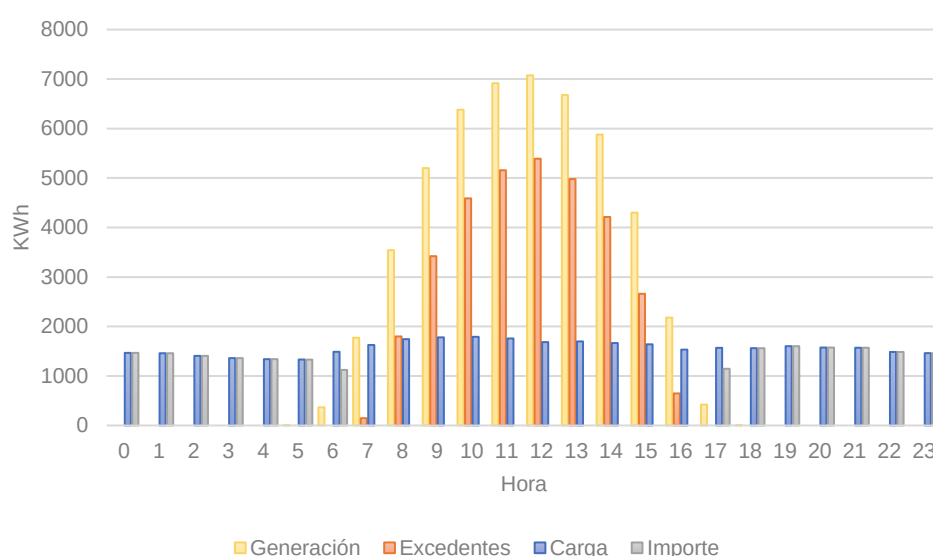
Tabla 10. Resumen de variables.

Hora	0	1	2	3	4	5	6	7
Generación (kWh)	-	-	-	-	-	2,73	366,26	1772,68
Consumo (kWh)	1466,84	1459,35	1406,27	1360,88	1340,12	1332,94	1488,73	1626,11
Excedentes (kWh)	-	-	-	-	-	-	-	146,57
Importe (kWh)	1466,84	1459,35	1406,27	1360,88	1340,12	1330,21	1122,47	-
Hora	8	9	10	11	12	13	14	15
Generación (kWh)	3542,62	5201,05	6380,63	6916,25	7075,21	6676,97	5878,68	4300,12
Consumo (kWh)	1743,73	1780,04	1791,33	1758,12	1684,38	1697,99	1665,34	1639,82
Excedentes (kWh)	1798,89	3421,01	4589,30	5158,13	5390,83	4978,98	4213,34	2660,30
Importe (kWh)	-	-	-	-	-	-	-	-

Hora	16	17	18	19	20	21	22	23
Generación (kWh)	2180,00	423,24	1,35	-	-	-	-	-
Consumo (kWh)	1532,79	1568,40	1561,93	1602,06	1574,79	1570,46	1485,35	1461,51
Excedentes (kWh)	647,21	-	-	-	-	-	-	-
Importe (kWh)	-	1145,16	1560,58	1602,06	1574,79	1570,46	1485,35	1461,51

En la Figura 40 se presenta un resumen con las curvas de generación media de la granja solar, excedentes de energía medios entregados a la red, consumo medio de carga industrial e importación media de energía para operación de la carga industrial.

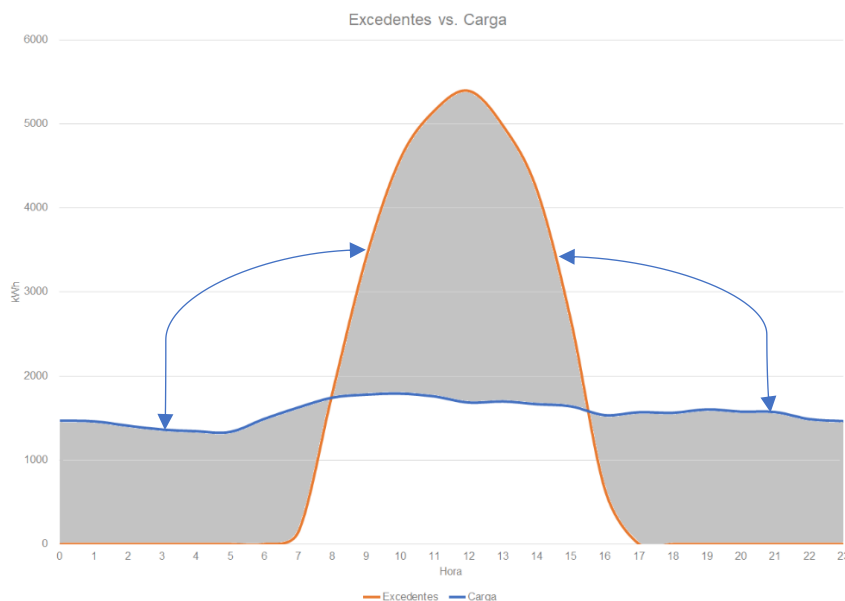
Figura 40. Resumen de variables.



4.5 Propósito de excedentes

Como se muestra en la Figura 40 y en la Tabla 10, los excedentes medios de energía de la granja fotovoltaica en las horas solares pico alcanzan potencias instantáneas de hasta 5,39 MWh, una energía media diaria excedentaria de 33 MWh/día y una energía anual excedentaria de aproximadamente 12,39 GWh/año. Así mismo, en la Tabla 8 se muestra que el consumo medio y máximo de la carga industrial es aproximadamente 1,57 MWh y 2,98 MWh respectivamente. Teniendo en cuenta la disposición de interconexión de la granja solar con la red según la Figura 34 y lo indicado en el apartado 3.4, los excedentes de energía se aprovecharán para autoconsumo de la carga industrial en horas nocturnas, tal como se presenta en la Figura 41.

Figura 41. Propósito de excedentes de energía



4.6 Cálculo de baterías

4.6.1 Potencia de la batería

Para calcular la potencia de la batería según el propósito de los excedentes indicado en el apartado 4.5, se procede a calcular la potencia óptima del sistema de almacenamiento tipo BESS, mediante un análisis estadístico de las potencias de los excedentes y de la carga.

- Potencia de excedentes

Se calcula la potencia media y media máxima de los excedentes según los datos de la Tabla 10.

$P_{media} = 3300 \text{ kW}$, potencia media diaria entre las horas donde se generan excedentes de energía.

$P_{media_max} = 5390 \text{ kW}$, potencia media máxima diaria entre las horas donde se generan excedentes de energía.

- Potencia de la carga

Se calcula la potencia media, media máxima de la carga según los datos de la Tabla 10; adicionalmente se determina el percentil 50 de la potencia de la carga durante el periodo de análisis.

$P_{media} = 1567 \text{ kW}$, potencia media diaria de la carga

$P_{max_media} = 1791 \text{ kW}$, potencia media máxima entre las horas donde se generan excedentes de energía.

$P_{50} = 1893 \text{ kW}$, percentil 50 de la potencia de la carga en el periodo de análisis.

Una vez calculadas las potencias de los excedentes y de la carga industrial, y considerando que el propósito del sistema de almacenamiento tipo BESS se realizará para autoconsumo de la carga industrial, se determina como potencia óptima de la batería el percentil P_{50} de la potencia instantánea de la carga industrial en el periodo de análisis, ya que con esta potencia se garantiza el abastecimiento de la carga industrial desde el sistema tipo BESS en horas nocturnas y se lograría almacenar el 47% de los excedentes de energía anuales de la granja solar fotovoltaica.

Para efectos comerciales y constructivos del sistema de almacenamiento, se determina que la potencia optima del sistema de almacenamiento tipo BESS será:

$$P_{BESS} = 1893 \text{ kW} \approx 2000 \text{ kW}$$

4.6.2 Energía de la batería

Una vez determinada la potencia de la batería (P_{BESS}) se determina la energía diaria a almacenarse en la batería (E_i), para lo cual se analiza cada periodo de tiempo y en aquellos donde los excedentes sean menores o iguales a P_{BESS} serán almacenados en el sistema de almacenamiento tipo BESS; los excedentes mayores a P_{BESS} serán considerados energía excedentaria no almacenada, tal y como se muestra en la Figura 42.

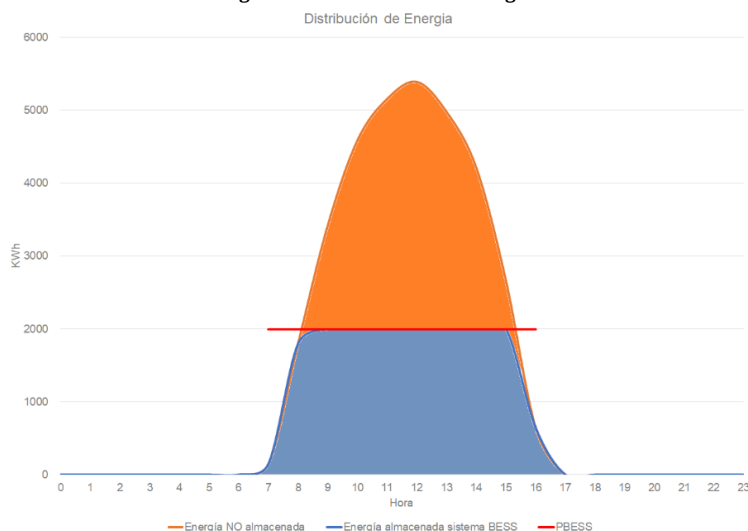
En la Tabla 11 se presentan los excedentes medios diarios a almacenarse en el sistema de almacenamiento tipo BESS.

Tabla 11. Excedentes medios almacenados.

Hora	0	1	2	3	4	5	6	7
Excedentes medios totales (kWh)	-	-	-	-	-	-	-	146,57
Excedentes medios almacenados (kWh)	-	-	-	-	-	-	-	146,57
Hora	8	9	10	11	12	13	14	15
Excedentes medios totales (kWh)	1798,89	3421,01	4589,30	5158,13	5390,83	4978,98	4213,34	2660,30
Excedentes medios almacenados (kWh)	1798,89	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
Hora	16	17	18	19	20	21	22	23
Excedentes medios totales (kWh)	647,21	-	-	-	-	-	-	-
Excedentes medios almacenados (kWh)	647,21	-	-	-	-	-	-	-

En la Figura 42 se presenta la distribución de la energía media diaria a almacenarse en el sistema de almacenamiento tipo BESS.

Figura 42. Distribución de energía.



Durante el periodo de tiempo analizado se tienen excedentes de energía de aproximadamente 12.39 GWh/año de los cuales a una potencia P_{BESS} se pueden llegar a almacenar en el sistema de almacenamiento tipo BESS, aproximadamente 5.8 GWh/año, alrededor del 47% de los excedentes de la granja solar fotovoltaica.

Para determinar la energía diaria a almacenarse en la batería (E_i) se realiza un análisis estadístico mediante percentiles de la energía excedentaria disponible para almacenarse en el sistema tipo BESS durante todo el periodo de análisis, con el fin de determinar la cantidad optima de energía a (E_i) como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Cantidad optima de energía para almacenar

Percentil	0,99	0,95	0,90	0,80	0,70	0,60	0,5
kWh	20507	19736	18882	17952	17249	16801	16230

Teniendo en cuenta el propósito del sistema de almacenamiento, la cantidad de energía excedentaria que se puede almacenar de la granja solar fotovoltaica, la disposición de espacio físico en la granja solar para la instalación del sistema de almacenamiento, las características constructivas de los sistemas de almacenamiento en el mercado, el propósito del sistema de almacenamiento y el costo de los sistemas de almacenamiento tipo BESS, se determina que la energía optima del sistema de almacenamiento será el 15% del percentil P_{50} de la energía total disponible para almacenar; por lo tanto, la energía optima (E_i) del sistema de almacenamiento tipo BESS será:

$$E_i = 2435 \text{ kWh/dia}$$

Una vez determinada la energía (E_i) se procede a determinar la energía final a almacenar en el sistema de almacenamiento tipo BESS mediante la Ecuación (5).

$$E_f = \frac{E_i}{DoD * \eta_{PCS} * \eta_{TRF} * \eta_{LT} * \eta_{BAT}} = \frac{2434,51}{0,95 * 0,99 * 0,99 * 0,99 * 0,67} = 3942 \text{ kWh/dia} \approx 4000 \text{ kWh/dia}$$

Donde:

E_f = Energía final del sistema BESS

DoD = Profundidad de descarga de las baterías, se considera un valor de 95% para baterías de ion de litio.

η_{PCS} = Eficiencia del sistema de conversión de potencia. Se considera un valor típico de 99%.

η_{TRF} = Eficiencia del transformador de potencia. Se considera un valor típico de 99%.

η_{LT} = Eficiencia de la red de transmisión hasta el punto de conexión. Se consideran perdidas de máximo el 1% según la normativa técnica de diseño de redes del operador de red.

η_{BAT} = Eficiencia del sistema de almacenamiento tipo BESS al final de la vida útil del proyecto (15 años). Basado en la Figura 30, se considera una eficiencia de 0.67.

4.6.3 Tiempos de carga y descarga de la batería

De acuerdo con la curva de producción de la granja solar fotovoltaica mostrada en la Figura 36 y la curva de excesos medios de energía de la Figura 39, el sistema de almacenamiento tipo BESS se podrá cargar en el periodo comprendido entre las 7 horas y las 16 horas, teniendo en cuenta que los excedentes medios en dicho periodo serán de aproximadamente 3300 kWh según se indica en la Tabla 11; sin embargo, basado en lo indicado en el apartado 3.5.3, el tiempo óptimo de carga del sistema de almacenamiento tipo BESS se selecciona en 4 horas, teniendo en cuenta las horas solares pico de la granja solar fotovoltaica comprendido entre las 10 horas y las 14 horas.

Mediante la ecuación (6) se calcula el tiempo de descarga del sistema de almacenamiento tipo BESS:

$$t_d = \frac{E_f}{P_{BESS}} = \frac{4000}{2000} = 2 \text{ h}$$

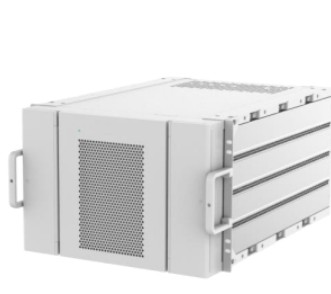
Se debe tener presente que el tiempo final de descarga del sistema de almacenamiento tipo BESS dependerá del arreglo eléctrico seleccionado para el sistema, ya que generalmente los contenedores del sistema de almacenamiento se conectan en paralelo para mayor confiabilidad del sistema durante las maniobras de mantenimiento.

Para el presente trabajo se propone la descarga del sistema de almacenamiento entre las 18 y las 20 horas; sin embargo, el periodo de descarga dependerá de un análisis detallado del comportamiento del precio de bolsa en horas pico.

4.7 Selección de baterías

Una vez calculada la energía final E_f y la potencia P_{BESS} del sistema de almacenamiento, se procede a seleccionar el arreglo de baterías con base en información técnica de fabricantes de baterías; para el presente trabajo se consideran baterías de la marca Huawei, módulo LUNA2000-2.0MWH-2H1. En la Figura 43 se presentan las características técnicas.

Figura 43. Características técnicas modulo LUNA2000-2.0MWH-2H1.



Battery Pack		
General		
Model	LUNA2000-2.0MWH-1H0	LUNA2000-2.0MWH-2H1
Cell Material	LFP	LFP
Pack Configuration	16S 1P	18S 1P
Rated Voltage	51.2 V	57.6 V
Nominal Capacity	320 Ah / 16.38 kWh	280 Ah / 16.13 kWh
Supported Charge & Discharge Rate	≤ 1 C	≤ 0.5 C
Weight	≤ 140 kg	≤ 140 kg
Dimensions (W x H x D)	442 x 307 x 660 mm	442 x 307 x 660 mm

Fuente: HUAWEI.

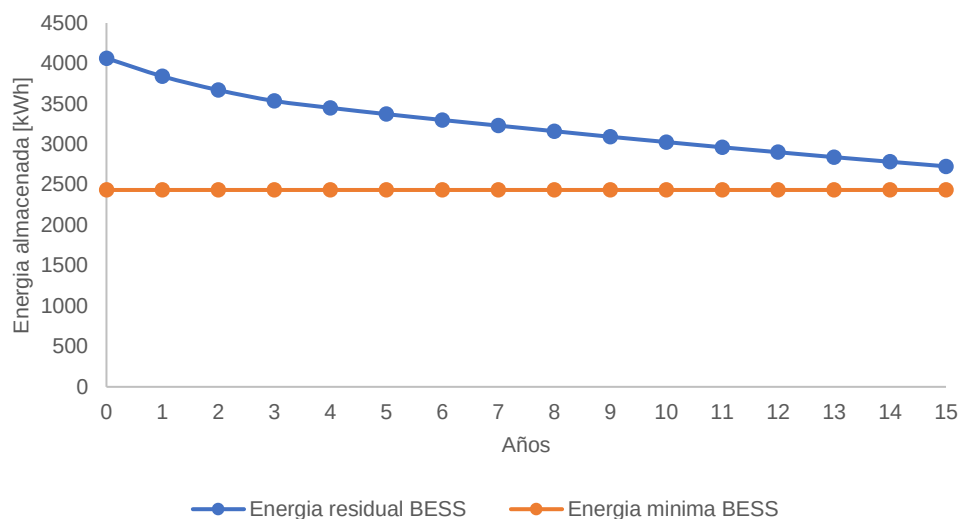
La energía disponible del sistema de almacenamiento será:

Tabla 13. Energía total almacenada en sistema tipo BESS

Módulos	LUNA2000-2.0MWH-2H1
Capacidad nominal (Ah)	280
Energía por modulo (kWh)	16,13
Energía por Rack (kWh)	338,7
Total Racks	12
Energía total almacenada (kWh)	4064,4

Con base en la Figura 30; en la Figura 44 se presenta la curva de degradación en el tiempo de las baterías de ion de litio seleccionadas, considerando 365 descargas por año, en 15 años de operación del sistema.

Figura 44. Energía del sistema de almacenamiento tipo BESS.



4.8 Contenedores de las baterías

Para el sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto, compuesto por 12 racks de baterías se seleccionan 2 contenedores de 20 pies HQ (High Cube) de la referencia LUNA2000-2.0MWH-2H1, cada contenedor alojará internamente 6 racks de baterías con capacidad de almacenar aproximadamente 2032 kWh. En la Figura 45 se muestran las características técnicas de los contenedores LUNA2000-2.0MWH-2H1 de HUAWEI.

Los contenedores alojarán las baterías junto con los paneles DC; además, cuenta con medidas estándar ISO y certificación para transporte marítimo seguro; dentro de cada contenedor se realizan arreglos de 6 racks de baterías en operación en paralelo, conectadas a las cajas de combinación de baterías (DCP – Panel DC); cada contenedor podrá entonces alojar un máximo de 3 cajas de combinación DCP.

Figura 45. Características de contenedores LUNA2000-2.0MWH-2H1.

Battery Container		
Model	LUNA2000-2.0MWH-1H0	LUNA2000-2.0MWH-2H1
DC Rated Voltage	1,200 V	1,250 V
DC Max. Voltage	1,500 V	1,500 V
Nominal Energy Capacity	2,064 kWh	2,032 kWh
Rated Power	344 kW * 6	338.7 kW * 3
Container Configuration (W x H x D)	6,058 x 2,896 x 2,438 mm	6,058 x 2,896 x 2,438 mm
Container Weight	≤ 30 t	≤ 30 t
Operation Temperature Range	-30°C ~ 55°C	-30°C ~ 55°C
Storage Temperature Range	-40°C ~ 60°C	-40°C ~ 60°C
Operation Humidity Range	0 ~ 100% (Without Condensation)	0 ~ 100% (Without Condensation)
Max. Operating Altitude	4,000 m	4,000 m
Cooling Method	Smart Air Cooling	Smart Air Cooling
Configuration of HVAC	8 HVACs	6 HVACs
Fire Suppression Agent	FM-200 / Novec 1230™	FM-200 / Novec 1230™
Communication Interface	Ethernet / SFP	Ethernet / SFP
Communication Protocol	Modbus TCP / IEC104	Modbus TCP / IEC104
Protection Degree	IP55	IP55
Certificates (more available upon request)		
Environment	RoHS6	
Safety & Electrical	IEC62477-1, IEC62040-1, IEC61000-6-2, EN55011, UL9540A, IEC62619, UN3536, etc.	



Fuente: HUAWEI.

Las principales características técnicas de los contenedores LUNA2000-2.0MWH-2H1 de Huawei son las siguientes:

- Refrigeración y climatización del sistema.
- Sistema extinción incendios.
- BMU (Unidad gestión de la batería).
- BMS (Sistema gestión batería).
- Controlador Rack de baterías.
- Iluminación he instalación completa en el interior del contenedor 20"
- Certificación con TÜV
- Sistema de puesta a tierra.
- Aislamiento térmico (lana mineral con bajo coeficiente de transferencia de calor)
- Protección mecánica y climática (ambientes salinos).
- Resistencia sin deformación permanente durante la elevación, con viento o eventos sísmicos.
- Los espacios cumplen los requerimientos RETIE para mantenimiento.
- Las puertas de acceso permiten la entrada y salida de los módulos de baterías hacia el exterior del contenedor.
- Grado de protección IP55.
- Altura máxima de instalación 4000 m.

La selección del sistema de almacenamiento mediante dos contenedores LUNA2000-2.0MWH-2H1 de Huawei, brindará flexibilidad y confiabilidad al sistema de almacenamiento, además de brindará facilidad en el mantenimiento del sistema, ya que permitirá la disponibilidad del 50% de la energía almacenada durante labores de mantenimiento.

4.9 Cajas de combinación de baterías (DCP)

Para la conexión DC de las baterías se seleccionan los Smart Rack Controller - LUNA2000-2.0MWH-2H1 de Huawei, los cuales cuentan con las características técnicas indicadas en la Figura 46.

Figura 46. Smart Rack Controller LUNA2000-2.0MWH-2H1.



Smart Rack Controller		
Battery Side		
Model	LUNA2000-2.0MWH-1H0	LUNA2000-2.0MWH-2H1
Rated Voltage	1,075.2 V	1,209.6 V
Operating Voltage Range	40 V ~ 1,400 V	40 V ~ 1,400 V
Rated Power Voltage Range	1,075 V ~ 1,320 V	1,075 V ~ 1,320 V
Min. Start Voltage	350 V	350 V
Bus Side		
Max. DC Voltage	1,500 V	1,500 V
Rated Voltage	1,200 V	1,250 V
Rated Current	286.7 A	275.2 A
Rated Power	344,000 W	344,000 W
General		
Dimensions (W x H x D)	600 x 270 x 820 mm	600 x 270 x 820 mm
Weight	≤ 90 kg	≤ 90 kg
Cooling Method	Smart Air Cooling	Smart Air Cooling
Protection Degree	IP66	IP66

Fuente: HUAWEI.

Considerando las características técnicas de las cajas de combinación de las baterías indicadas en la Figura 46, se determina que se requieren 6 unidades Smart Rack Controller - LUNA2000-2.0MWH-2H1 (3 por cada contenedor), cada uno con capacidad de 344 kW, para una potencia total de 2064 kW.

4.10 Sistema de control de conversión (PCS)

Con el fin de cumplir con el requerimiento mínimo de potencia de la batería de 2000 kW calculado en el apartado 4.6.1, se procede a determinar el sistema de conversión de potencia (PCS).

4.10.1 Inversores

Se seleccionan las unidades LUNA2000-200KTL-H0 de Huawei, unidades que cuentan con las características técnicas indicadas en la Figura 47.

Figura 47. Inversor LUNA2000-200KTL-H0.

Efficiency	
Max. Efficiency	99.0%
DC Side	
Rated DC Voltage	1,180 V
Max. DC Voltage	1,500 V
Operating DC Voltage Range	1,180 V ~ 1,500 V
Max. DC Current	207.6 A
Max. Number of Inputs	1
AC Side	
Rated AC Active Power	200,000 W @40°C
Rated AC Voltage	800 V
Rated AC Grid Frequency	50 Hz / 60 Hz
Max. AC Current	173.2 A
Adjustable Power Factor Range	-1 ... +1
Max. Total Harmonic Distortion	< 3%
Protection	
Anti-islanding Protection	Yes
AC Overcurrent Protection	Yes
DC Reverse-polarity Protection	Yes
Insulation Resistance Detection	Yes
Residual Current Protection	Yes
DC Surge Protection ¹	Type II
AC Surge Protection ¹	Type II
Communication	
Display	LED Indicators, WLAN + APP
USB	Yes
Ethernet	Yes
General	
Dimensions (W x H x D)	875 x 820 x 365 mm
Weight	< 95 kg
Operating Temperature Range	-25°C ~ 60°C
Cooling Method	Smart Air Cooling
Max. Operating Altitude without Derating	4,000 m
Relative Humidity	0 ~ 100%
DC Connector	OT/DT Terminal
AC Connector	OT/DT Terminal
Protection Degree	IP66
Topology	Transformerless

Fuente: HUAWEI.

Considerando las características técnicas de los inversores indicadas en la Figura 47, se determina que se requieren 10 inversores LUNA2000-200KTL-H0 (5 por cada contenedor), cada uno con capacidad de 200 kW @ 40°C, para una potencia total de 2000 kW. Cada inversor cuenta con las siguientes funciones de protección: anti-isla, sobrecorriente, corriente residual, detección de resistencia de aislamiento, detección de inversión de polaridad DC y descargadores de sobretensión AC y DC.

Los inversores serán alojados en los tableros DC LV Panel referencia DCBOX-9/5-H0, cada panel tiene capacidad para alojar 5 inversores LUNA2000-200KTL-H0 de 200 kW @ 40°C, por lo tanto, se deben considerar 2 paneles DCBOX-9/5-H0 para alojar los 10 inversores. Las características de los paneles DCBOX-9/5-H0 se presentan en la Figura 48.

Figura 48. Panel DCBOX-9/5-H0.



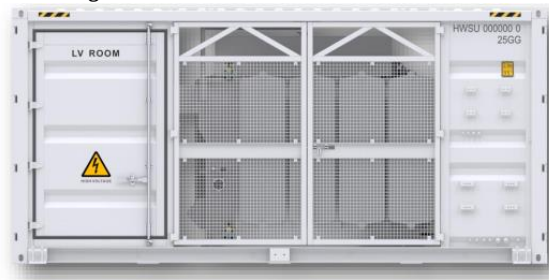
Electrical	
Max. Input Voltage	1,500 V
Nominal Input Voltage	1,200 V
Max. Branch Current for Battery Rack Side	321 A
Max. Branch Current for PCS Side	193 A
Number of DC Circuit Breaker	14
Max. Input Number of Battery Rack	9
Max. Input Number of PCS	5
Max. Convergence Capacity	5 x 193 A
Protection	
DC Overcurrent Protection	Yes
Environment	
Operating Temperature Range	-30°C ~ 60°C
Relative Humidity	0 ~ 100%
Max. Operating Altitude	4,000 m
General	
Cable Entries	Top in for PCS & Bottom in for Battery Rack
Dimensions (W x H x D)	2,040 x 1,415 x 975 mm
Weight (Without Smart PCS)	≤ 750 kg
DC Connector / AC Connector	OT Terminal
Protection Degree	IP55
Installation Options	Grounding

Fuente: HUAWEI.

4.10.2 Transformador de potencia

En la Figura 49 se presentan las características técnicas de la estación de transformación STS-3000K-H1 de Huawei, con el fin de cumplir con el requerimiento mínimo de potencia de la batería de 2000 kW calculado en el apartado 4.6.1.

Figura 49. Smart transformer STS-3000K-H1.

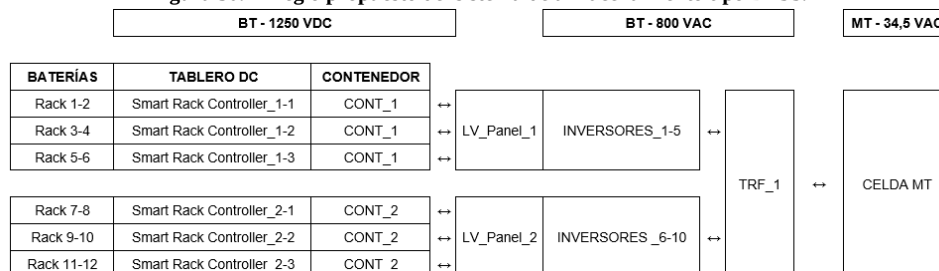


Input		
Available Inverters / PCS	SUN2000-200KTL / SUN2000-215KTL / SUN2000-185KTL / LUNA2000-200KTL	
Maximum LV AC Inputs	17	
AC Power	3,400 kVA @40°C ¹	
Rated Input Voltage	800 V	
LV Main Switches	ACB (2900 A / 800 V / 3P, 1 pcs), MCCB (250 A / 800 V / 3P, 17 pcs)	
Output		
Rated Output Voltage	11 kV, 15 kV, 20 kV, 22 kV, 30 kV, 33 kV, 35 kV ²	13.8 kV, 34.5 kV ²
Frequency	50 Hz	60 Hz
Transformer Type	Oil-immersed, Conservator Type	
Transformer Cooling Type	ONAN	
Transformer Tappings	± 2 x 2.5%	
Transformer Oil Type	Mineral Oil (PCB Free)	
Transformer Vector Group	Dy11	
Transformer Min. Peak Efficiency Index	Tier 1 or Tier 2 In Accordance with EN 50588-1	
RMU Type	SF ₆ Gas Insulated	
RMU Transformer Protection Units	MV Vacuum Circuit Breaker Units	
RMU Cable Incoming / Outgoing Units	Direct Cable Unit or Cable Load Break Switch Unit	
Auxiliary Transformer	Dry Type Transformer, 5 kVA, Dyn11	
Output Voltage of Auxiliary Transformer	400 / 230 Vac or 220 / 127 Vac	
Protection		
Transformer Monitoring & Protection	Oil Level, Oil Temperature, Oil Pressure and Buchholz	
Protection Degree of MV & LV Room	IP 54	
Internal Arcing Fault Classification of STS	IAC A 20 kA 1s	
MV Relay Protection	50/51, 50N/51N	
LV Overvoltage Protection	Type I+II	
Anti-rodent Protection	C5 Medium in accordance with ISO 12944	
Features		
2 kVA UPS	Optional ³	
MV Surge Arrester for MV VCB	Optional ³	
General		
Dimensions (W x H x D)	6,058 x 2,896 x 2,438 mm (20' HC Container)	
Weight	< 15 t	
Operating Temperature Range	-25°C ~ 60°C ⁴ (-13°F ~ 140°F)	
Relative Humidity	0% ~ 95%	
Max. Operating Altitude	1,000 m ⁵	1,500 m ⁵
MV-LV AC Connections	Prewired and Pretested, No Internal Cabling Onsite	
LV & MV Room Cooling	Smart Cooling without Air-across for Higher Availability	
Communication	Modbus-RTU, Preconfigured with Smartlogger3000B	
Applicable Standards	IEC 62271-202, EN 50588-1, IEC 60076, IEC 62271-200, IEC 61439-1	

Fuente: HUAWEI.

En la Figura 50 se presenta el arreglo propuesto de baterías, inversores, paneles DC y transformador de potencia, para el sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto.

Figura 50. Arreglo propuesto del sistema de almacenamiento tipo BESS.



4.11 Sistema de gestión de baterías (BMS)

Para la de gestión del sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto, se selecciona el sistema de gestión BMS de HUAWEI referencia Smartlogger3000 con capacidad para monitorear y administrar hasta 80 inversores y monitorear de forma centralizada la información del sistema de baterías e inversores.

Con este sistema se podrá ajustar o configurar el sistema con el fin de determinar los momentos de conexión y desconexión del sistema de almacenamiento tipo BESS según sea la curva de producción de la granja solar fotovoltaica, esto con el fin de garantizar que el sistema de almacenamiento aproveche los excesos de energía provenientes de la granja solar y no se generen importaciones provenientes de la red.

Las principales funciones del sistema de gestión BMS Para sistemas de almacenamiento a gran escala los fabricantes cuentan con algoritmos de desarrollo propio que permiten una operación segura de dichos sistemas. Para el objetivo propuesto en el presente trabajo se considera que el sistema de gestión óptimo para los sistemas de almacenamiento por baterías tipo BESS en granjas solares fotovoltaicas entre 1 MW y 19,9 MW debe realizar las siguientes funciones:

- Monitoreo de temperatura ambiente.
- Monitoreo del voltaje de cada batería o celda.
- Monitoreo de la corriente de cada batería o celda.
- Monitoreo del voltaje del rack de baterías.
- Monitoreo de la corriente del rack de baterías.
- Monitoreo del estado de aislamiento del sistema.
- Balance de celdas.
- Autodiagnóstico y reporte.
- Gestión de alarmas.
- Estimación del SoC (Estado de carga)
- Estimación del SoH (Estado de salud)
- Estimación del SoP (Estado de potencia)
- IHM o controlador
- Comunicación con dispositivos a nivel superior.
- Protecciones de sobrecarga, sobretensión, sobrecorriente, sobre y bajo voltaje, falla a tierra.
- Control del sistema de refrigeración.
- Desconexión de emergencia.
- Diseño inteligente de control de exportación cero
- Fácil de instalar en el sitio
- máx. 80 dispositivos manejables
- Servidor web integrado
- Comunicación vía RS485, Ethernet y 4G
- Control remoto de potencia activa y reactiva
- Soporte USB e Internet para lectura de datos y actualización de software
- Detección automática de sistemas y mapeo de direcciones RS485
- Hasta 80 inversores por SmartLogger3000A
- Hasta 30 dispositivos por bus RS485
- El dispositivo puede conectarse a través de internet (WAN), una red local (LAN), RS485, MBUS (compatible con PLC, incluye el módulo requerido), redes móviles (2G/3G/4G) y opciones digitales y analógicas
- Distancia de comunicación fiable de 1.000 m a través de RS485
- Seguridad por módulo de protección contra el rayo
- IEC60870-5-104 para conexión a sistemas de vigilancia de terceros

En la Figura 51 se presentan las características técnicas del sistema de gestión Smartlogger3000 de HUAWEI.

Figura 51. Características técnicas Smartlogger3000.

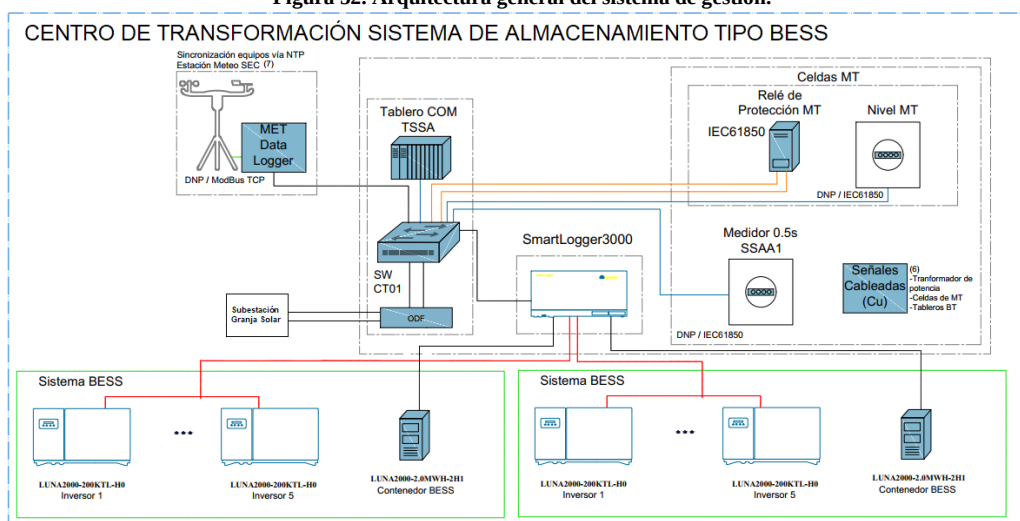


Technical Specifications		SmartACU2000D-D-00
Configuration		
SmartLogger		SmartLogger3000 x 1
SmartModule1000A		Optional
RS485		Supported
Number of MBUS Module ¹		1
Number of SmartPID2000 Module		0
Environment		
Operating Temperature Range		-40°C ~ 60°C (-40°F ~ 140°F)
Relative Humidity		4% ~ 100%
Max. Operating Altitude		4,000 m (13,123 ft.)
Electrical		
AC Input Voltage for Cabinet		100 V ~ 240 V, L / N (L) + PE
AC Input Voltage for MBUS		380 V ~ 800 V, 3Ph
AC Input Voltage for PID		380 V ~ 800 V, 3Ph + FE (Functional Earth)
AC Input Frequency		50 Hz / 60 Hz
Power Supply		Standard: 12 V DC, Optional: 24 V DC ²
Mechanical		
Cable Entries		Bottom in & out
Maintenance		Front
Dimensions (W x H x D)		640 x 770 x 315 mm (25.2 x 30.3 x 12.4 inch)
Weight		29 kg (63.9 lb.)
Protection Degree		IP65
Installation Options		Wall Mounting, Rack Mounting, Pole Mounting

Fuente: HUAWEI.

En la Figura 52 se presenta el esquema general de control y comunicaciones del sistema de gestión de baterías con cada uno de los racks y el sistema de control principal. En el Anexo 2 se presenta la arquitectura de control y comunicaciones general del proyecto.

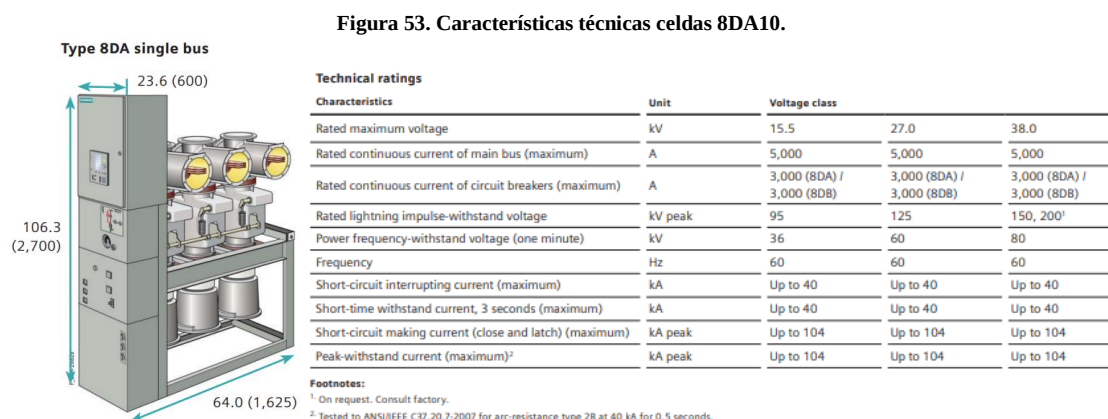
Figura 52. Arquitectura general del sistema de gestión.



4.12 Celdas de media tensión

Para mantener las características técnicas del sistema de media tensión existente de la granja solar fotovoltaica, se seleccionan celdas Siemens de referencia 8DA10 - 38kV, estas celdas son diseñadas con interruptores automáticos al vacío aislados en gas con una tensión máxima de 38 kV, una corriente nominal de 630 A y un nivel de cortocircuito mínimo de 16 kA a 1s. En el compartimiento de baja tensión de la celda 8DA10 de Siemens se considera un relé de sobrecorriente marca Siemens referencia 7SJ85 con funciones de protección de alimentador y transformador.

En la Figura 53 se presentan las características técnicas de las celdas 8DA10 de Siemens.



Fuente: SIEMENS.

Para la incorporación del sistema de almacenamiento a la granja solar Fotovoltaica se requieren las siguientes celdas de media tensión.

- Dos (2) celdas 8DA10 de remonte de 38 kV con seccionadores de 630 A.
- Una (1) celda 8DA10 de salida de transformador de 36 kV con interruptor y seccionador de 630 A, con relé de protección 7SJ85 ubicado en el compartimiento de baja tensión.

En la Tabla 14 se presentan las características técnicas detalladas de las celdas de media tensión.

Tabla 14. Características técnicas celdas de media tensión

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	REQUERIDO
CELDA		
Designación		Salida de transformador 34,5 kV- 630 A Configuración Barra Sencilla
Fabricante		Siemens
País		Alemania
Referencia		8DA10
Tipo		“Metal Clad” en SF6
Norma		IEC 62271-200
Partes bajo alta tensión		IP 65
Protección mecánica para blindaje		IP 3XD
Compartimento de baja tensión		IP 31D
Ejecución del encapsulamiento		Unipolar o Tripolar
Tensión nominal del sistema	kV	34,5
Tensión máxima del equipo, Um	kV	38
Frecuencia asignada (fr)	Hz	60
Tipo de sistema de neutro		
Tensión soportada asignada al impulso tipo rayo, Up	kV	170
Tensión soportada asignada de corta duración a frecuencia industrial 1 min seco, Ud	kV	80

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	REQUERIDO
Corriente soportada de corta duración (I_k)	kA	≥ 16
Corriente pico de soportabilidad asignada (I_p)	kA	≥ 65
Duración admisible asignada de la corriente de corto circuito, t_k	s	1
Indicador de Tensión Capacitivo		Si
TRANSFORMADORES DE CORRIENTE		
Características eléctricas		
Tensión nominal, V_n	kV	34,5
Tensión máxima del equipo, U_m	kV	38
Tensión soportada asignada al impulso tipo rayo, U_p , BIL	kV	170
Nivel de aislamiento en devanados secundarios	kV	3
Tensión soportada asignada de corta duración a frecuencia industrial 1 min seco, U_d	kV	80
Frecuencia nominal, f_r	Hz	60
Corriente primaria asignada, I_p	A	600-300
Corriente secundaria asignada, I_s	A	5
Corriente de corto circuito térmica asignada, 1 s, I_{th}	kA	≥ 25
Corriente dinámica asignada, I_{dyn}	kA	$\geq 62,5$
Características núcleos de medida:		
Número de núcleos:		1
Clase de precisión:		0,2S
Carga de precisión:	VA	5
Factor de seguridad asignado		≤ 10
Gama extendida de corriente	%	120
Características núcleos de protección convencional		
Número de núcleos:		2
Clase de precisión		5P
Factor límite de precisión:		30
Carga de precisión	VA	10
PROTECCION MULTIFUNCIÓN		
Fabricante		Siemens
País		Alemania
Referencia		7SJ85
Norma		IEC-60255
Automonitoreo continuo		Si
Autodiagnóstico cíclico programado		Si
Prueba automática periódica (si/no)		Si
Tiempo medio entre fallas (MTBF)		Días
Tecnología (analógica/digital/numérica)		Numérica
Función de sobrecorriente fases y tierra (50/51) – (50N/51N)		Si
Función de supervisión circuitos de disparo (74)		Si
Función Protección falla interruptor (50BF)		Si
Función Protección subtenión/sobretensión (27/59)		Si
Función de sincronismo (25)		Si
Función Protección de Frecuencia (81)		Si
Función Protección de sobrecarga (49)		Si
Función Protección de disparo y bloqueo (86)		Si
Funciones de control		Si
Funciones adicionales ofrecidas		Si

4.13Cables aislados de media tensión

Los conductores de media tensión conectarán: el transformador de potencia con la celda de media tensión de salida y las celdas de remonte para el acoplamiento del centro de transformación BESS con los centros de transformación de la granja solar.

Los cables aislados de media tensión estandarizados por la compañía eléctrica propietaria de la granja solar son del tipo monopolar 35 kV, 90°C, AL, 100%; por lo tanto, se validará el uso de dichos cables para la

interconexión del transformador de potencia del sistema de almacenamiento tipo BESS con la celda de media tensión.

- **Cálculo de la sección mínima del conductor a utilizar.**

Considerando la corriente máxima de cortocircuito, mediante la Ecuación (7) se calcula la sección mínima del conductor (A). La cual admite que el calentamiento de los conductores se realiza en un sistema adiabático (a calor constante) y para una temperatura máxima admitida por el aislamiento de 250°C

$$I_{cc} = K \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\log\left(\frac{T_2 + \beta}{T_1 + \beta}\right)}{t}} [A] \quad (7)$$

Donde:

- I_{cc} Intensidad máxima de cortocircuito (A).
- K Coeficiente que depende de la naturaleza del conductor, del aislamiento y de sus temperaturas al principio y al final del cortocircuito. K=228 correspondiente al aluminio y K=234 correspondiente al cobre.
- A Sección del conductor (mm²)
- T₂ Es la temperatura máxima permisible en estado de falla. 250 °C
- T₁ Es la temperatura de operación del conductor. 90 °C
- t Tiempo de duración del cortocircuito (0,5 s, tiempo de despeje de protecciones).

Despejando en función de A (Sección mínima del conductor), se obtienen los resultados indicados en la Tabla 15.

Tabla 15. BESS Cálculo de la sección mínima a utilizar para los cables de potencia

Tipo de conductor (Aluminio)	Unidades	Nivel de tensión 34,5 (kV)
Corriente de corto circuito	kA	16
Tiempo mínimo de despeje de la falla	S	0,5
Coeficiente que depende de la naturaleza del conductor, K	-	228
Temperatura máxima permisible en estado de falla	°C	250
Temperatura de operación del conductor	°C	90
Área (sección mínima del conductor)	mm²	120,05

De acuerdo con la sección mínima por cortocircuito calculada para los cables de potencia, se determina que los cables monopoles 250 kcmil con una sección de 126,68 mm² cumplen con el criterio de cortocircuito del sistema.

- **Corriente nominal del sistema**

La capacidad nominal del sistema será la capacidad nominal del transformador seleccionado (3400 kVA), por lo tanto, la corriente nominal del transformador de potencia del sistema de almacenamiento tipo BESS será:

$$I_n = \frac{3400 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 34,5 \text{ kV}} = 56,9 \text{ A}$$

- **Corriente de diseño de los cables de media tensión**

La corriente de diseño para los cables de potencia será:

$$I_d = I_n * 1,2 = 68,3 \text{ A}$$

La capacidad nominal del cable monopolar XLPE 250 kcmil, 90°C, AL, 35 kV, (I_{ncable}) es de aproximadamente 250 A instalados al aire libre y una temperatura ambiente de 40°C, según lo indicado en la tabla 310-76 “Capacidad de corriente de cables de tres conductores aislados de aluminio en un conducto aislado al aire, para temperatura de los conductores de 90°C y 105°C y temperatura ambiente de 40°C” de la NTC2050.

- **Factor de corrección**

El factor de corrección aplicable para la disposición de los cables de media tensión será el asociado a la temperatura de ambiente de operación 50°C. En la Tabla 16 se presentan los factores de corrección por temperatura.

Tabla 16. Factor de corrección de temperatura al aire cables aislados

COEF. DE CORRECCIÓN PARA CABLES ENTERRADOS A Tª DISTINTA DE 40°C								
Tª(°C)	15	20	25	30	35	40	45	50
C ₀	1,22	1,18	1,14	1,1	1,05	1	0,95	0,89

$$I_{rcable} = I_{ncable} * F_c = 250 * 0,89 = 225.5 \text{ A}$$

- **Numero de cables por fase**

$$N = \frac{I_d}{I_{rcable}} = \frac{68,3}{225,5} = 0,3 \approx 1$$

El número de cables por fase es igual a 1; por lo tanto, se considera un cable monopolar XLPE 250 kcmil, 35 kV, 90°C, AL, 100%, por fase para la conexión en media tensión entre el transformador de potencia del sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto y la celda de media tensión. En la Tabla 17 se presentan las características técnicas de los cables de media tensión.

Tabla 17. Características técnicas cables de media tensión

Descripción material	
Designación	Cable aislado monopolar XLPE 35 kV
Calibre	250 kcmil
Sección (mm)	126,68
Características constructivas	
Material conductor	Aluminio
Tipo de material aislante	XLPE
Características dimensionales	
Diámetro del conductor (mm)	13,25
Diámetro del aislamiento (mm)	32,03
Espesor de cubierta (mm)	1,78
Diámetro exterior aproximado (mm)	38,10
Características eléctricas	
Resistencia en D.C. a 20° C (Ω/km)	<0,2667
Intensidad máxima admisible (A)	>250

4.14 Cables aislados de baja tensión

Se tendrán principalmente dos tipos de cables: en corriente alterna y en corriente continua. Los conductores de baja tensión en corriente alterna se usarán principalmente para la conexión de los inversores con el transformador de potencia, así como para la conexión de los servicios auxiliares de los contenedores del sistema de almacenamiento tipo BESS. Por otro lado, los cables en corriente continua se usarán para la conexión de los tableros DC con los inversores.

A continuación, se validarán los cables de baja tensión de corriente alterna para la conexión entre el transformador de potencia y los tableros de baja tensión de distribución de los inversores del sistema de almacenamiento y los cables asociados a la conexión de los inversores.

4.14.1 Cables aislados de baja tensión AC transformador de potencia

- **Corriente nominal del sistema**

Los cables de baja tensión de corriente alterna se dimensionarán para la potencia nominal de cada contenedor del sistema de almacenamiento tipo BESS que será de 1000 kW.

$$I_n = \frac{1000 \text{ kW}}{\sqrt{3} * 0,8 \text{ kV} * 0,8} = 902,11 \text{ A}$$

- **Corriente de diseño de los cables de baja tensión**

La corriente de diseño para los cables de baja tensión de corriente alterna será:

$$I_d = I_n * 1,2 = 1082,5 \text{ A}$$

La capacidad nominal del cable de baja tensión XLPE 500 kcmil, AL, 1kV, (I_{ncable}) es de aproximadamente 430 A instalados en ducto enterrado y una temperatura ambiente de 30°C, según lo indicado en la tabla 310-16 “Capacidad de corriente permisible en conductores aislados para 0 a 2.000 V nominales y 60°C a 90°C. No más de tres conductores portadores de corriente en una canalización, cable o tierra (directamente enterrados) y temperatura ambiente de 30°C” de la NTC2050.

- **Factor de corrección**

El factor de corrección aplicable para la disposición de los cables de baja tensión de corriente alterna será el asociado a la temperatura de ambiente de operación 50°C indicado en la Tabla 16.

$$I_{rcable} = I_{ncable} * F_c = 430 * 0,89 = 382,7 \text{ A}$$

- **Numero de cables por fase**

$$N = \frac{I_d}{I_{rcable}} = \frac{1082,5}{382,7} = 2,83 \approx 3$$

El número de cables por fase es igual a 3; por lo tanto, se consideran tres (3) cables por fase XLPE 500 kcmil, 90°C, AL, 1kV para la conexión por baja tensión de los devanados de baja tensión del transformador de potencia con los tableros centralizadores del sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto.

4.14.2 Cables aislados de baja tensión AC para inversores

- **Corriente nominal del sistema**

Los cables de baja tensión de corriente alterna se dimensionarán para la potencia nominal de cada inversor del sistema de almacenamiento tipo BESS que será de 200 kW.

$$I_n = \frac{200 \text{ kW}}{\sqrt{3} * 0,8 \text{ kV} * 0,8} = 180,42 \text{ A}$$

- **Corriente de diseño de los cables de baja tensión**

La corriente de diseño para los cables de baja tensión de corriente alterna de los inversores será:

$$I_d = I_n * 1,2 = 216,5 \text{ A}$$

La capacidad nominal del cable de baja tensión XLPE 4/0 AWG, AL, 1kV, (I_{ncable}) es de aproximadamente 260 A instalados en ducto enterrado y una temperatura ambiente de 30°C, según lo indicado en la tabla 310-16 “Capacidad de corriente permisible en conductores aislados para 0 a 2.000 V nominales y 60°C a 90°C. No más de tres conductores portadores de corriente en una canalización, cable o tierra (directamente enterrados) y temperatura ambiente de 30°C” de la NTC2050.

- **Factor de corrección**

El factor de corrección aplicable para la disposición de los cables de baja tensión será el asociado a la temperatura de ambiente de operación 50°C indicado en la Tabla 16.

$$I_{rcable} = I_{ncable} * F_c = 260 * 0,89 = 231,4 \text{ A}$$

- **Numero de cables por fase**

$$N = \frac{I_d}{I_{rcable}} = \frac{216,5}{231,4} = 0,94 \approx 1$$

El número de cables por fase es igual a 1; por lo tanto, se considera un (1) cable por fase XLPE 4/0 AWG, 90°C, AL, 1kV para la conexión por baja tensión entre los inversores y los tableros centralizadores del sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto.

4.15 Diagrama unifilar sistema de almacenamiento BESS propuesto

Una vez definidos los componentes principales del sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto para la granja solar fotovoltaica, en la Figura 54 se presenta el diagrama unifilar general del sistema BESS. En el Anexo 1 se presenta el diagrama unifilar general de la granja solar fotovoltaica con el sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto.

Figura 55. Ubicación sistema de almacenamiento tipo BESS.



4.17 Análisis de variables eléctricas del sistema de almacenamiento

En el presente apartado se analizarán las variables eléctricas principales del sistema de almacenamiento, la granja solar fotovoltaica y el punto de interconexión con la red eléctrica, mediante análisis de flujo de carga, cortocircuito y armónicos, usando el software DIGSILENT PowerFactory. Así mismo, se modela un circuito de electrónica de potencia en Simulink – Matlab para el análisis de carga y descarga del sistema de almacenamiento.

Para los análisis eléctricos se tienen en cuenta todos los requerimientos de calidad, seguridad y confiabilidad definidos por el Código de Redes (*Resolución 025 de 1995. Por la cual se establece el Código de Redes, como parte del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional*), así como la normativa internacional aplicable.

Calidad:

La frecuencia nominal del SIN (Sistema Interconectado Nacional) y su rango de variación de operación son las establecidas en el Código de Operación incluido en el Código de Redes (Resolución CREG 025 de 1995 y aquellas que la modifiquen, complementen o sustituyan). La responsabilidad por el control de la frecuencia corresponde al Centro Nacional de Despacho –CND- y a los generadores.

En estado estacionario las tensiones en las barras de 115 kV, 110 kV y 230 kV no deben ser inferiores a 0,90 p.u. ni superiores al 1,10 p.u. del valor nominal. Para la red de 500 kV el voltaje mínimo permitido es de 0,90 p.u. y el máximo es de 1,05 p.u. del valor nominal.

La máxima transferencia por las líneas se considera como el mínimo valor entre el límite térmico de los conductores, máxima capacidad de los transformadores de corriente, el límite de transmisión por regulación de voltaje y el límite por estabilidad transitoria y dinámica.

La cargabilidad de los transformadores se mide por su capacidad de corriente nominal, para tener en cuenta las variaciones de tensión de operación con respecto al nominal del equipo.

En el largo y mediano plazo no se permiten sobrecargas permanentes. En el corto y muy corto plazo se pueden fijar límites de sobrecarga de acuerdo con la duración de esta, sin sobrepasar las temperaturas máximas permisibles de los equipos y sin disminuir la vida útil de los mismos.

Seguridad:

El sistema debe permanecer estable bajo una falla trifásica a tierra en uno de los circuitos del sistema de 230 kV con despeje de la falla por operación normal de la protección principal.

El sistema debe permanecer estable bajo una falla monofásica a tierra en uno de los circuitos del sistema de 500 kV con despeje de la falla por operación normal de la protección principal.

Una vez despejada la falla, la tensión no debe permanecer por debajo de 0,8 p.u. por más de 700 ms.

Las oscilaciones de ángulos de rotor, flujos de potencia y tensiones del sistema deberán ser amortiguadas (el sistema debe tener amortiguamiento positivo).

No se permiten valores de frecuencia inferiores a 57,5 Hz durante los transitorios.

Se permiten sobrecargas bajo contingencia en las líneas y en los transformadores siempre que éstas se encuentren por debajo del tiempo y de la máxima capacidad de transporte de emergencia declarada por los propietarios de los activos y las declaradas ante el operador del sistema. La cargabilidad de los transformadores se mide por su capacidad de corriente nominal y para las líneas se toma el mínimo valor entre el límite térmico de los conductores, límite por regulación de tensión y el límite por estabilidad, aplicando los criterios expuestos anteriormente.

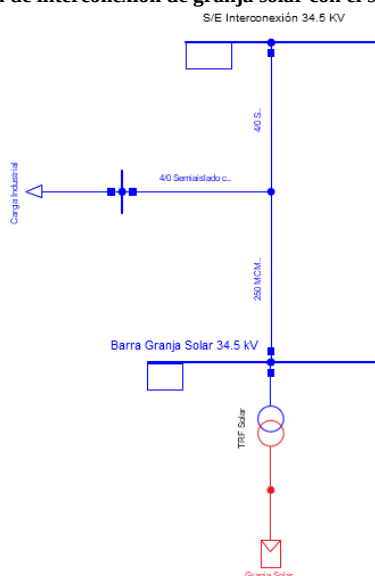
4.17.1 Análisis de flujo de carga

Para el análisis del escenario de flujo de carga mediante el software DIgSILENT PowerFactory, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Despacho de potencia activa del 100% de la granja solar fotovoltaica en demanda media, según la curva de generación presentada en la Figura 36.
- La curva de demanda media de la carga según la Figura 37.
- Las características técnicas de los componentes principales del sistema de almacenamiento tipo BESS (baterías, inversores y transformador) son las definidas en el Capítulo 4.
- Todos los inversores están disponibles y operan en el mismo punto (misma P y Q)
- El rango de voltaje operativo normal de los inversores es de 0.94 a 1.2 p.u en sus terminales de baja tensión.
- Las características técnicas de la red son las presentadas en los diagramas unifilares de la Figura 33 y la Figura 34.
- La red modelada considera todos los parámetros técnicos del SIN; adicionalmente, se modeló el escenario de entrada de operación del sistema de almacenamiento tipo BESS en el año 2023.

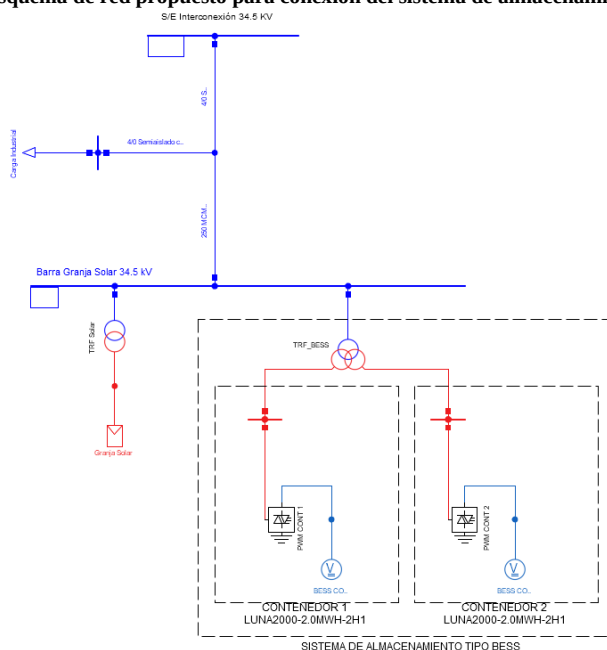
En la Figura 56 se presenta el esquema de red inicial en estudio.

Figura 56. Esquema de interconexión de granja solar con el sistema interconectado.



En la Figura 57 se presenta el esquema de la red proyectada con la conexión del sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto y dimensionado a lo largo del capítulo 4.

Figura 57. Esquema de red propuesto para conexión del sistema de almacenamiento tipo BESS.



En la Tabla 18 se presentan los resultados del flujo de carga para los escenarios analizados. En el Anexo 3 se muestran los diagramas de red para los resultados de flujo de carga.

Tabla 18. Resultados flujo de carga

Barraje	Red sin sistema de Almacenamiento			Carga del sistema de Almacenamiento			Descarga del sistema de Almacenamiento		
	Voltaje [p.u.]	P [MW]	Q [MVar]	Voltaje [p.u.]	P [MW]	Q [MVar]	Voltaje [p.u.]	P [MW]	Q [MVar]
S/E Interconexión 34,5 kV	0,942	-5,420	-2,120	0,941	-4,420	-2,100	0,932	-0,420	-0,390
Carga 34.5 kV	0,944	-1,640	-0,540	0,942	-1,640	-0,540	0,932	-1,560	-0,510
Granja Solar 34.5 kV	0,944	7,070	2,660	0,942	7,070	2,660	0,000	0,000	0,000
Sistema BESS	0,000	0,000	0,000	0,942	-1,000	-0,020	0,932	1,980	0,890

De los resultados presentados en la Tabla 18 se concluye que con la entrada de operación del sistema de almacenamiento tipo BESS no se presentan sobretensiones, subtensiones ni sobrecargas de elementos del sistema ante condiciones de carga o descarga del sistema de almacenamiento.

4.17.2 Análisis de cortocircuito

Mediante el software DIGSILENT PowerFactory, el cual se basa en la norma IEC 60909 “Short-circuit currents in three-phase a.c. systems”, se determinaron las corrientes de cortocircuito monofásicas y trifásicas en condiciones de máxima generación para el año de operación. En la Tabla 19 se presentan los valores de cortocircuito, específicamente la corriente inicial simétrica de cortocircuito (I_{kss}) tanto monofásica como trifásica, en cada una de las barras principales de la red propuesta. En el Anexo 4 se muestran los diagramas de red para los resultados de cortocircuito.

Tabla 19. Resultados cortocircuito

Barraje	Sin Almacenamiento		Con Almacenamiento	
	3F	1F	3F	1F
	I_{kss} [kA]	I_{kss} [kA]	I_{kss} [kA]	I_{kss} [kA]
S/E Interconexión	6,128	5,720	6,197	5,790
Carga 34.5 kV	4,428	3,449	4,481	3,490
Granja Solar 34.5 kV	5,755	5,220	5,825	5,280

De los resultados del análisis de cortocircuito presentados en la Tabla 19 se muestra que con la entrada en operación del sistema de almacenamiento tipo BESS no se presentan mayores incrementos del nivel de cortocircuito de las barras evaluadas, por lo tanto, no se espera que se vea superada la capacidad de soporte e interrupción de los equipos principales en las subestaciones cercanas al proyecto. Los datos presentados son coherentes con la naturaleza de las granjas solares fotovoltaicas y los sistemas de almacenamiento por baterías, las cuales aportan muy poco al cortocircuito pues no poseen inercia. El mayor incremento calculado fue de 0,07 kA en la barra de 34,5 kV de la granja solar fotovoltaica.

En el Anexo 4 se muestran los diagramas de red con los resultados del análisis de cortocircuito realizado en el software DIGSILENT PowerFactory.

4.17.3 Análisis de armónicos

Mediante el software DIGSILENT PowerFactory, en el presente apartado se analizará el comportamiento de los armónicos de tensión en la subestación de interconexión y la granja solar, con el fin de validar el cumplimiento de los límites de distorsión armónica total de voltaje THDv (Total Harmonic Distortion) establecidos en la norma IEEE 519 – 2022 “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”.

En la Tabla 20 se presenta la distorsión armónica en la subestación de interconexión y la granja solar medida con los equipos de calidad de potencia ION7400 existentes en los puntos de conexión para los periodos de máxima demanda. El THDv para ambos barrajes es de aproximadamente 0,756.

Tabla 20. Distorsión armónica de voltaje sin sistema de almacenamiento

Numero de Armónico	1	3	5	7	9	11	13	15
% Distorsión SE Interconexión	99,718	0,146	0,671	0,336	0,018	0,108	0,038	0,004
% Distorsión Granja Solar	99,718	0,146	0,668	0,335	0,018	0,107	0,038	0,004

En la Tabla 21 se presenta la distorsión armónica calculada mediante el software DlgSILENT PowerFactory en la subestación de interconexión y la granja solar. El THDv esperado en la subestación de interconexión y la granja solar será de 0,759 y 0,96 respectivamente

Tabla 21. Distorsión armónica de voltaje con sistema de almacenamiento

Numero de Armónico	1	3	5	7	9	11	13	15
% Distorsión SE Interconexión	99,718	0,146	0,671	0,336	0,018	0,108	0,038	0,004
% Distorsión Granja Solar	0,994	0,139	0,802	0,491	0,025	0,184	0,059	0,009

Como se muestra en la Tabla 21, una vez se implemente el sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto, la distorsión armónica de voltaje del sistema no superará el valor establecido por la norma IEEE 519 – 2022 donde se indica que, para tensiones entre 1 kV y 69 kV la distorsión armónica no podrá ser superior al 3%.

Los datos presentados en la Tabla 20 y la Tabla 21 son coherentes con la naturaleza de los inversores autoconmutados usados para sistemas de generación con fuentes renovables, ya que este tipo de inversores pueden controlar libremente la forma de onda de la tensión y corriente en la parte alterna, lo que permite ajustar el factor de potencia y reducir las distorsiones armónicas, además de ser muy resistentes a las distorsiones procedentes de la red.

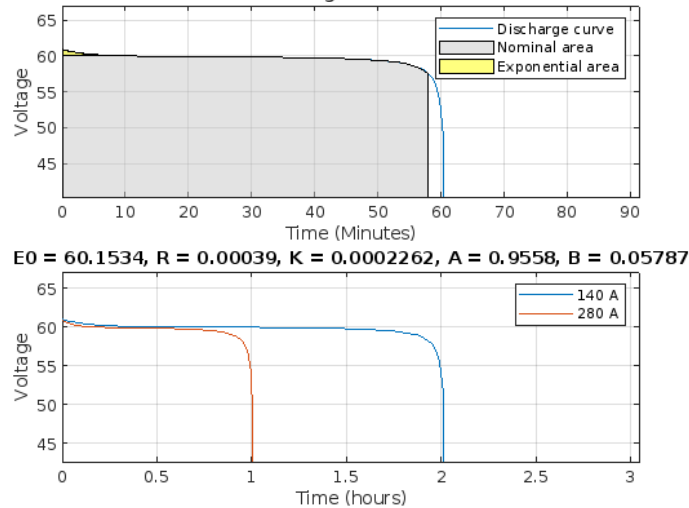
En el Anexo 5 se presentan los resultados del análisis de armónicos realizado en el software DlgSILENT PowerFactory.

4.17.4 Analisis de carga y descarga de la batería

En el presente apartado se verifica el comportamiento de carga y descarga de uno de los racks de baterías LUNA2000-2.0MWH-2H1 del sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto para la granja solar fotovoltaica, mediante un circuito de electrónica de potencia modelado en Simulink – Matlab.

El circuito electrónico propuesto cuenta con una batería con las características técnicas de los racks de baterías LUNA2000-2.0MWH-2H1 presentados en la Figura 43, dicha batería se encuentra conectada en paralelo a una carga y a una máquina DC que representa la alimentación DC que proviene de la red (paneles solares) para cargar las baterías cuando estas estén descargadas. En la Figura 58 se presenta la curva de descarga de la batería LUNA2000-2.0MWH-2H1 obtenida mediante el modelo de Simulink – Matlab.

Figura 58. Curva de descarga rack de batería LUNA2000-2.0MWH-2H1.
Nominal Current Discharge Characteristic at 1C (280A)

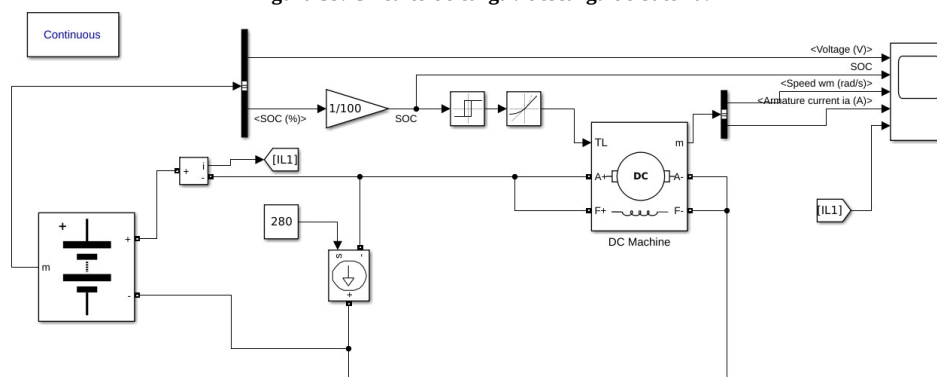


Para el sistema de gestión del circuito se usa un sistema de control ON-OFF, en el que se establecen dos posiciones de referencia, dentro de las cuales debe mantenerse la carga de la batería. Cuando la batería no cuente con la carga suficiente para alimentar la carga, la máquina DC va a entregar la corriente necesaria para poder recargar la batería y abastecer la carga.

Durante el proceso de descarga de la batería, la máquina DC funciona sin par de carga y toda la energía de la batería es consumida por la carga. Cuando el estado de carga de la batería está por debajo de la referencia del 5% (SoC del 95% para baterías de litio); el sistema de control activa un relé para aplicar un par de carga negativo en la máquina de DC y esta se comporte como un generador para recargar la batería y suplir la energía necesaria de la carga.

Cuando la carga de la batería alcanza el 100%, el sistema de control activa nuevamente el relé para eliminar el par de carga aplicado a la máquina DC, para que la batería quede supliendo la carga. En la Figura 59 se presenta el circuito descrito.

Figura 59. Circuito de carga / descarga de batería.

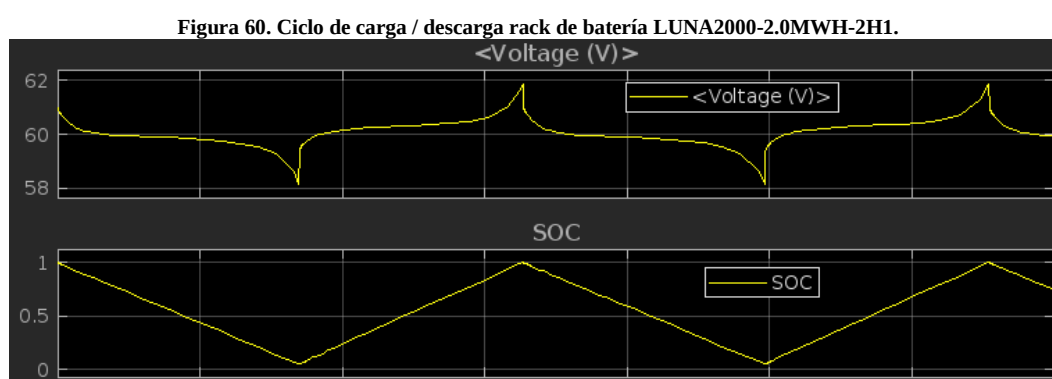


En el modelo implementado en la Figura 59, para la batería se toma la referencia de voltaje y estado de carga, este último es llevado a un lazo de control que divide la referencia entre 100 para pasarla de 0 a 100% y tenerla en un rango de 0 a 1. La salida del bloque es llevada a un relé donde se establece la referencia en la que debe operar el control (0.05 y 1) y el torque negativo que se le debe aplicar a la máquina de DC para la generación de energía.

La salida del bloque del relé se lleva al bloque limitador de velocidad, el cual tiene la función de suavizar la señal que sale del relé para que no cambie más rápido que los límites de referencia establecidos y el control sobre la referencia sea más exacto.

La señal que sale del bloque Rate limiter se lleva a la entrada TL de la máquina DC y corresponde con el par de velocidad negativo que será aplicado al eje de la máquina. Para este modelo de máquina DC con campo bobinado, los devanados de campo y armadura se conectan en paralelo a la batería para que la máquina se ponga en marcha libremente con la energía de la batería, una vez comienza la simulación.

Mediante el circuito de la Figura 59 se simula el comportamiento del rack de baterías LUNA2000-2.0MWH-2H1 ante una carga constante de 280A (capacidad nominal de rack de baterías) con el fin de observar el comportamiento de carga y descarga de la batería en un periodo de tiempo de 2 horas, tal como se presenta en la Figura 60.



Como se muestra en la Figura 60, el voltaje de la batería disminuye inmediatamente comienza a descargarse, producto del consumo de energía por parte de la carga. Una vez la carga (SOC) de la batería se encuentra por debajo del 5%, el control aplica un torque negativo a la máquina DC y esta comienza a aumentar su velocidad y empieza a circular una corriente constante a través del devanado de armadura, para suplir la energía que necesita la carga y comienza a recargar la batería hasta que esta llega al 100% de su capacidad. El voltaje de la batería aumenta a medida que se va cargando y el sistema de control elimina el par de carga sobre la máquina DC una vez la batería llega a un 100% de carga.

4.18 Análisis económico para implementación de sistema tipo BESS

4.18.1 Presupuesto de inversión para implementación

Los sistemas de almacenamiento tipo BESS se están popularizando cada vez más a nivel mundial por su alta eficiencia energética y su rapidez de respuesta; además se están convirtiendo en una solución muy competitiva económicamente. En la Tabla 22 se presenta un presupuesto de inversión – CAPEX (Capital Expenditure) estimado para la implementación del sistema de almacenamiento propuesto a lo largo del Capítulo 4. Este presupuesto considera las actividades básicas para la ingeniería, suministro, montaje, pruebas y puesta en servicio del sistema de almacenamiento tipo BESS para la granja solar fotovoltaica propuesta.

Tabla 22. Presupuesto de inversión sistema de almacenamiento tipo BESS

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VR UNITARIO (COP)	VR TOTAL (COP)	VR UNITARIO (USD)	VR TOTAL (USD)
1	INGENIERIA				77.000.000		
1.1	Elaboración de ingeniería detallada	Glb.	1	58.000.000	58.000.000		

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VR UNITARIO (COP)	VR TOTAL (COP)	VR UNITARIO (USD)	VR TOTAL (USD)
1.2	Informe estudio de protección de coordinaciones	Glb.	1	12.000.000	12.000.000		
1.3	Informe de puesta a tierra	Glb.	1	7.000.000	7.000.000		
2	SUMINISTRO E INSTALACIÓN EQUIPOS PRINCIPALES						2.371.749,89
2.1	Power station STS-3000K-H1 (Suministro)	Und.	1			149.097,50	149.097,50
2.2	Power station STS-3000K-H1 (Instalación)	Und.	1			15.896,50	15.896,50
2.3	Inversores LUNA2000-200KTL-H0 (Suministro)	Und.	10			16.874,56	168.745,60
2.4	Inversores LUNA2000-200KTL-H0 (Instalación)	Und.	10			1.128,04	11.280,37
2.5	Contenedor Sistema BESS LUNA2000-2.0MWH-2H1 (Suministro)	Und.	2			925.824,65	1.851.649,30
2.6	Contenedor Sistema BESS LUNA2000-2.0MWH-2H1 (Instalación)	Und.	2			20.418,81	40.837,62
2.7	Celdas de media tensión Siemens 8DA10 Remonte (Suministro)	Und.	2			36.953,00	73.906,00
2.8	Celdas de media tensión Siemens 8DA10 Remonte (Instalación)	Und.	2			4.867,00	9.734,00
2.9	Celdas de media tensión Siemens 8DA10 Salida de transformador (Suministro)	Und.	1			45.736,00	45.736,00
2.10	Celdas de media tensión Siemens 8DA10 Salida de transformador (Instalación)	Und.	1			4.867,00	4.867,00
3	SUMINISTRO E INSTALACIÓN CABLEADO Y SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN						74.457,77
3.1	Cables y conectores DC	Glb.	1			5.233,50	5.233,50
3.2	Cables y conectores AC, LV	Glb.	1			4.453,50	4.453,50
3.2	Cables y conectores AC, MV	Glb.	1			5.507,00	5.507,00
3.3	Sistema de monitoreo BMS/SCADA	Glb.	1			56.546,59	56.546,59
3.4	Cableado de comunicaciones (Fibra óptica, Ethernet)	Glb.	1			2.717,18	2.717,18
4	OBRAS CIVILES				140.042.500		
4.1	Adecuación puesta a tierra	Glb.	1	23.000.000	23.000.000		
4.2	Banco de ductos	m.	45	156.500	7.042.500		
4.3	Cimentación contenedores	Und.	2	36.000.000	72.000.000		
4.4	Cimentación transformadores	Und.	2	19.000.000	38.000.000		
5	PUESTA EN MARCHA						10.975,52
5.1	Pruebas y puesta en marcha	Glb.	1			10.975,52	10.975,52
COSTO DIRECTO (COP)					217.042.500		
COSTO DIRECTO (USD)							2.457.183,18

4.18.2 Amortización de inversión propuesta

Como se indicó en el apartado 3.4.1, generalmente los proyectos de generación renovables para autoconsumo se realizan mediante contratos de compraventa de energía denominados PPA (Power Purchase Agreement); estos contratos de compraventa les permiten a los grandes consumidores (generalmente cargas industriales) adquirir la energía eléctrica a un precio mucho más bajo que el estándar del mercado, mediante una negociación de tarifa a largo plazo. A través de estos contratos PPA se provee la energía por un tiempo negociado, a un

costo que representa una importante disminución en el gasto y, además, con el beneficio de que el cliente será dueño del sistema al finalizar el contrato.

Para la amortización del presupuesto de inversión se debe considerar el precio para el suministro de la energía mensual según la ecuación (8).

$$P_n = P_{n-1} * (IPP_n / IPP_{n-1}) \quad (8)$$

Donde:

P_n = Precio de la energía para el suministro del mes n

P_{n-1} = Precio de la energía en el mes n-1

IPP_n = Índice de Precios del Productor certificado por entidad competente del mes del suministro n

IPP_{n-1} = Índice de Precios del Productor certificado por entidad competente del mes del suministro n-1

n = Mes del suministro

Para el proyecto en análisis, se determinó que manteniendo el precio de la energía contratado a través del contrato PPA de venta de energía de la granja solar fotovoltaica vigente actualmente, la amortización del presupuesto de inversión del sistema de almacenamiento estaría alrededor de 25 años; sin embargo, considerando la tendencia en el incremento de la tarifa del mercado regulado y el incremento de la demanda, a través de un nuevo contrato PPA exclusivo para el sistema de almacenamiento, el presupuesto de inversión se podría amortizar en alrededor de 12 años.

4.19 Evaluación de impactos ambientales del sistema de almacenamiento tipo BESS

La evaluación de impactos ambientales es una herramienta preventiva mediante la cual se evalúan los impactos negativos y positivos que las políticas, planes, programas y proyectos generan sobre el medio ambiente, y se proponen las medidas para ajustarlo a niveles de aceptabilidad. Para esto se comparan las condiciones ambientales antes de la actividad humana y con la actividad humana (Serrano, 2016).

Para que una evaluación ambiental sea efectiva debe poseer una perspectiva científico-técnica, con institucionalidad, focalizada, válida y accesible, además de un enfoque multidimensional. Los propósitos de ésta deben ser incorporar la dimensión ambiental a la planificación y toma de decisiones, predecir las consecuencias ambientales de los proyectos o iniciativas y promover la participación pública. Su objetivo principal es minimizar y/o anular las posibles consecuencias ambientales de los proyectos.

Existen distintos tipos de impactos, el directo es aquel cuyo efecto tiene una incidencia inmediata en algún elemento ambiental. El impacto indirecto o secundario es cuando el efecto supone una incidencia inmediata respecto a la interdependencia o, en general, a la relación de un factor ambiental con otro. El impacto simple es aquel cuyo efecto se manifiesta sobre solo un componente ambiental, o cuyo modo de acción es individualizado, sin consecuencias en la inducción de nuevos efectos, ni en la de su acumulación ni en la de sus sinergias. Un impacto es acumulativo cuando el efecto del agente inductor incrementa progresivamente su gravedad al carecer el medio de mecanismos de eliminación con efectividad temporal similar al del incremento de la acción causante del impacto. Y por último está el impacto sinérgico, que es producido cuando el efecto conjunto de la presencia simultánea de varios agentes o acciones supone una incidencia ambiental mayor que el efecto de la suma de la incidencia individual contemplada aisladamente (Serrano, 2016).

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, para la viabilidad de un proyecto de inversión se debe tener en cuenta su eje ambiental, en el que los elementos que pueden ser afectados por impactos ambientales son el aire, agua, suelo, flora, fauna y las personas.

La matriz de Leopold es un instrumento comúnmente usado para analizar los impactos ambientales que poseen distintos proyectos durante su etapa de planificación. Éste, es un método cualitativo en el cual se utiliza una matriz que tiene las actividades realizadas por el proyecto en las columnas y los factores ambientales a analizar en las filas. A las intersecciones de estos datos se les asignan dos valores, el primero define la magnitud del impacto el cual tiene un rango de -10 a +10, siendo de valor negativo los impactos que causan daño al medio ambiente y de valor positivo los impactos que benefician a este. Y el segundo valor señala la importancia del impacto en el factor ambiental situado que va de 1 a 10. La Figura 61 presenta la valoración de la matriz de Leopold (Ponce V., 2008).

Figura 61. Valoración matriz de Leopold.

MAGNITUD			IMPORTANCIA		
Intensidad	Afectación	Calificación	Duración	Influencia	Calificación
Baja	Baja	±1	Temporal	Puntual	+1
Baja	Media	±2	Media	Puntual	+2
Baja	Alta	±3	Permanente	Puntual	+3
Media	Baja	±4	Temporal	Local	+4
Media	Media	±5	Media	Local	+5
Media	Alta	±6	Permanente	Local	+6
Alta	Baja	±7	Temporal	Regional	+7
Alta	Media	±8	Media	Regional	+8
Alta	Alta	±9	Permanente	Regional	+9
Muy Alta	Alta	±10	Permanente	Nacional	+10

Fuente: La matriz de Leopold para la Evaluación del Impacto Ambiental. Ponce V., M.

Con los datos indicados en la Figura 61 se puede lograr una jerarquización de los impactos y así poder poner más énfasis en dar solución a los sistemas con un mayor número de impactos negativos.

En el Anexo 6, (Fernández S., 2018) muestra los impactos ambientales definidos para sistemas de almacenamiento tipo BESS, basados en baterías de ion de litio.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- El objetivo principal de este trabajo fue definir una metodología para dimensionar el sistema de almacenamiento de energía tipo “BESS” que permita aprovechar los excesos de energía en granjas solares fotovoltaicas interconectadas con potencia entre 1 MW y 19,9 MW. La metodología definida se basó en un análisis documental de las tecnologías existentes para sistemas de almacenamiento por baterías y consideró los siguientes aspectos relevantes:
 - Disponibilidad del recurso. Análisis de la curva de generación de la granja solar fotovoltaica.
 - Variación de la demanda. Análisis de la curva de carga o demanda.
 - Cuantificación o cálculo de excedentes almacenables, basado en las curvas de generación y demanda.
 - Propósito de los excedentes almacenables.
 - Aspectos técnicos y operativos para las baterías del sistema de almacenamiento. Se consideraron aspectos relevantes como potencia de la batería, energía de la batería, tiempos de carga y descarga de las baterías.
 - Criterios técnicos y operacionales para la selección de componentes principales como el sistema de conversión (PCS) y el sistema de gestión de baterías (BMS).
 - Normatividad nacional e internacional aplicable a los sistemas de almacenamiento por baterías tipo BESS.
- En la actualidad los sistemas de almacenamiento tipo BESS brindan grandes ventajas en cuanto a la respuesta de carga y descarga, además de tener altos niveles de eficiencia. Los sistemas de almacenamiento brindan flexibilidad operativa a los sistemas eléctricos permitiendo aprovechar los excedentes de energía de la generación renovable debido a la intermitencia de su producción, ya que dependen directamente de las condiciones climatológicas del sitio de instalación.
- Los sistemas de almacenamiento tipo BESS cada vez son más efectivos y competitivos económicamente, permitiendo ser integrados a los sistemas de servicios auxiliares de las plantas de generación renovables, con el fin de mejorar su respuesta en el seguimiento de las consignas de la red.
- El dimensionamiento de sistemas de almacenamiento para granjas solares interconectadas está basado principalmente en análisis estadístico; por lo tanto, se recomienda el análisis de periodos de tiempo de mínimo un año en las curvas de producción y demanda.
- Para el dimensionamiento de sistemas de almacenamiento por baterías es muy importante definir tres aspectos técnicos determinantes para su fabricación: Potencia del sistema de almacenamiento, energía del sistema de almacenamiento y tiempos de carga/descarga del sistema de almacenamiento.
- En la actualidad los fabricantes de sistemas de almacenamiento tipo BESS a gran escala presentan soluciones con tiempos de descarga entre 0.5 horas y 4 horas, de acuerdo con la energía almacenada y la tasa de carga/descarga.
- Típicamente para sistemas de almacenamiento tipo BESS a gran escala con propósitos de autoconsumo, se recomienda almacenar entre el 10% y el 20% de la energía excedentaria media disponible en la granja solar fotovoltaica, considerando variables como: espacio disponible en el emplazamiento, costo de los sistemas de almacenamiento, tasa de carga/descarga del sistema de almacenamiento y disponibilidad del punto de conexión.

- Se aplicó la metodología definida para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento tipo BESS sobre una granja solar fotovoltaica interconectada existente en Colombia, con una potencia de 9,9 MW a 34,5 kV, con una energía media diaria excedentaria de 33 MWh y que atiende una carga industrial cuya potencia media demanda es de 1,7 MW.
- Se dimensionó el sistema de almacenamiento tipo BESS de 2 MW/4 MWh, compuesto por dos contenedores LUNA2000-2.0MWH-2H1 de HUAWEI, cada uno con capacidad de 1 MW/2 MWh; esta configuración de dos contenedores permitirá suplir toda la potencia media de la carga (incluida la potencia media máxima) o un 50% de la misma, a través de la conexión o desconexión de los contenedores, lo cual brindará confiabilidad al sistema de almacenamiento en caso de fallas o trabajos de mantenimiento.
- Se definieron las características técnicas de los componentes principales del sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto para la granja solar; tales como: baterías, inversores, transformadores, cajas de conexiones, conductores y el sistema de gestión de baterías (BMS); así como la propuesta de integración del sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto para la granja solar fotovoltaica con el sistema de control, protección, medida y comunicaciones existente.
- Mediante análisis de flujo de carga y cortocircuito en el software DigSILENT PowerFactory, se determinaron las variables eléctricas principales (voltaje, potencia y corrientes de cortocircuito monofásicas y trifásicas) en los barrajes de la granja solar fotovoltaica, la carga y la subestación de interconexión, antes y después de la conexión del sistema de almacenamiento, donde se validó que en estado estacionario las tensiones en las barras no estuvieran por debajo de 0,90 p.u. ni superiores al 1,10 p.u. del valor nominal, según el código de redes (Resolución CREG 025 de 1995), con la implementación del sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto.
- Se determinaron los niveles de cortocircuito monofásicos y trifásicos en demanda máxima, con el fin de verificar que la capacidad de soporte e interrupción de los equipos principales en las subestaciones cercanas al proyecto no se viera superada con la implementación del sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto.
- Se verificó mediante un circuito de electrónica de potencia modelado en Simulink – Matlab el comportamiento de uno de los racks de baterías LUNA2000-2.0MWH-2H1 de HUAWEI seleccionados, donde se presentó el comportamiento del voltaje y el SoC de la batería ante ciclos de carga y descarga.
- Se verificó que la distorsión armónica de voltaje en las barras de la subestación de interconexión y la granja solar una vez se implemente el sistema de almacenamiento propuesto no supere el valor establecido por la norma IEEE 519 – 2022 donde se indica que, para tensiones entre 1 kV y 69 kV la distorsión armónica no podrá ser superior al 3%. Lo anterior muestra que en la actualidad los sistemas de almacenamiento a gran escala cuentan con sistemas de filtrado activo de armónicos muy efectivos.
- Se presentó una evaluación económica estimada para la implementación del sistema de almacenamiento propuesto, donde se determinó que para el año 2023 se requiere una inversión de aproximadamente USD 2,5 millones, que serán amortizados en aproximadamente 12 años mediante un PPA exclusivo para el sistema de almacenamiento tipo BESS.
- Se evaluaron los riesgos ambientales para la implementación del sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto, mediante el uso de la matriz de Leopold, donde se presentaron los riesgos de los sistemas de almacenamiento basados en baterías de ion de litio desde la consecución de la materia prima hasta el fin de la vida útil del sistema.

5.1 Trabajos futuros

Como trabajo futuro se plantea ajustar el análisis económico teniendo en cuenta el año de implementación del sistema de almacenamiento tipo BESS propuesto, considerando variables como: variación del dólar, costo del sistema de almacenamiento, amortización de la inversión y fijación de un valor adecuado de precio del kWh a través de un PPA adecuado para el sistema de almacenamiento, teniendo en cuenta el comportamiento del precio de bolsa y el crecimiento de la demanda.

Así mismo se propone como trabajo futuro el desarrollo de la ingeniería de detalle para la implementación del sistema de almacenamiento BESS propuesto, considerando detalles de instalación de obra civil, montaje electromecánico y estudios eléctricos como análisis de reactivos, análisis de armónicos y coordinación de protecciones.

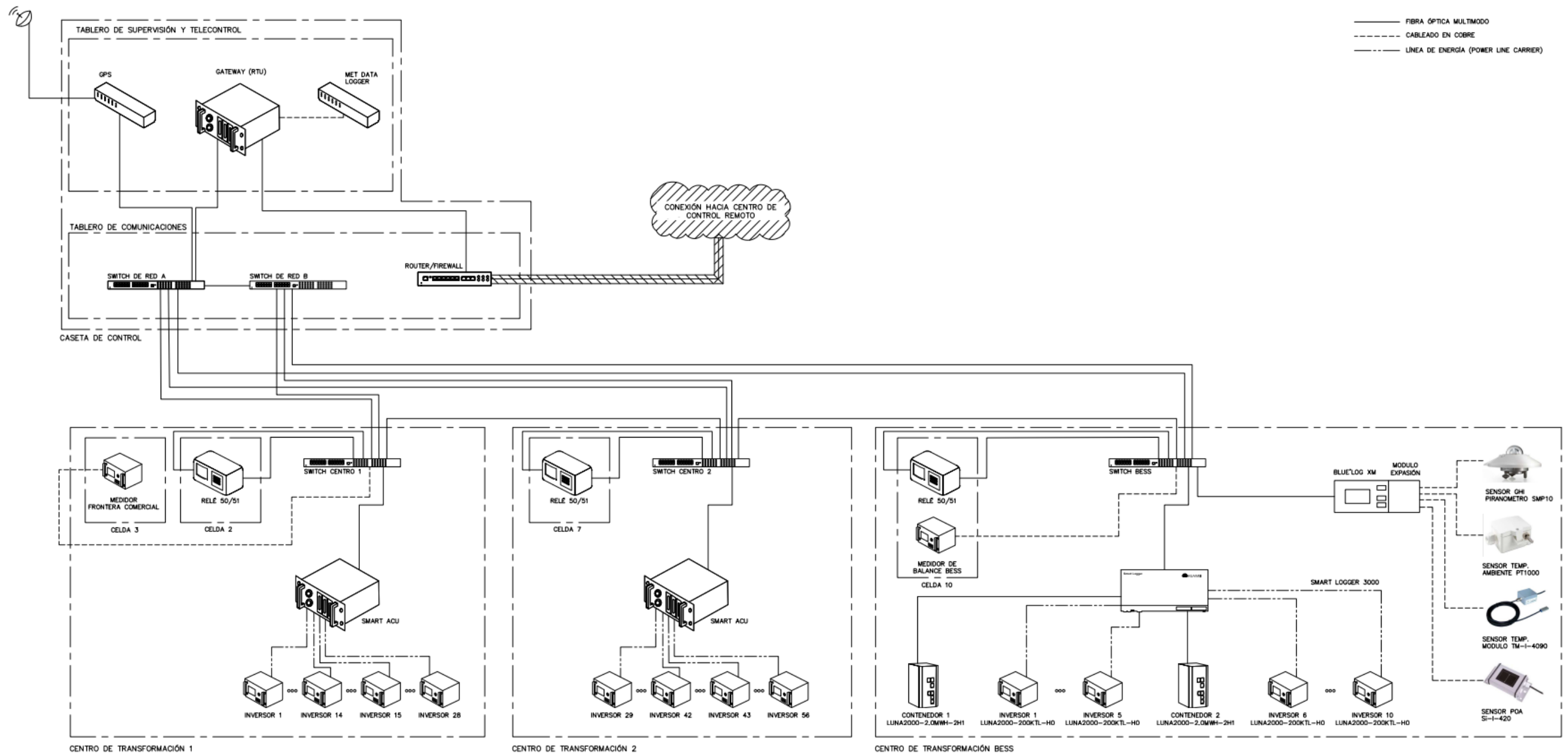
Finalmente, se propone realizar un análisis técnico-económico detallado, con el fin de determinar el mejor periodo de descarga del sistema de almacenamiento tipo BESS, considerando el comportamiento del precio de bolsa en horas pico.

Bibliografía

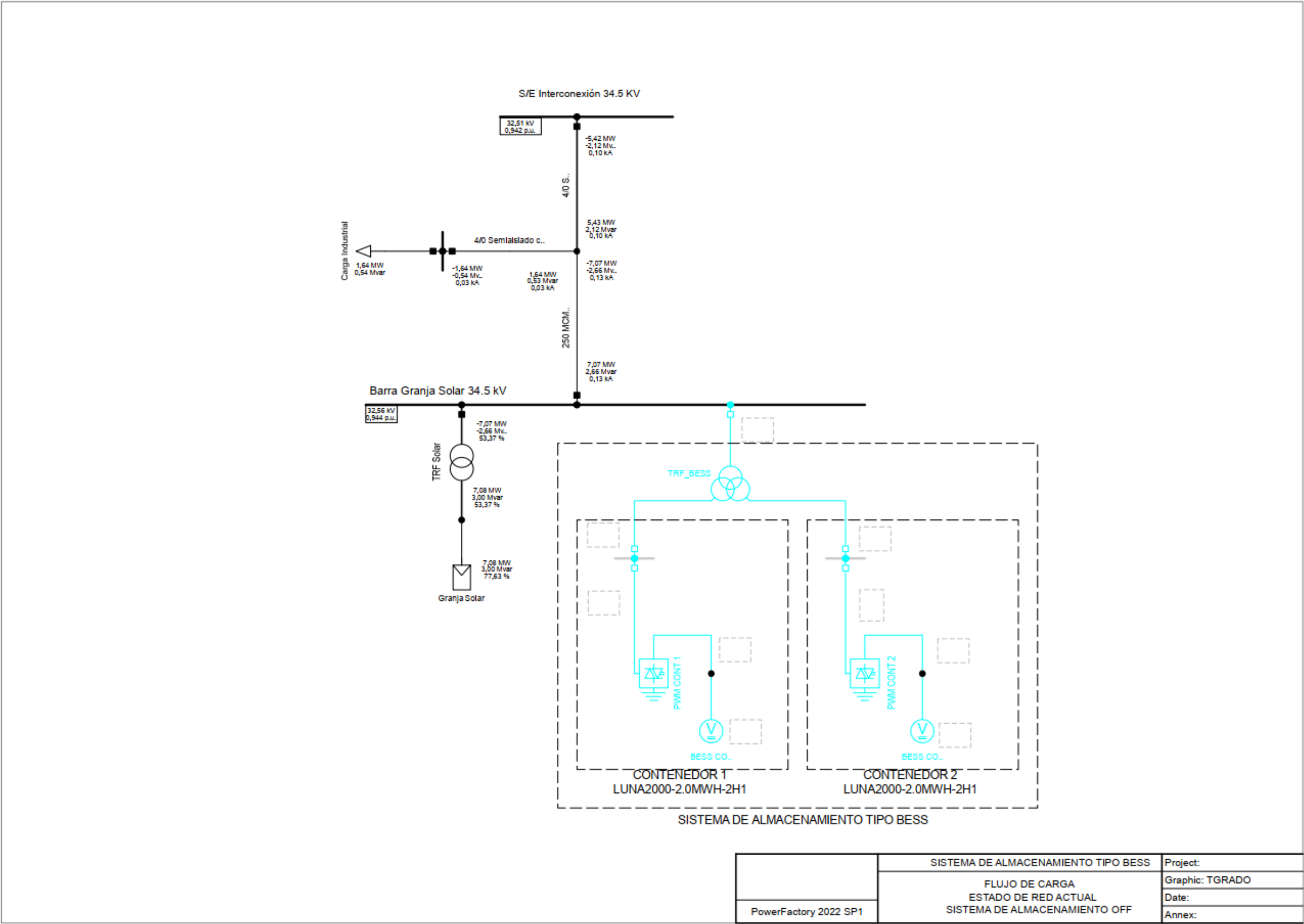
- Agency International Energy. (2020). Obtenido de <https://www.iea.org/sankey/>
- Atallah, M., Abdel-Sattar, A., & El-Dessouki, M. (2019). Different Aspects That Affect Sizing of Battery Energy Storage in PV Systems.
- Bai, J., Zhang, X., & Wang, L. (2012). A Flywheel Energy Storage System with Active Magnetic Bearings. *Energy Procedia*.
- Barbón, A., Coto, J., & Santos, L. (2018). *Análisis de ventajas e inconvenientes de las baterías de flujo REDOX frente a las baterías de iones de litio*.
- Bilbao, P. (2013). *Dimensionamiento óptimo de sistemas de almacenamiento para centrales eólicas*. Santiago de Chile.
- Bolund, B., Bernhoff, H., & Leijon, M. (2007). Flywheel energy and power storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Calderón, J. (2021). Seminario de sistemas de almacenamiento de energía. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Chaturvedi, N., Klein, R., Christensen, J., Ahmed, J., & Kojic, A. (2010). Algorithms for Advanced Battery-. *Control Systems, IEEE*.
- CREG 030. (2018). Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional.
- Endemaño, L., Burgos, M., & Roldán, J. (2016). *Análisis Global de los Sistemas de Almacenamiento de Energía Eléctrica*. Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Enegy Storage Association. (2020). Obtenido de Enegy Storage Association: <https://energystorage.org/>
- Fernández S., M. (2018). Evaluación ambiental de distintas tecnologías de almacenamiento de energía. Santiago de Chile.
- González , M., & Trejos, L. (2017). Conceptos técnicos para comprender los Sistemas de Gestión de Baterías BMS. *Revista Vía Innova*.
- Guacaneme, J., Velasco, D., & Trujillo, C. (2013). Revisión de las Características de Sistemas de Almacenamiento de Energía para Aplicaciones en Micro Redes.
- Hittinger, E., Whitacre, J., & Apt, J. (2012). What properties of grid energy storage are most valuable? *Journal of Power Sources*.
- IDEAM. (2021). Obtenido de http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/asset_publisher/LdWW0ECY1uxz/content/el-ideam-informa-que-el-fenomeno-de-la-nina-2020-2021-ha-finalizado
- International Renewable Energy Agency. (2023). Obtenido de www.irena.org
- Mercier, P., Cherkaoui, R., & Oudalov, A. (2009). Optimizing a battery energy storage system for frequency control application in an power system. *IEEE Trans. Power Syst.*
- Ospina, B. (2021). Seminario de almacenamiento de energia. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Paz Reinoso, A. S. (2018). *Dimensionamiento óptimo y análisis técnico económico*. Valparaíso, Chile.

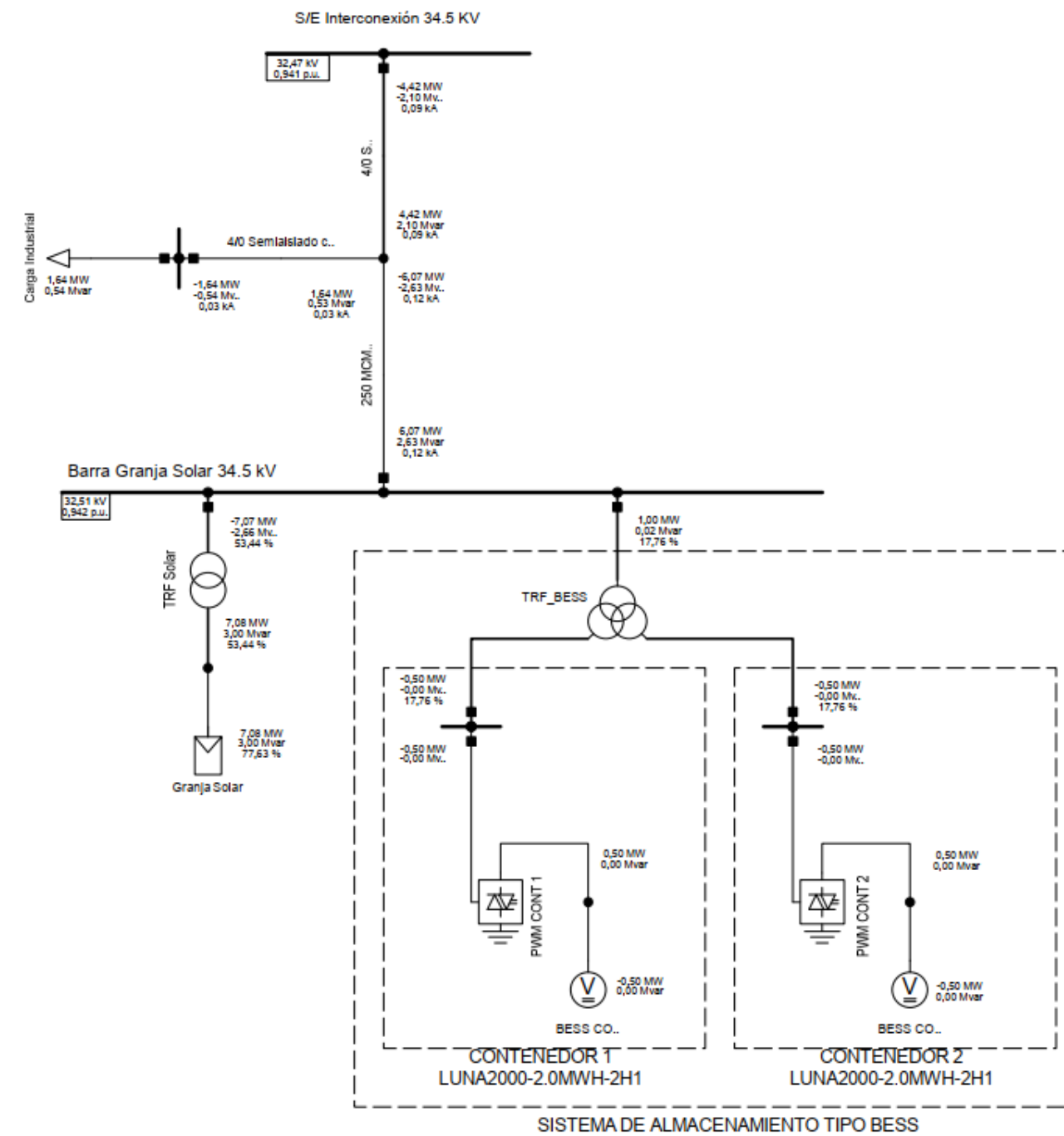
- Pino, P. (2018). *Aplicaciones técnicas y económicas de sistemas BESS en parques eólicos y fotovoltaicos en el sistema eléctrico Chileno*. Santiago de Chile.
- Ponce V., M. (2008). La matriz de Leopold para la Evaluación del Impacto Ambiental. Universidad Estatal de San Diego.
- Rahimi-Eichi, H., Ojha, U., Baronti, F., & Chow, M. (2013). Battery Management System: An Overview. *Industrial Electronics Magazine, IEEE*.
- Ribeiro, P., Johnson, B., Crow, M., Arsoy, A., & Liu, Y. (2001). Energy storage systems for advanced power applications. *Proceedings of the IEEE*.
- Sanchez, R., & Zarco, P. (2018). *Aplicación y dimensionamiento de equipos de un sistema BESS en una central térmica*.
- Serrano, R. (2016). Curso Evaluación de Impacto Ambiental. Universidad de Chile.
- Vázquez, S., Lukic, S., Galvan, E., Franquelo, L., & Carrasco, J. (2010). Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- Ventura, L., Burgos, M., & Roldan, J. (2016). *Análisis Global de los Sistemas de Almacenamiento*.
- Zusammenarbeit Deutsche Gesellschaft für Internationale. (2022). Guía para el dimensionamiento de sistemas de almacenamiento de energía con baterías., (pág. 46). México.

Anexo 2. Arquitectura del sistema de automatización y control del proyecto

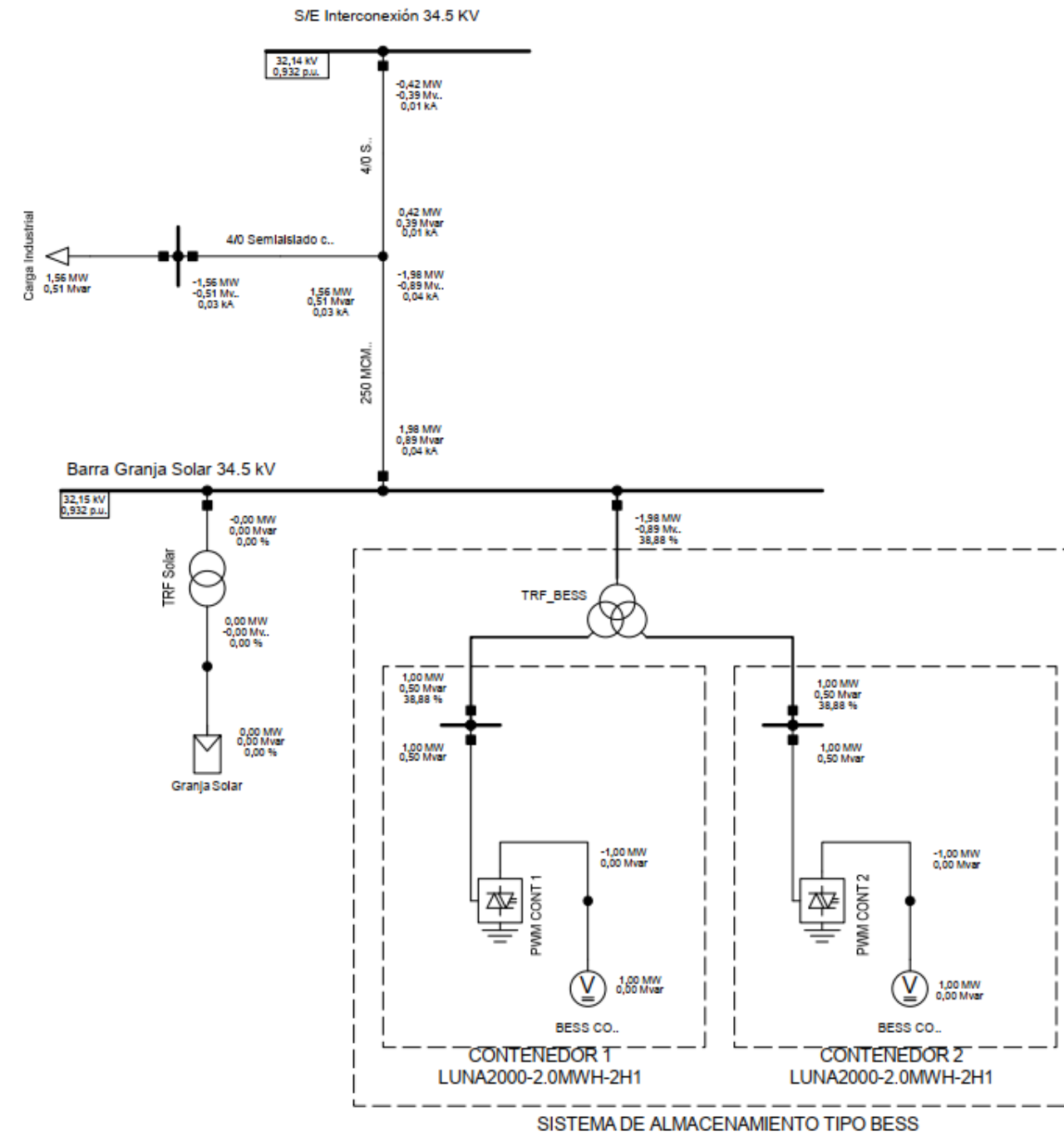


Anexo 3. Resultados flujo de carga

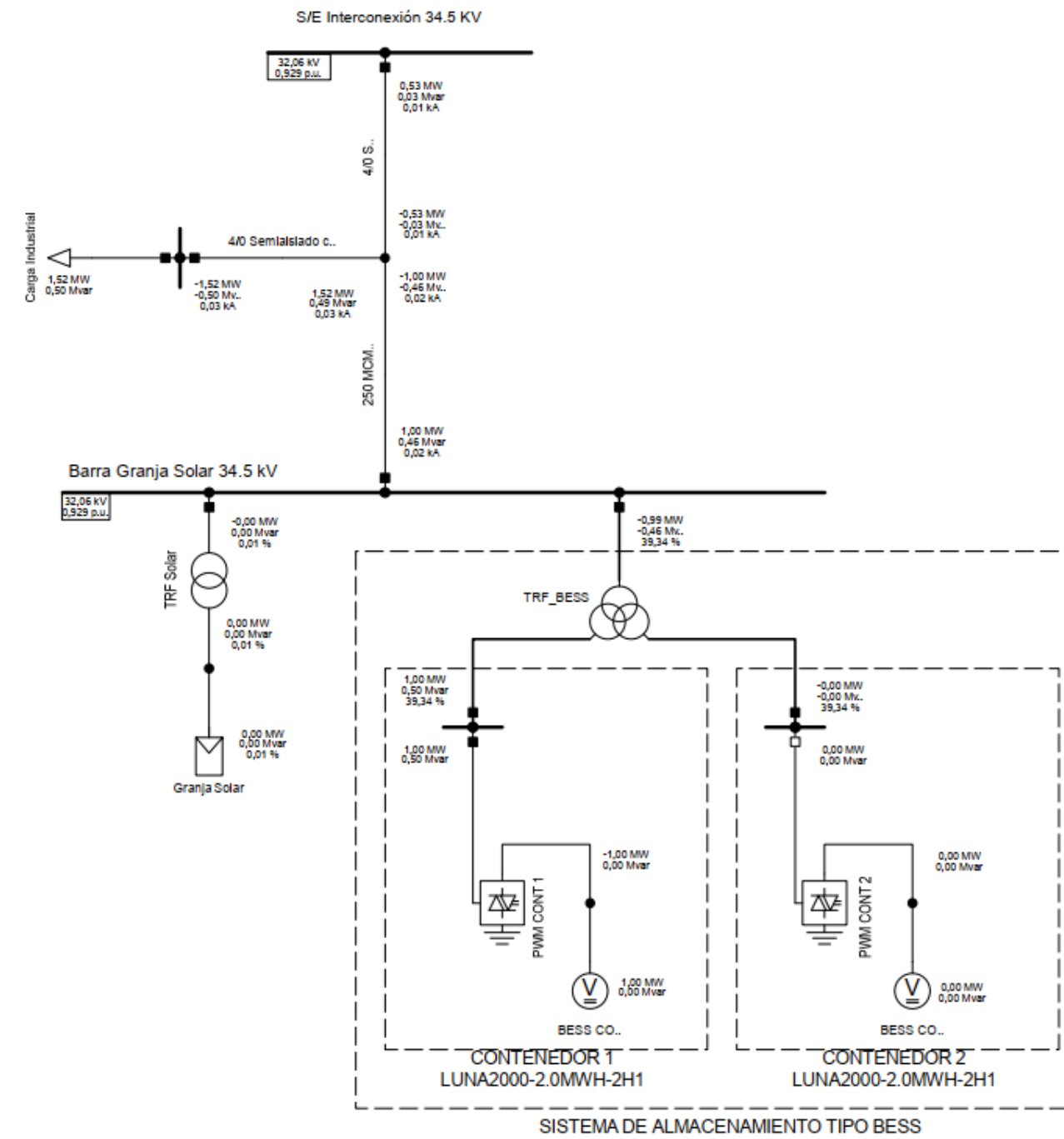




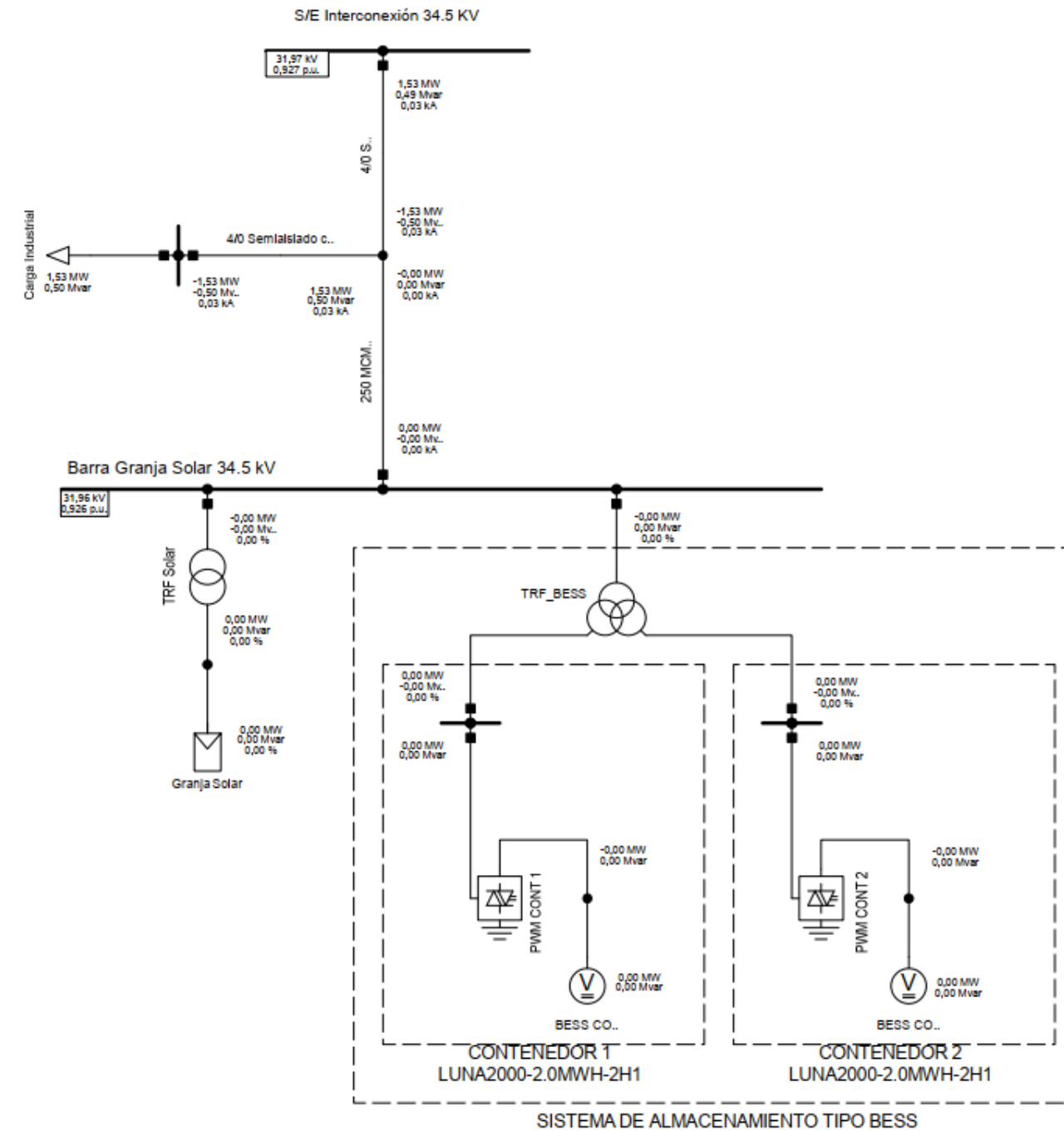
PowerFactory 2022 SP1	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TIPO BESS		Project:
	FLUJO DE CARGA		Graphic: TGRADO
	ESTADO DE RED PROYECTADA		Date:
	CARGA DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO		Annex:



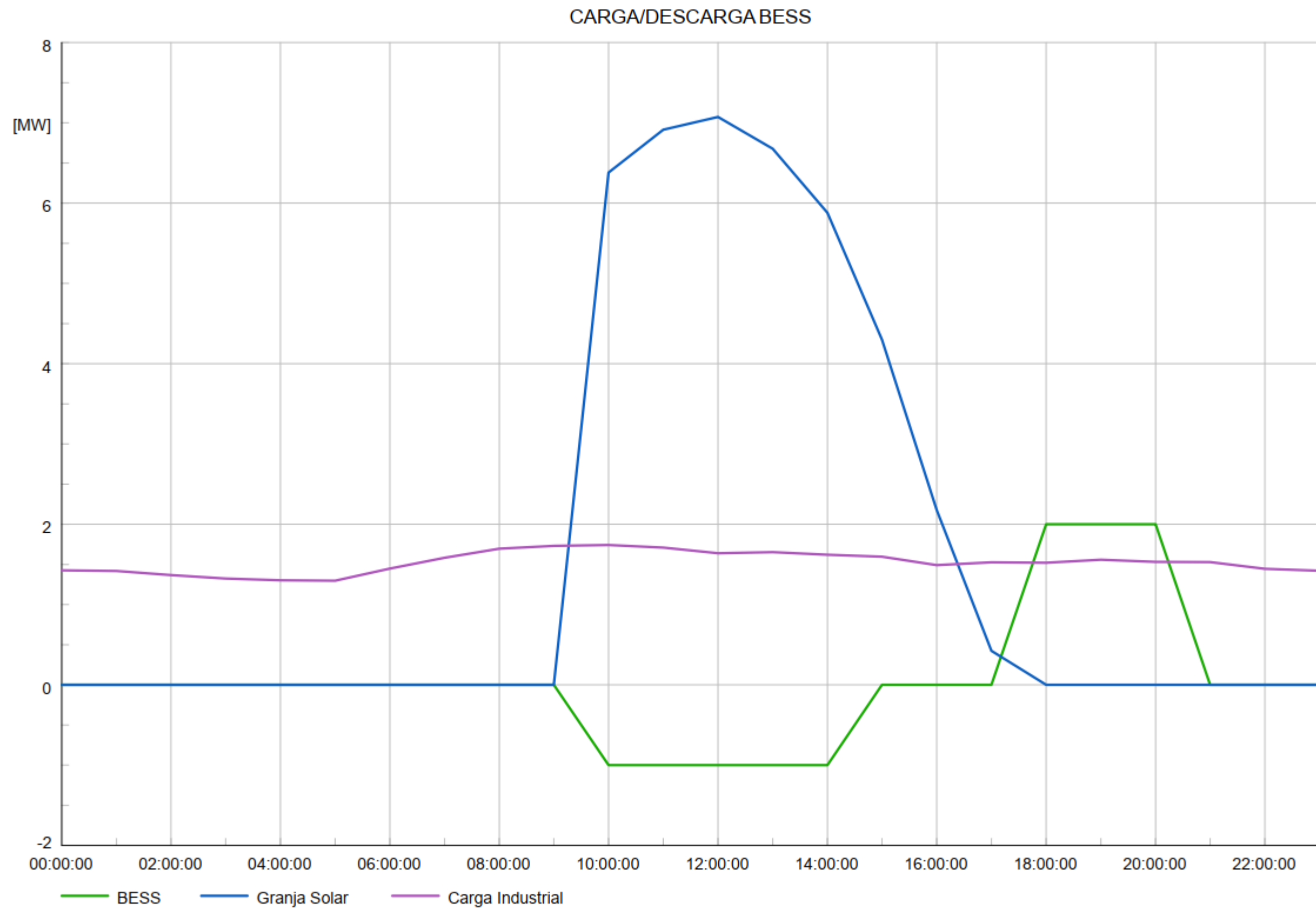
PowerFactory 2022 SP1	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TIPO BESS	Project:
	FLUJO DE CARGA	Graphic: TGRADO
	ESTADO DE RED PROYECTADA	Date:
	DESCARGA DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO	Annex:



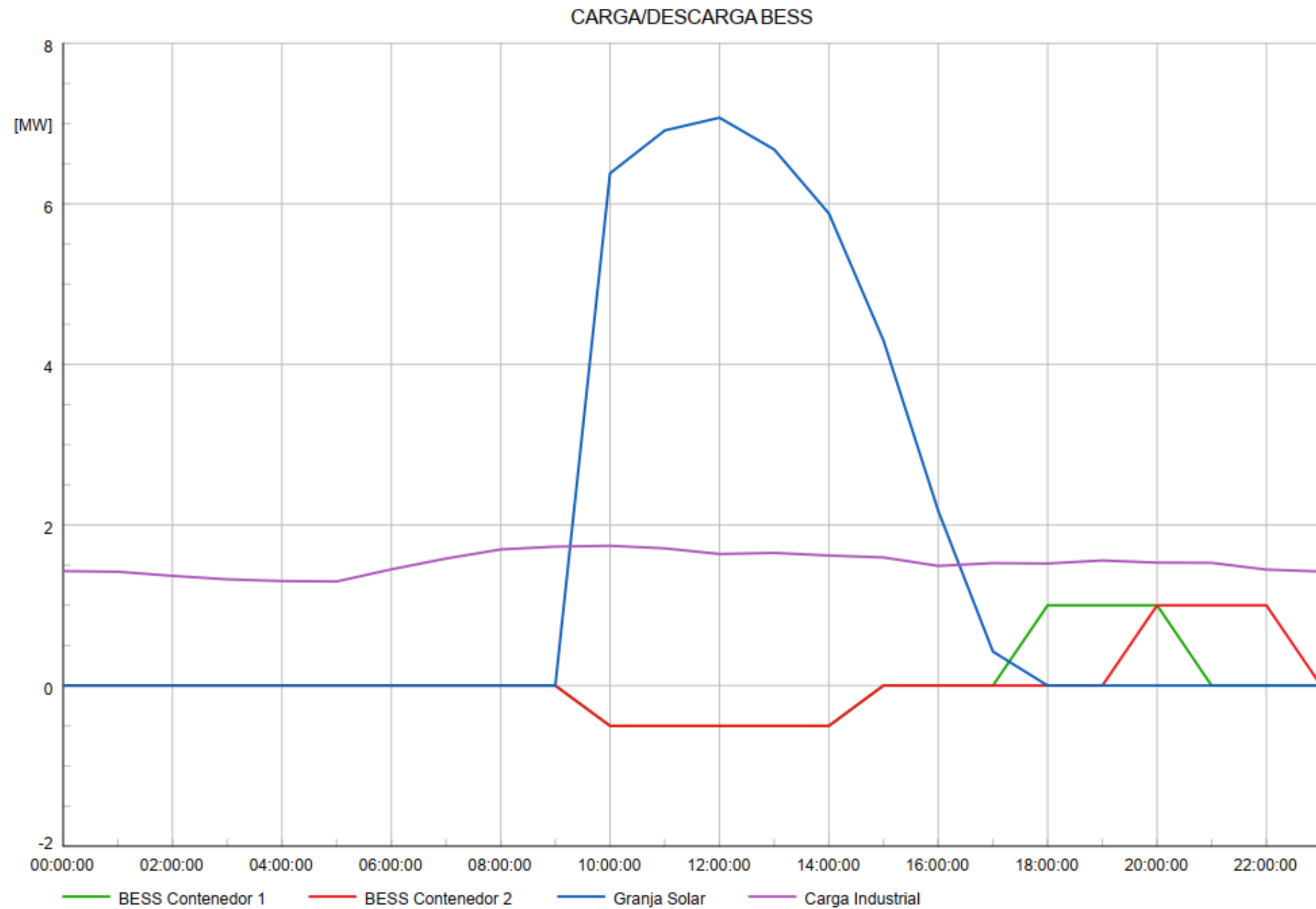
PowerFactory 2022 SP1	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TIPO BESS	Project:
	FLUJO DE CARGA	Graphic: TGRADO
	ESTADO DE RED PROYECTADA	Date:
	DESCARGA DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO	Annex:



PowerFactory 2022 SP1	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TIPO BESS	Project:
	FLUJO DE CARGA	Graphic: TGRADO
	ESTADO DE RED PROYECTADA	Date:
	SIN GRANJA - SIN ALMACENAMIENTO	Annex:

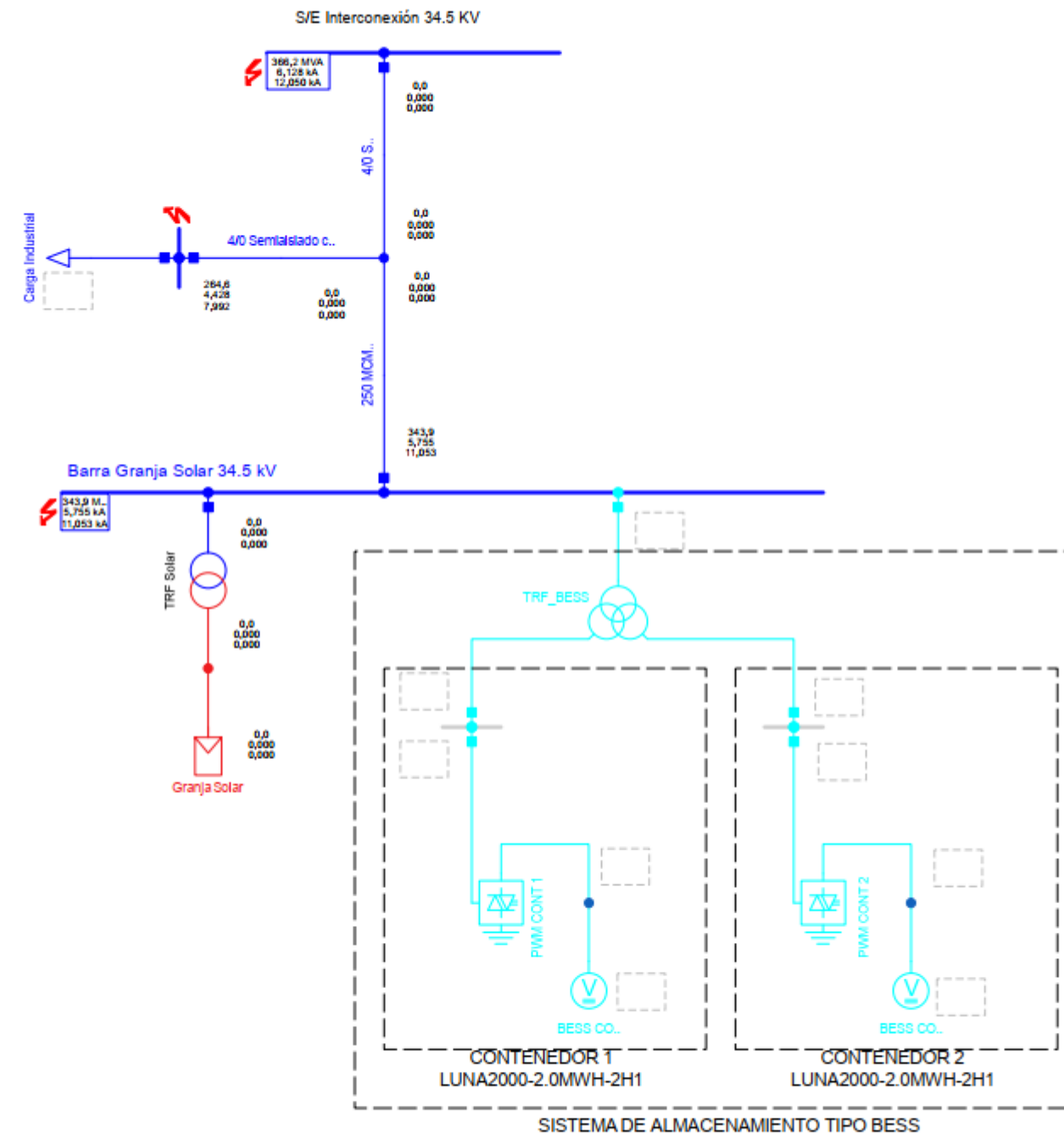


ESCENARIO 1 - CARGA / DESCARGA BESS		Graficas	Date:
CARGA BESS 2 MW /4 MWh	DESCARGA 2 MW /4 MWh (DOS CONTENEDORES 1 MW /2 MWh)		Annex:

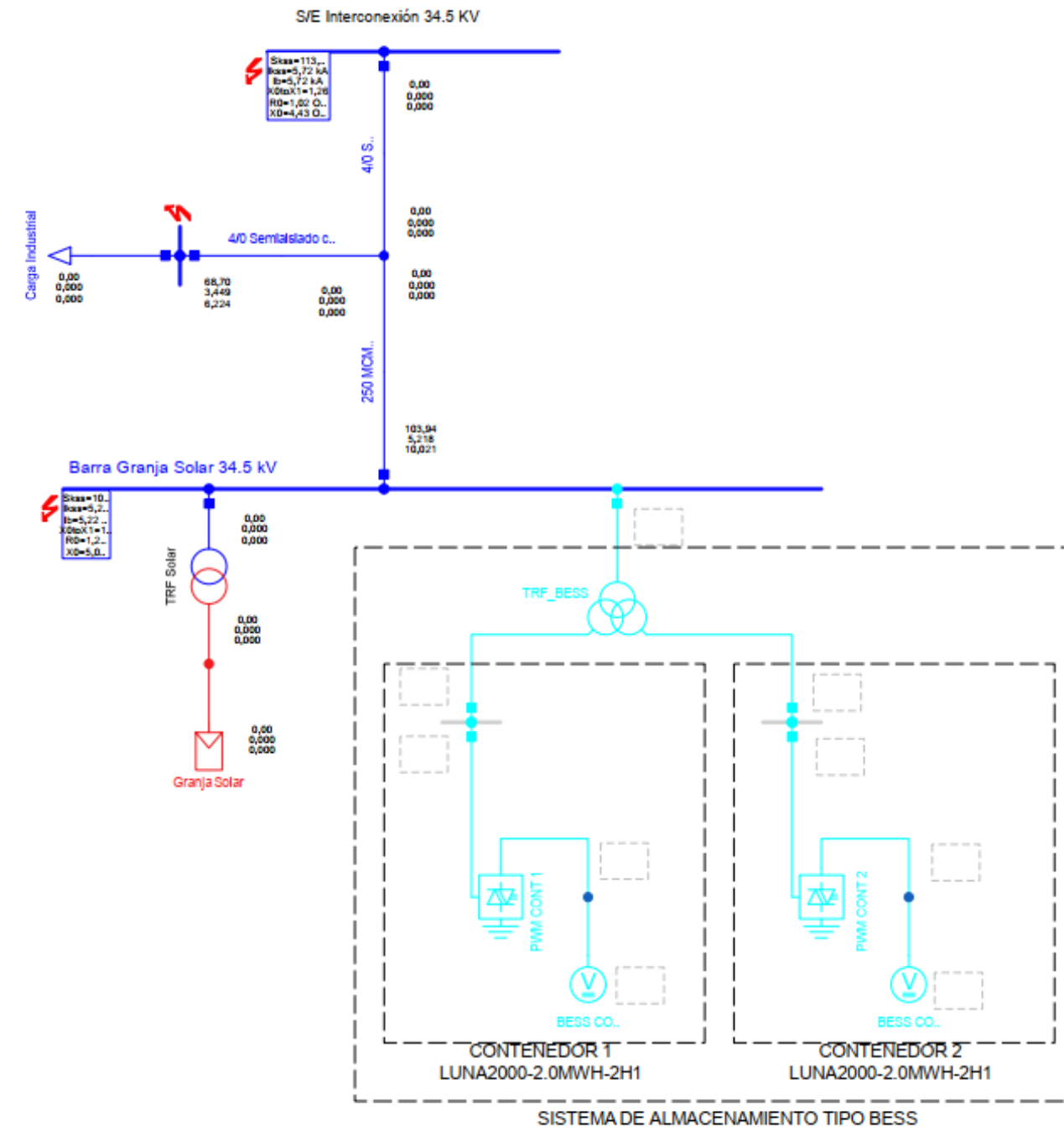


ESCENARIO 2 - CARGA / DESCARGA BESS		Graficas	Date:
CARGA BESS 1 MW /2 MWh	DESCARGA 1 MW /2 MWh (DOS CONTENEDORES 1 MW /2 MWh)		Annex:

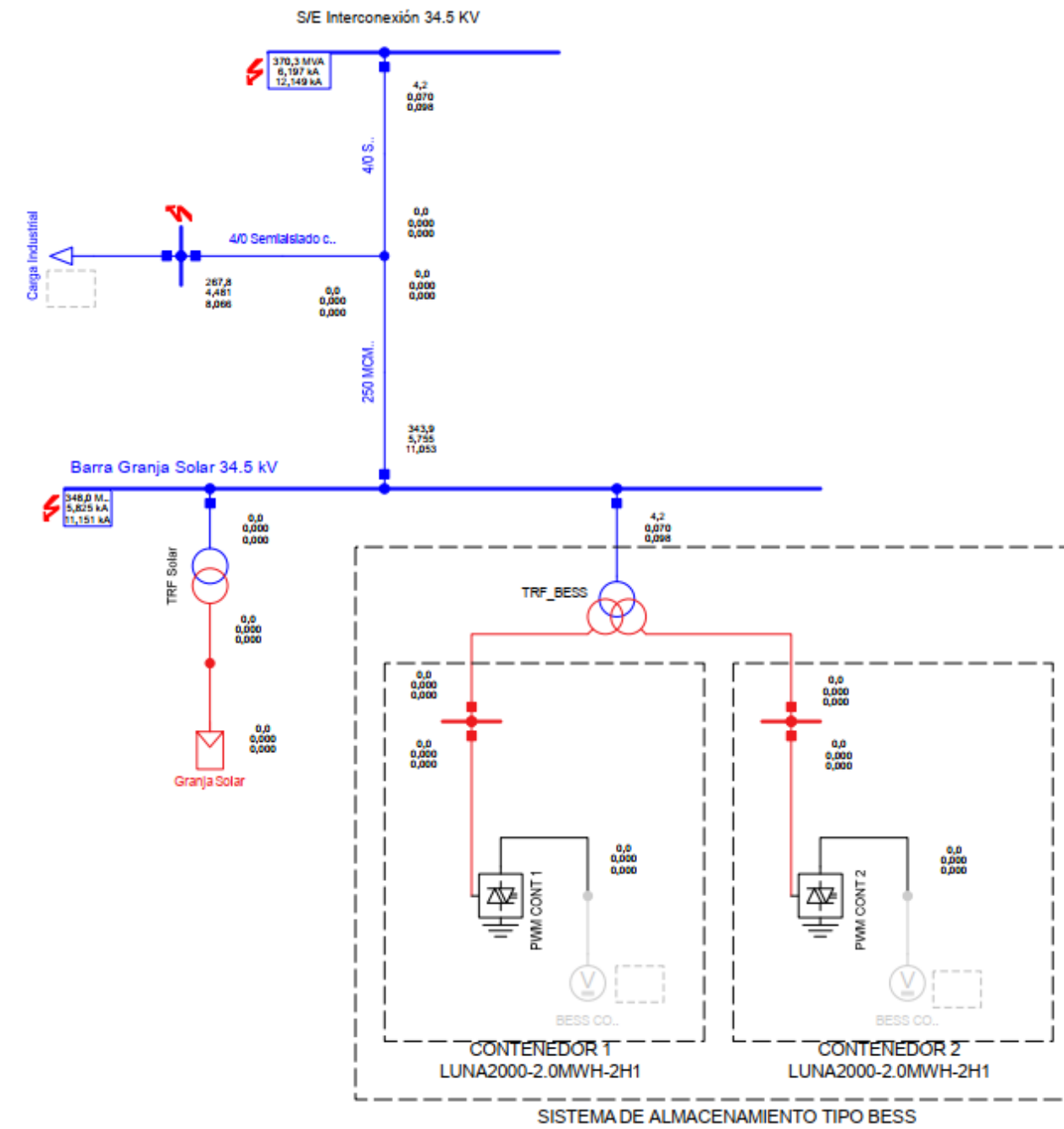
Anexo 4. Resultados cortocircuito



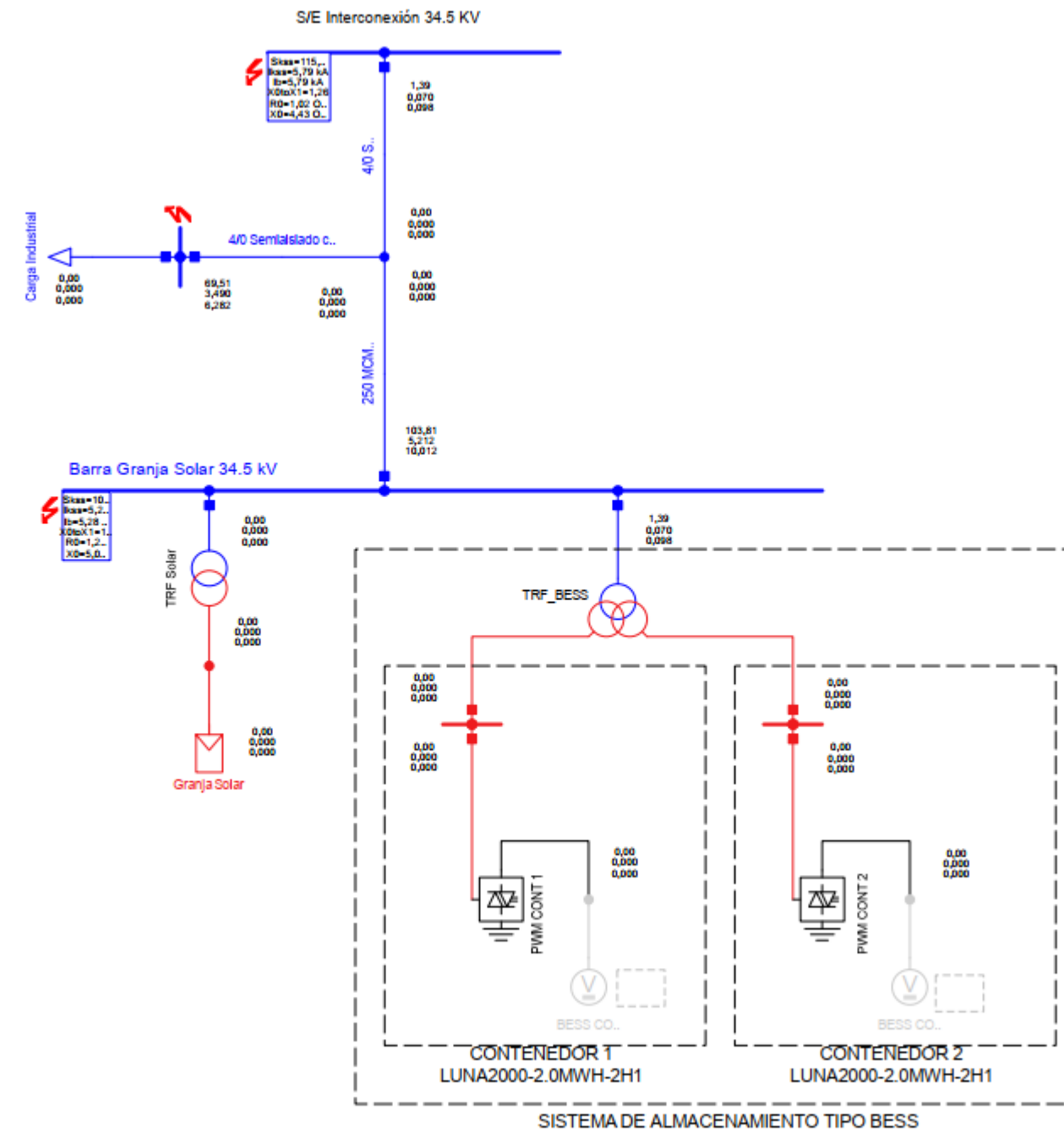
PowerFactory 2022 SP1	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TIPO BESS	Project:
	CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO	Graphic: TGRADO
	ESTADO DE RED ACTUAL - GENERACIÓN MAX	Date:
	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO OFF	Annex:



PowerFactory 2022 SP1	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TIPO BESS	Project:
	CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO	Graphic: TGRADO
	ESTADO DE RED ACTUAL - GENERACIÓN MAX	Date:
	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO OFF	Annex:

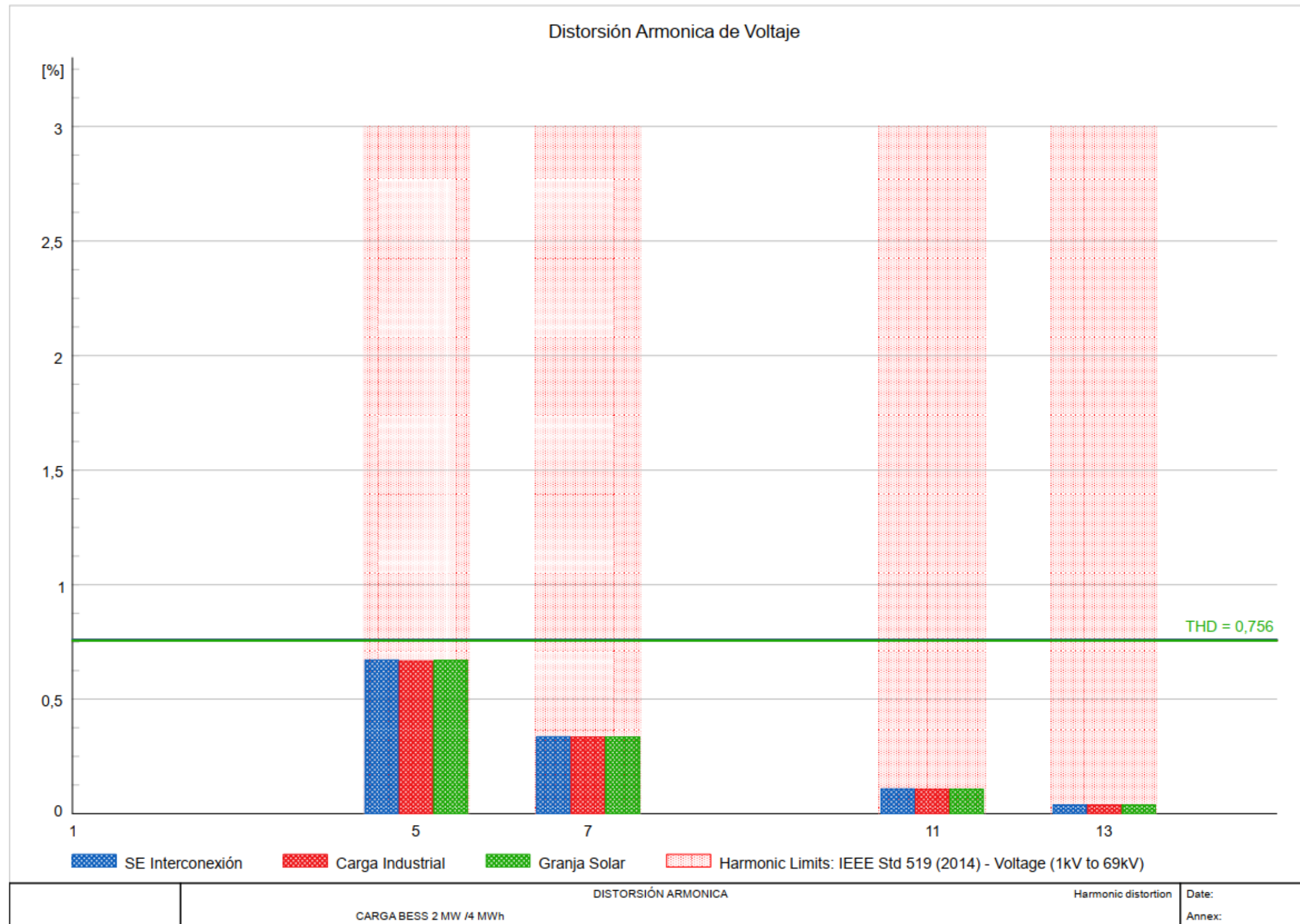


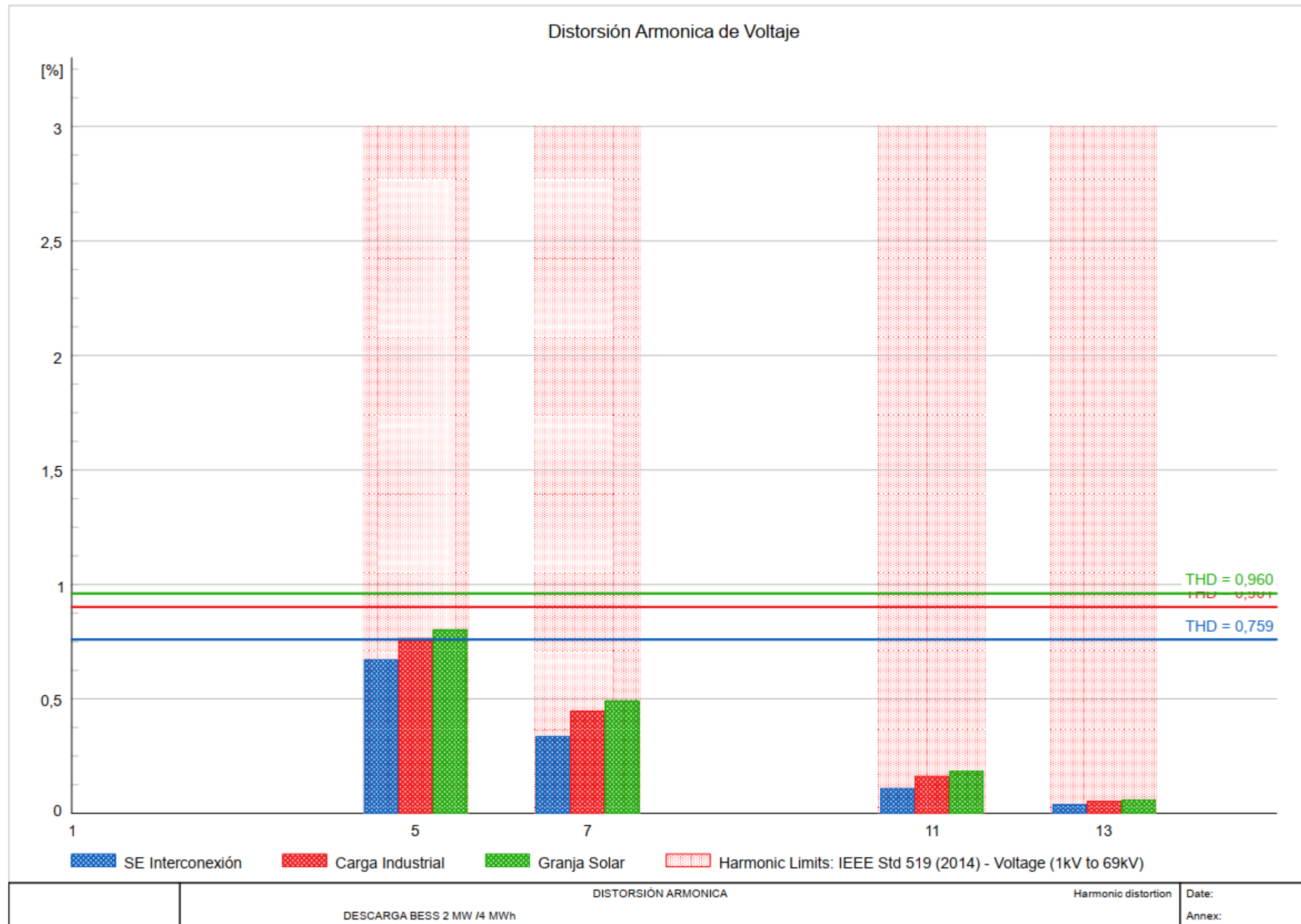
PowerFactory 2022 SP1	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TIPO BESS	Project:
	CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO	Graphic: TGRADO
	ESTADO DE RED PROYECTADA - GEN MAX	Date:
	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO ON	Annex:



PowerFactory 2022 SP1	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TIPO BESS	Project:
	CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO	Graphic: TGRADO
	ESTADO DE RED PROYECTADA - GEN MAX	Date:
	SISTEMA DE ALMACENAMIENTO ON	Annex:

Anexo 5. Resultados análisis de armónicos





Anexo 6. Matriz de impactos ambientales para sistemas de almacenamiento tipo BESS

		Materias primas	Implementación	Operación	Fin de vida Útil
Aire	Impactos	- Emisión de gases invernadero atribuibles a la extracción de litio ² . - Desgaste en la capa de ozono en la elaboración del aluminio para el cátodo ³ .	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	Liberación de químicos que aumentan el potencial de oxidación fotoquímica ³ .	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.
	Valor impactos	-6/+6	0/0	-6/+6	0/0
	Riesgos	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.
	Plan de contingencia	-	-	-	-
Agua	Impactos	Potencial de eutrofización positivo en la elaboración de acero laminado ³ .	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.
	Valor impactos	-3/+3	0/0	-6/+6	0/0
	Riesgos	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	Lixiviados corrosivos que pueden afectar aguas superficiales y subterráneas
	Plan de contingencia	-	-	-	Verificar la composición de los lixiviados antes de descartarlos
Suelo	Impactos	Acidificación producida por la elaboración del cátodo ³ .	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	El reciclaje o reutilización de litio reduce la demanda de material virgen y retarda el agotamiento de recursos ⁴ .
	Valor impactos	-5/+3	0/0	-6/+6	+6/+3
	Riesgos	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	Su degradación deja metales pesado y componentes tóxicos en el suelo.
	Plan de contingencia	-	-	-	Llevar los metales a un centro de reciclaje certificado.
Flora y fauna	Impactos	Litio elemental es inflamable y muy reactivo ⁵ .	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	El reciclaje o reutilización de litio reduce la demanda de material virgen y retarda el agotamiento de recursos ⁴ .
	Valor impactos	-6/+3	0/0	-6/+6	-6/+3
	Riesgos	Potencial toxicidad ecológica al extraer y procesar metales ³ .	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.
	Plan de contingencia	Revisar que las normas de seguridad sean cumplidas y tener personal capacitado para la prevención desastres ecológicos.	-	-	-
Personas	Impactos	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.	Toxicidad de los gases que emite ³ .	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.
	Valor impactos	0/0	0/0	-4/+2	0/0
	Riesgos	Riesgo de cáncer ocupacional en la extracción de metales.	En caso de contacto directo con el litio puede producir graves irritaciones y quemaduras en la piel y los ojos.	Pueden explotar en caso de sobrecalentamiento.	No se ha encontrado información de impactos de algún tipo.
	Plan de contingencia	Deben existir medidas de seguridad apropiadas para evitar cualquier clase de riesgo a los trabajadores.	Seguir procedimiento de instalación de baterías entregado por el fabricante.	Monitoreo continuo de la temperatura ambiental de donde se ubican las baterías y la temperatura de estas.	-

² Zackrisson M., “Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles – Critical issues”, Journal of cleaner production 18 (2010), 1519-1529.

³ U.S Environmental Protection Agency, “Application of life-cycle assessment to nanoscale technology: Lithium-ion batteries for electric vehicles”, Abril 2013.

⁴ Gaines L., “Lithium-ion Batteries: Advances and applications” (2014), 483-508.

⁵ Hall P., “Energy-storage technologies and electricity generation”, Energy Policy 36 (2008), 4352- 4355.