

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<https://dx.doi.org/10.14482/inde.40.02.627.001>

# Una propuesta metodológica para la evaluación de la condición en sistemas de almacenamiento de energía con baterías (BESS) utilizando KPIs

*A methodological proposal for condition assessment in battery energy storage systems (BESS) using KPIs*

JAVIER ROSERO GARCÍA \*

RODOLFO GARCÍA SIERRA \*\*

ANDRÉS FELIPE CERÓN \*\*\*

ANDRÉS FELIPE ZUÑIGA \*\*\*\*

\* Universidad Nacional de Colombia (UNAL). Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería eléctrica y electrónica. Bogotá, Colombia.  
Doctor en Ingeniería Electrónica. Ingeniero electricista.  
jaroserog@unal.edu.co Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0003-2690-4772> .

\*\*Enel Codensa. Observatorio de Innovación. Bogotá, Colombia.  
Doctor en Ingeniería, Ingeniero Electricista y de Telecomunicaciones.  
rodolfo.garcia@enel.com Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-3892-6189> .

\*\*\*Ingeniería Creativa (ICREA). Investigador Freelance. Cali, Colombia.  
Doctor en Ingeniería eléctrica, Ingeniero Electricista.  
andres.f.ceron@gmail.com Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-4820-776X> .

\*\*\*\*Ingeniería Creativa (ICREA). Investigador Freelance. Cali, Colombia.  
Magister en Ingeniería Eléctrica, Ingeniero Electricista.  
anfezuca@gmail.com Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-6293-6555> .

**Correspondencia:** Javier Rosero García, cra 30 45-03 edificio 453 ofi 208, Colombia.



## Resumen

Las baterías de iones de litio se han utilizado en diversas aplicaciones de la electrónica de consumo y su alta eficiencia ha permitido su uso en el sector energético, especialmente en proyectos de movilidad eléctrica y aplicaciones de almacenamiento en sistema de potencia. Por esta razón, obtener una estimación de su condición de operación es relevante para garantizar confiabilidad en la red eléctrica. Este trabajo presenta una metodología de evaluación de la condición en sistemas de almacenamiento con baterías (*Sistemas de almacenamiento con baterías* BESS) a través de indicadores claves de rendimiento (*Indicadores claves de rendimiento* KPIS). Este enfoque sirve de guía a las empresas energéticas y propietarios para tomar decisiones durante el ciclo de vida del sistema. Esta metodología se implementa en una herramienta computacional denominada RENOBAT, que facilita el monitoreo de la condición del BESS considerando la información de diseño, construcción y operación.

**Palabras Claves:** Indicadores Claves de Rendimiento KPIS, Redes inteligentes, Sistema de Almacenamiento con Baterías BESS.

## Abstract

Lithium-ion batteries have been used in consumer electronic applications, and its high efficiency has allowed for its use in the energy sector, especially in electric mobility and energy storage connected to a power system. For this reason, to calculate its operation condition is important to assure electric system reliability. In this work, a methodological proposal for the condition evaluation of battery energy storage systems (BESS) through key performance indicators (KPIs) is presented. This approach is useful for energy utilities companies, BESS owners, and operators for life cycle management. This methodological proposal is implemented on a software tool named RENOBAT, which facilitates BESS systems condition monitoring due to its design, construction, and operational data.

**Keywords:** Battery Energy Storage System BESS, Key Performance Indicators KPIs, Smart Grids.

## INTRODUCCIÓN

En el contexto de transformación energética e integración de fuentes no convencionales, las soluciones BESS toman relevancia, en especial, las baterías con tecnología de iones de litio son las más utilizada a nivel mundial [1]. La alta eficiencia y densidad de energía son características técnicas que contribuyeron al salto de la electrónica de consumo a nuevas aplicaciones como: Movilidad eléctrica, electrificación de áreas rurales, aplicaciones en redes eléctricas de distribución, transmisión y sistemas de generación [2]. No obstante, las baterías están evolucionando rápidamente y no se dispone de métodos estandarizados que respalden la evaluación de su funcionamiento. Las empresas de servicios públicos, los operadores de sistemas de distribución y los usuarios finales buscan datos accesibles y confiables para determinar el rendimiento y la condición técnica del sistema. Ante esta eventualidad, los propietarios y operadores de sistemas BESS requieren de herramientas metodológicas que sintetizan la condición en indicadores de rendimiento.

Con base en una revisión de la literatura, se seleccionan y definen indicadores KPIs y se propone una metodología que permita evaluar la condición y efectuar un seguimiento continuo para la toma de decisiones en proyectos BESS. La metodología propuesta es implementada en una herramienta de software denominada RENOBAT; el software considera los datos técnicos de diseño del sistema de baterías y la información operacional de un sistema con datos operacionales simulados.

## ESTADO DEL ARTE

Las tecnologías de almacenamiento de energía se clasifican en: Electroquímica, química, electromecánica, sistemas de bombeo y térmica. Las baterías de iones de litio son las utilizadas en proyectos de almacenamiento con aplicación en redes eléctricas de distribución y transmisión [1]. El informe de la Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA) en el 2020 indicó que más del 90% de los sistemas de almacenamiento funcionaban con este tipo de tecnología [1].

### Baterías de Litio

El principio físico de las baterías de litio se basa en el intercambio reversible de iones entre un cátodo de óxido metálico y un ánodo de grafito (esta es la configuración más frecuente). Durante la fase de carga, los átomos de litio liberan un electrón y migran al ánodo de carbono, durante la fase de descarga el fenómeno transcurre de forma contraria. Los compuestos químicos de las baterías de iones de litio comprenden también óxido de cobalto de litio, óxido de litio, manganeso, entre otros [3]. Este tipo

de batería es muy popular en distintas aplicaciones como son los vehículos eléctricos y productos electrónicos de consumo [4].

## Componentes de un sistema BESS interconectado a la red eléctrica

Las partes principales de un sistema BESS se representan en la Figura 1 y se definen a continuación:

### *Sistema de Baterías.*

Conformado por celdas agrupadas en módulos, paquetes, racks y bancos de baterías [5].

- *Sistema de gestión de batería (BMS Battery Management System).*

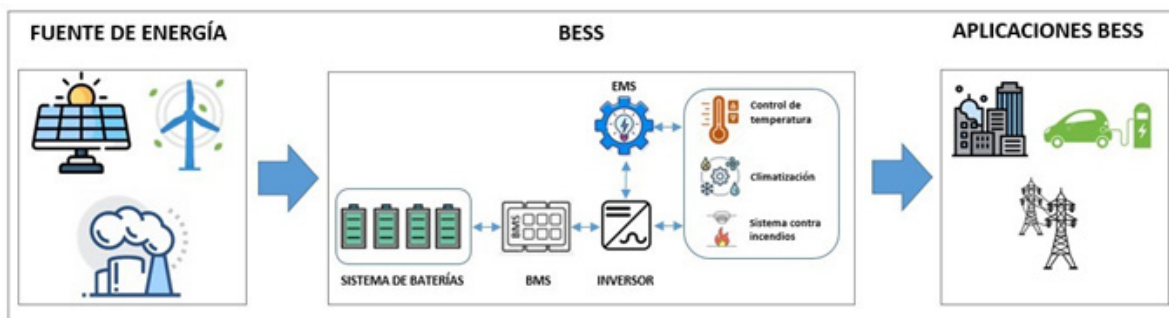
Registra variables del sistema de baterías, a partir de estas calcula magnitudes derivadas como el estado de carga (SOC) y el estado de salud (SOH) [5].

- *Inversor (PCS Power Conversion System).*

Todos los sistemas de almacenamiento tienen inversores bidireccionales que permiten tanto la carga como la descarga, el inversor transforma el voltaje continuo de las baterías en voltaje alterno, permitiendo la interconexión a la red eléctrica [5].

- *Sistema de gestión de energía (EMS Energy Management System).*

- El sistema EMS registra y analiza datos de energía coordinando la operación del sistema de gestión de batería (BMS) y el inversor (PCS) [5].



Fuente: Autores.

**FIGURA 1.** ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA DE LA BATERÍA

La estimación de estados y características de la batería con alta precisión requiere algoritmos confiables y modelos matemáticos construidos dentro del desarrollo del software BMS [6]–[9].

## Aplicaciones sistemas BESS

Las aplicaciones de los sistemas BESS se agrupan en cinco categorías [2]:

- a. **Servicios auxiliares:** Son funciones que ayudan a los operadores de la red a mantener el sistema de potencia estable durante eventos de desbalances energéticos como estabilidad de voltaje, regulación de frecuencia, arranque autógeno y capacidad operativa en modo isla.
- b. **Calidad de la energía:** Se refiere a las mejoras en calidad del suministro en los sistemas de potencia. Los problemas más comunes incluyen: interrupción del suministro, distorsión armónica de tensión y corriente, sobretensiones o hundimientos, transitorios y parpadeos [10]–[12].
- c. **Desplazamientos energéticos:** Aplicación en la cual los sistemas BESS se utilizan para almacenar energía obtenida en los períodos de menor demanda (cuando es menos costosa) y luego se suministra durante los períodos de máxima demanda de energía (cuando su precio es más alto). También se observa en aplicaciones a largo plazo como nivelación de carga [13], reducción de picos [14]–[16], arranque en negro [17] y reserva no giratoria [18].
- d. **Aplicaciones al usuario final:** Se refiere a aplicaciones de gestión de la energía utilizadas por clientes residenciales e industriales. La tarifa de energía diferenciada en muchos países puede ayudar a los usuarios a gestionar la energía almacenada.
- e. **Aplicaciones en el nivel de transmisión y distribución [19]–[21]:** Son aquellas que permiten abordar los desequilibrios entre la generación y el consumo, permitiendo restaurar el sistema después de una perturbación.

## Gestión de datos y evaluación de la condición en sistemas BESS

En el caso de los BESS, el sistema requiere sensores en todos los niveles de agrupación de las baterías y componentes principales (celda, módulo, rack, banco, inversor) [2]. Esta instrumentación genera un gran volumen de información operacional, además, se generan variables secundarias y/o no físicas como indicadores de estado y variables de control.

Fortalecer las estrategias de monitoreo continuo y mantenimiento predictivo, se vislumbran como las acciones para detectar de forma temprana condiciones anómalas que puedan conducir a fallas en cascada y el consecuente daño total de los sistemas BESS. Por tal razón, es importante sintetizar y ordenar la gran cantidad de datos en una colección de indicadores KPIs [22]. Los indicadores KPIs en proyectos BESS se utilizan como variables sintéticas que proporcionan una descripción general del funcionamiento y cuantifican su envejecimiento.

En [22] se evalúan cuatro categorías de KPIs. En la primera categoría se estudian los indicadores operativos a través del estado de carga y el balance; en la segunda categoría se proponen variables de eficiencia y una cuantificación de la disponibilidad; en la tercera categoría se cuantifica el envejecimiento de las baterías a través del número de ciclos y el estado de salud. Finalmente, en la cuarta categoría se presenta un análisis sobre la gestión térmica del BESS. Los KPIs se implementan y se explican desde un punto de vista crítico, aprovechando la estadística a grandes volúmenes de datos, incluso los datos con cálculos sencillos pueden conducir resultados satisfactorios.

En el año 2017 la firma consultora DNV realiza una descripción detallada y presenta métodos de cálculo para variables operacionales de los sistemas de almacenamiento BESS. El análisis de los datos operacionales y el monitoreo de la condición son los factores relevantes para aplicar las técnicas de mantenimiento predictivo [23].

En [24] Smith *et al.* define un método de prueba para evaluar el funcionamiento y la salud de sistemas de almacenamiento BESS interconectados a la red. El procedimiento está dividido en pruebas de funcionamiento de referencia, las cuales requieren que el sistema sea puesto en modo de ensayo, y pruebas de monitoreo en tiempo real.

En el año 2019 la IEEE publicó una guía para operación y mantenimiento de sistemas BESS incluyendo aspectos de ingeniería, identificación de parámetros técnicos claves y aplicación de requerimientos prácticos [25].

En [26] se desarrolla y evalúan los KPIs y el uso de baterías de litio en aplicaciones de control de frecuencia. Los indicadores de funcionamiento seleccionados son: tiempo de respuesta y eficiencia. Además, se presenta un análisis avanzado de algunos sistemas de almacenamiento incorporando técnicas de analítica de datos.

En [27] Karoui *et al.* desarrollan un análisis de 4 sistemas solares fotovoltaicos con almacenamiento monitoreado por 3 años con el fin de diagnosticar y pronosticar el comportamiento. La herramienta permite recopilar, procesar y extraer los factores de funcionamiento utilizando técnicas estadísticas. Adicionalmente, se proponen 5 familias de indicadores: Operacionales IDO, de estado IDE, de solicitudes IDS, de funcionamiento IDP, de comparación IDC.

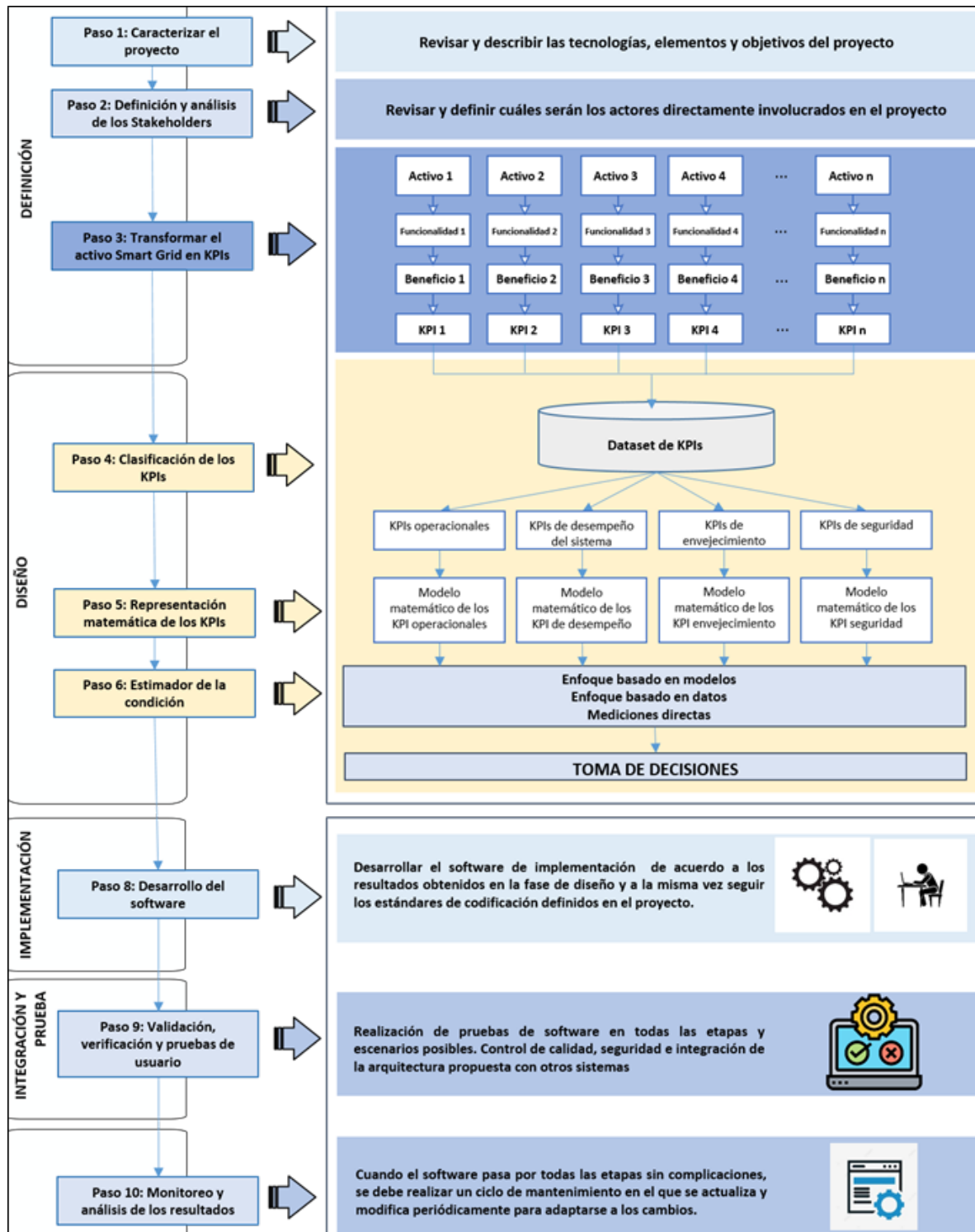
En [28] se presenta un análisis de modos de fallas y efectos (FMEA *Failure Mode and Effects Analysis*) y un análisis de seguridad del sistema (SSA *System Safety Analysis*), este estudio considera la probabilidad, severidad y riesgo de los diversos modos de falla presentados en los sistemas BESS

## METODOLOGÍA

Los proyectos BESS están compuestos por hardware, software, procesos, procedimientos, políticas y actores, cada uno de estos factores se debe analizar de forma holística. Por esta razón, se propone un marco metodológico que permita tener una visión general del BESS y describir las etapas y tareas involucradas en cada fase. De manera general, cualquier sistema incluye las fases de análisis de requisitos, diseño/planificación, prueba, implementación y operación. Tomando como referencia la investigación presentada en [29], la propuesta metodológica se divide en cinco fases con 10 pasos.

Los cambios innovadores se realizan en la fase de “Definición” y “Diseño” del ciclo de vida de un sistema. En la fase de “Definición” se caracteriza el proyecto, se transforma el activo en KPIs para brindar un adecuado flujo de información en cada área y se identifican las partes interesadas, intereses y objetivos. En la fase de “Diseño” se propone un método de evaluación de condición para sistemas BESS con base a los métodos presentados.

En las fases “Implementación” e “Integración y prueba” se encuentra el desarrollo realizado con la herramienta computacional. Finalmente, en la etapa “Operación y Mantenimiento” se presenta un monitoreo y análisis del proyecto BESS. El diagrama de flujo de la metodología propuesta se presenta en la Figura 2.



Fuente: Autores.

**FIGURA 2.** METODOLOGÍA PROPUESTA PARA DETERMINACIÓN DE LOS KPIs SISTEMAS BESS.



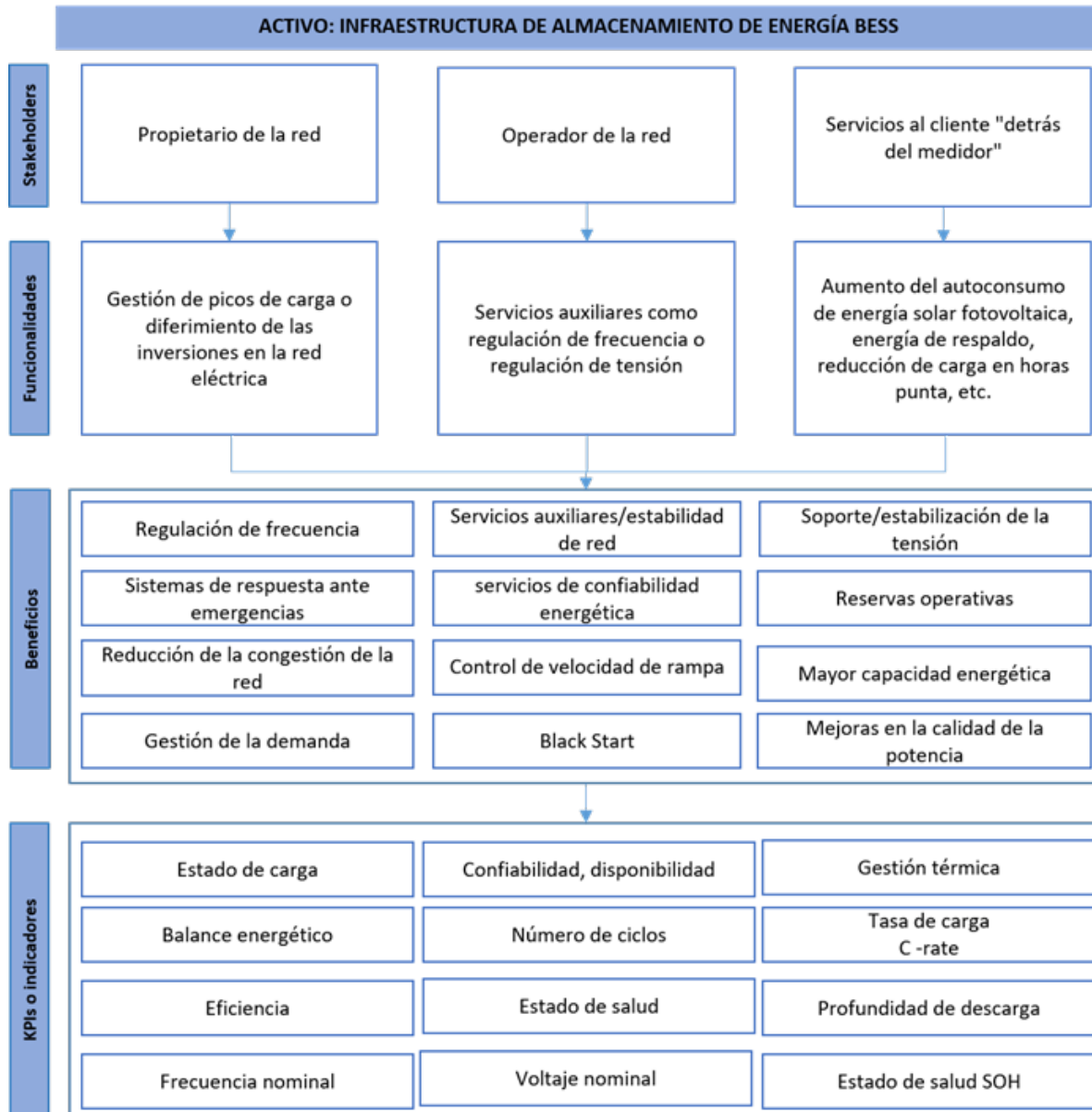
A continuación, se desarrollan los pasos metodológicos para el análisis de los proyectos BESS y definición de los KPIs.

### **paso 1. revisión y descripción de las tecnologías, elementos y objetivos del proyecto.**

En la fase de definición se presenta un resumen general del proyecto, las tecnologías disponibles, los elementos y los objetivos [30]. “El objetivo del proyecto bajo análisis es la implementación de un Sistema BESS como complemento para la regulación primaria de frecuencia en 4 unidades de una central termoeléctrica. Por medio de este proyecto la empresa de generación de energía incrementará la capacidad neta de sus unidades en un porcentaje cubierto por el BESS, de tal manera que para el sistema interconectado nacional (SIN) sea transparente dicho incremento de potencia en lo referente a la regulación primaria”.

### **Paso 2 y 3. Definición de las partes interesadas y transformación del activo de la red inteligente BESS en KPIs.**

Este paso se divide en 4 partes y considera el análisis de varios aspectos fundamentales para el proyecto bajo estudio, en este caso en particular los sistemas BESS [31]. Los aspectos analizados son: Actores o involucrados del proyecto, funcionalidades, beneficios y definición de KPIs o indicadores. En la Figura 3 se presentan estas etapas.



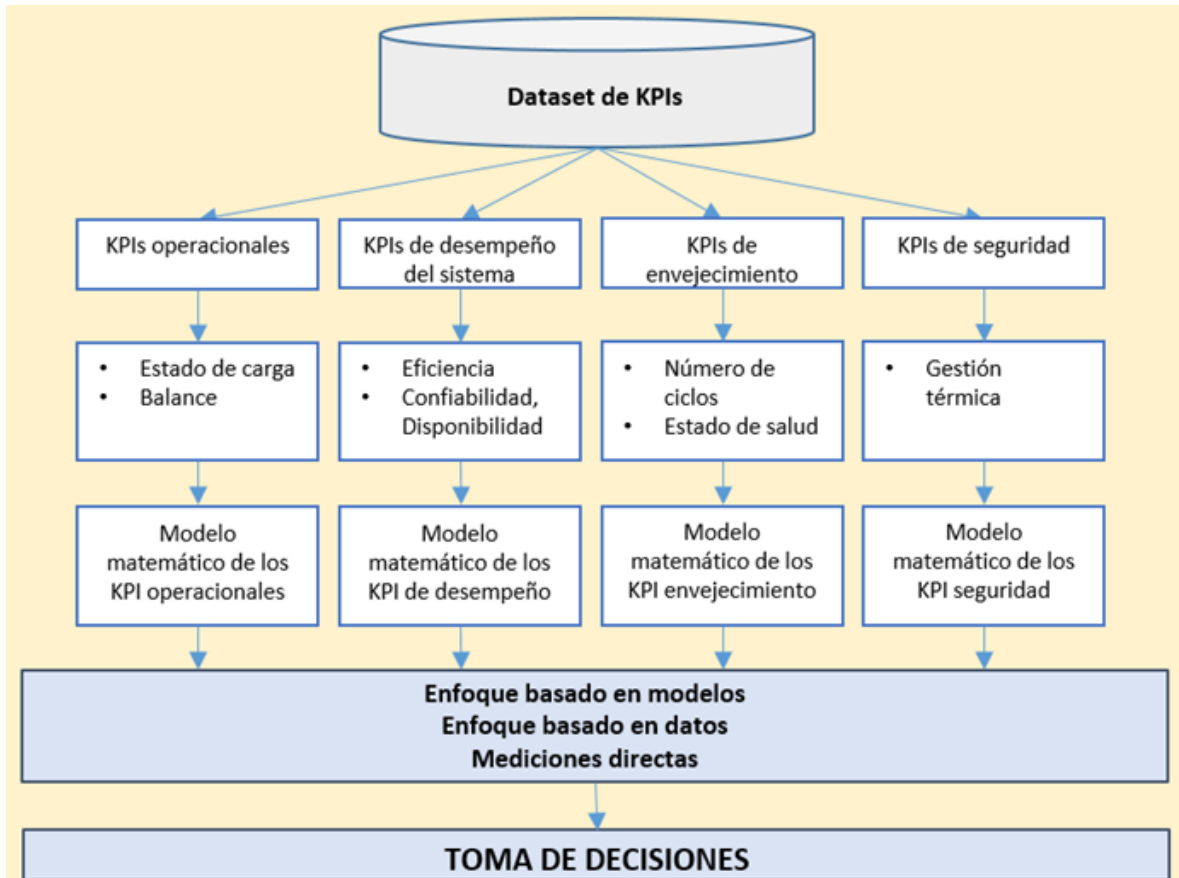
Fuente: Autores.

**FIGURA 3.** SELECCIÓN DE ACTORES Y TRANSFORMACIÓN DE LOS ACTIVOS SMART GRID EN KPIs

### Paso 4, 5 y 6. Clasificación, representación matemática de los KPIs y estimador de la condición del proyecto BESS

En [32] Echeverri-Martínez *et al.* realiza una clasificación de los KPIs (ver Figura 4.). Posteriormente, se hace una representación de las ecuaciones matemáticas de los

indicadores. Las ecuaciones se toman de [22]. Finalmente se estima la condición del proyecto BESS.



Fuente: Autores.

FIGURA 4. MODELO DE CLASIFICACIÓN DE KPIs Y MODELO ESTIMADOR DEL ESTADO

#### ■ Selección de variables

La Tabla 1 presenta los KPIs para la evaluación de la condición de sistemas BESS sugeridos en las referencias estudiadas.

**TABLA 1.** INDICADORES KPIs PARA LA EVALUACIÓN DE CONDICIÓN Y MONITOREO DE SISTEMAS BESS

KPIs	Métodos					
	1 [25]	2 [24]	3 [22]	4 [26]	5 [27]	6 [28]
Estado de carga State of charge SOC	X	X	X	X	X	
Estado de salud State of health SOH	X		X	X	X	
Voltajes	X		X		X	X
Temperaturas	X		X		X	X
Tasa de carga y descarga C rate	X					
Disponibilidad			X			
Número de ciclos			X			

**Fuente:** Autores.

Los KPIs considerados en este trabajo son: Estado de salud SOH, Número de Ciclos, Estado de carga SOC, Balance de voltaje, Tasa de Carga/Descarga, Gestión térmica.

#### ■ Representación matemática de los KPIs

Estado de salud SOH: El SOH se puede estimar como la relación entre la capacidad máxima en Ah de descarga ( $Q_{max}$ ) del sistema con relación a su capacidad nominal ( $Q_{nominal}$ ) durante un ciclo de carga descarga definido por los voltajes de circuito abierto  $V_{oc1}$  y  $V_{oc2}$ .

$$SOH = \frac{Q_{max}}{Q_{nominal}} \cong \frac{Q_{max, [V_{oc1}; V_{oc2}]}}{Q_{nominal, [V_{oc1}; V_{oc2}]}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

El SOH determina cuanta vida útil del sistema se ha “consumido” y cuanta capacidad permanece en el sistema. Si bien el SOH es un indicador relativo a las celdas, ya que son estos los elementos que se degradan y pierden capacidad a lo largo del tiempo, el SOH total de un sistema estará asociado a la condición de cada una de las celdas de manera aproximada como un promedio.

Número de ciclos: Los ciclos de operación producen un envejecimiento del sistema que se adiciona al envejecimiento calendario y a la degradación por otros factores como temperatura, corrientes o voltajes operacionales. El número de ciclos se puede estimar considerando la relación entre la energía total de descarga ( $Q_{dis,total}$ ) y la energía de descarga nominal ( $Q_{dis,nominal}$ ) durante un periodo de tiempo determinado.

$$N_{cycles} = \frac{Q_{dis,total}}{Q_{dis,nominal}} = \frac{\int I_{dis}(t)dt}{Q_{dis,nominal}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$n_{cycles} = \frac{Wh_{d,annual}}{E_C}$$

Estado de carga SOC: La siguiente formula representa un método aproximado para estimar el estado de carga SOC basado en el método de conteo de Coulombs. El SOC es el porcentaje de capacidad que está disponible en la batería o sistema para descarga. La capacidad total de carga es expresada en Ah. El 100% de SOC se define como el punto de referencia (capacidad real), hacia el final de vida, aun cuando las baterías estén a 100% de SOC, su capacidad real puede alcanzar el 80%.

$$SOC(t) = SOC_{t=0} + \frac{1}{Q_{max}} \int_0^t I(\tau) d\tau$$

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{i(t) \cdot \Delta t}{Q}, \text{ if } Q \text{ is in Ah} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{P(t) \cdot \Delta t}{Q}, \text{ if } Q \text{ is in Wh}$$

Por lo general, el SOC es una variable calculada por el BMS y el análisis se efectúa a partir de las mediciones de variables eléctricas de las baterías y sus agrupaciones.

Balance de voltajes de celdas: Este factor se determina de forma porcentual como la variación de los voltajes de las celdas con relación al valor promedio, la disparidad de voltajes en celdas conectadas en serie puede afectar la capacidad del sistema para entregar energía y degradar aceleradamente las celdas que operan fuera de rango.

$$S_{module}(t)[\%] = \frac{U_{cell,max}(t) - U_{cell,min}(t)}{U_{cell,mean}(t)} \times 100 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Tasa de carga o descarga C RATE: Es un valor que indica la corriente que fluye a través de una batería, indica la tasa a la cual la batería es cargada o descargada. Donde  $I$  es la corriente,  $C$  es la capacidad nominal de la batería,  $h$  es el tiempo de descarga en horas,  $k$  es una fracción o múltiplo de la capacidad nominal.

$$I = kC_h \quad (\text{Ecuación 5})$$

Gestión térmica: La gestión térmica se realiza a través de los resultados registrados de temperatura de las celdas durante su operación y la comparación con los valores de operación recomendados por el fabricante durante los ciclos de operación.

#### ■ Evaluación de la condición de sistemas BESS

En la Figura 5 se presenta un diagrama de flujo para la evaluación de la condición de los sistemas BESS a través de KPIs. Inicialmente los datos técnicos de los componentes del sistema son ingresados, posteriormente se cargan los datos operacionales obtenidos de las mediciones registradas por el sistema BMS, los datos son procesados y se calculan los KPIs.



Fuente: Autores.

FIGURA 5. FLUJOGRAMA PROPUESTO EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN DE SISTEMAS BESS A TRAVÉS DE KPIs

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### Paso 7, 8 y 9. Desarrollo, validación, verificación, pruebas y resultados del software.

En estos pasos se establece un modelo de gestión de activos BESS basado en datos del fabricante y con la capacidad de integrarse a la plataforma de gestión de activos de-

sarrollada por la Universidad Nacional de Colombia. RENOBAT es una herramienta web de monitoreo de sistemas BESS que evalúa a través de indicadores los niveles de voltaje, temperatura, estado de carga (SOC), corrientes, estado de salud (*State of Health*). de las baterías y sus diferentes agrupaciones (celda, módulos, rack, banco). Esta herramienta advierte visualmente al usuario si los indicadores se encuentran fuera del rango establecido por el usuario o el fabricante del equipo.

A través de RENOBAT, los usuarios pueden conocer en tiempo real si existe alguna anomalía en cualquiera de los elementos del sistema BESS y pueden actuar de forma temprana en caso de que el sistema requiera mantenimiento o una intervención no programada. En la Figura 6 se presenta el esquema desarrollado para la herramienta de software.

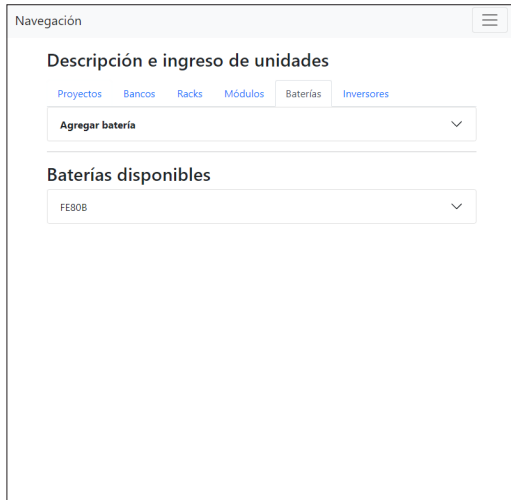


Fuente: Autores.

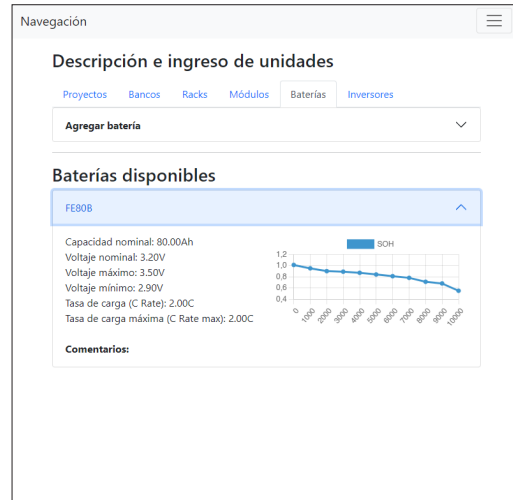
FIGURA 6. ESQUEMA HERRAMIENTA DE SOFTWARE RENOBAT

RENOBAT permite que el usuario agregue un nuevo proyecto con el fin de monitorearlo en tiempo real. Para realizar esto, deberá ingresar determinados parámetros de los elementos que conforman el proyecto (Baterías, módulos, racks, bancos, inversores y el proyecto en sí). Una vez agregado el nuevo proyecto, éste estará disponible en la pantalla de monitoreo donde se podrá observar cualquier anomalía mediante figuras y alarmas. Inicialmente, RENOBAT muestra una lista de los proyectos agregados y cualquier alarma que se haya generado. El usuario puede ingresar al proyecto de su elección para ver de forma detallada el estado de los bancos de baterías,

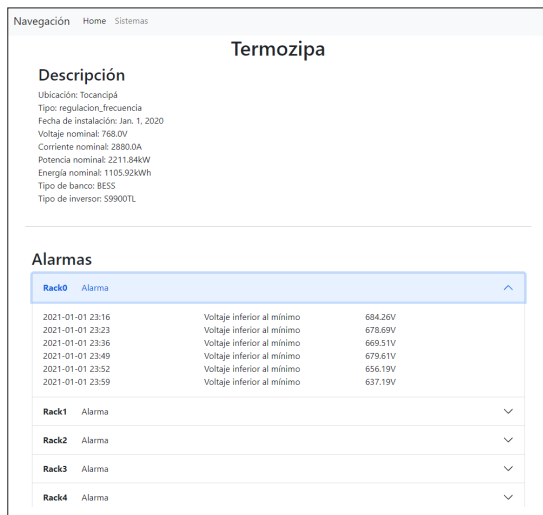
así como también las gráficas de los voltajes, temperaturas, SOC, corrientes. Además, RENOBAT permite seguir avanzando en la jerarquía y ver en más detalle el estado de los racks que conforman cada banco. La Figura 7 presenta algunas de las ventanas del software desarrollado.



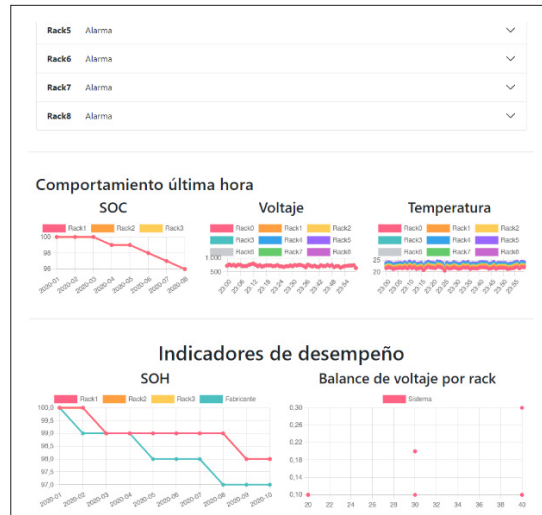
Módulo de ingreso de información



Visualización información baterías



Visualización de alarmas



Visualización KPIs sistema BESS

Fuente: Software RENOBAT

FIGURA 7. HERRAMIENTA DE SOFTWARE RENOBAT PARA EL MONITOREO Y EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN DE SISTEMAS BESS



## CONCLUSIONES

El estado de Salud SOH, el estado de carga SOC, la gestión térmica y el balance voltajes son las variables más utilizadas para monitoreo y gestión de condición de sistemas de almacenamiento con baterías conforme la revisión bibliográfica.

A través de la herramienta de software RENOBAT se elaboró un caso de estudio de un sistema real con datos de monitoreo simulados de acuerdo con la periodicidad de muestreo y la ubicación de los sensores en las Baterías y sus agrupaciones. RENOBAT permite manejar el gran volumen de datos generado por los sistemas de medición del BESS, el software identifica si existe alguna anomalía en las condiciones operacionales del sistema. RENOBAT permite de manera intuitiva y jerárquica mostrar cada uno de los componentes del sistema y detallar de manera gráfica los voltajes, temperaturas, SOC, corrientes. El SOH es utilizado en la herramienta RENOBAT como el indicador de envejecimiento clave y se compara con la curva de pérdida de vida útil entregada por el fabricante del sistema de almacenamiento.

Como trabajos futuros se plantean:

- Incluir KPIs para los inversores y transformadores elevadores que hacen parte de los sistemas BESS y de esta forma contar con una evaluación de la condición total del sistema.
- Desarrollar casos de evaluación de la condición considerando datos de operación real de sistemas de almacenamiento BESS de múltiples marcas y capacidades.
- Analizar el efecto del tipo de aplicación del sistema BESS en la degradación de sus componentes y baterías.
- Comparar el SOH obtenido través de pruebas en laboratorio con el SOH derivado de cálculos a través de variables registradas por el BMS.

## REFERENCIAS

- [1] U.S. DOE Energy Information Administration, “Battery Storage in the United States: An Update on Market Trends,” *Batter. Storage United States An Updat. Mark. Trends*, no. August, 2020, p. 37.
- [2] M. G. Molina, “Energy Storage and Power Electronics Technologies: A Strong Combination to Empower the Transformation to the Smart Grid,” in *Proc. IEEE*, vol.105, no.11, 2017, pp. 2191–2219. Doi: 10.1109/JPROC.2017.2702627 .

- [3] M. Barghamadi, A. Kapoor, and C. Wen, “A Review on Li-S Batteries as a High Efficiency Rechargeable Lithium Battery,” in *J. Electrochem. Soc.*, vol.160, no.8, 2013, pp. A1256–A1263. Doi:10.1149/2.096308jes .
- [4] Kurzweil, P. (2015). Chapter 16 - Lithium Battery Energy Storage: State of the Art Including Lithium–Air and Lithium–Sulfur Systems. In P. T. Moseley & J. Garche (Eds.), *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing* (pp. 269–307). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62616-5.00016-4>
- [5] A. Parlikar, H. Hesse, and A. Jossen, “Topology and Efficiency Analysis of Utility-Scale Battery Energy Storage Systems,” in *Proceedings of the 13th International Renewable Energy Storage Conference 2019 (IRES 2019)*, 2019, no. January 2020, doi: 10.2991/ires-19.2019.15.
- [6] H. J. Bergveld, W. S. Kruijt, and P. H. L. Notten, “Battery Management Systems,” in *Battery Management Systems*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2002, pp. 9–30, doi: 10.1007/978-94-017-0843-2\_2.
- [7] S. Duryea, S. Islam, and W. Lawrence, “Battery management system for stand alone photovoltaic energy systems,” *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.)*, vol.4, 1999, pp. 2649–2654, doi: [10.1109/2943.922452](https://doi.org/10.1109/2943.922452)
- [8] M. Akdere *et al.*, “Hardware and software framework for an open battery management system in safety-critical applications,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, 2016, pp. 5507–5512, doi: 10.1109/iecon.2016.7793001.
- [9] C. Fleischer, D. U. Sauer, J. V. Barreras, E. Schaltz, and A. E. Christensen, “Development of software and strategies for Battery Management System testing on HIL simulator,” *2016 11th Int. Conf. Ecol. Veh. Renew. Energies, EVER 2016*, 2016, doi: 10.1109/ever.2016.7476438.
- [10] P. Eguía, E. Torres, A. Etxegarai, V. Valverde, and I. Zamora, “Optimum allocation of BESS for power quality improvement. A comparative study,” *ICCEP 2019 - 7th Int. Conf. Clean Electr. Power Renew. Energy Resour. Impact*, pp. 450–455, 2019, doi: 10.1109/iccep.2019.8890080.
- [11] F. R. Islam, A. Lallu, K. A. Mamun, K. Prakash, and N. K. Roy, “Power Quality Improvement of Distribution Network Using BESS and Capacitor Bank,” in *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol.9, no.3, 2021, pp. 625–632, doi: 10.35833/mpce.2019.000304
- [12] K. Kim, T. Yoon, G. Byeon, H. Jung, H. Kim, and G. Jang, “Power demand and power quality analysis of EV charging station using BESS in MicroGrid,” *2012 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2012*, pp. 996–1001, doi: [10.1109/vppc.2012.6422752](https://doi.org/10.1109/vppc.2012.6422752).
- [13] S. U. Agamah and L. Ekonomou, “Peak demand shaving and load-levelling using a combination of bin packing and subset sum algorithms for electrical energy storage system scheduling,” in *IET Sci. Meas. Technol.*, vol.10, no.5, 2016, pp. 477–484, doi: 10.1049/iet-smt.2015.0218.

- [14] K. H. Chua, Y. S. Lim, and S. Morris, “Energy storage system for peak shaving,” in *Int. J. Energy Sect. Manag.*, vol.10, no.1, , 2016, pp. 3–18, doi: 10.1108/IJESM-01-2015-0003.
- [15] R. Martins, H. C. Hesse, J. Jungbauer, T. Vorbuchner, and P. Musilek, “Optimal component sizing for peak shaving in battery energy storage system for industrial applications,” in *Energies*, vol.11, no.8, 2018, doi: 10.3390/en11082048.
- [16] M. Uddin, M. F. Romlie, M. F. Abdullah, C. K. Tan, G. M. Shafiullah, and A. H. A. Bakar, “A novel peak shaving algorithm for islanded microgrid using battery energy storage system,” in *Energy*, vol.196, 2020, pp. 1–13, doi: 10.1016/j.energy.2020.117084.
- [17] H. Cui, A. Hu, B. Sang, B. Yang, G. Li, and Y. Tao, “Research on Method of Photovoltaic Power Station Assisting Power Grid Black Start Based on Energy Storage,” *2018 2nd IEEE Conf. Energy Internet Energy Syst. Integr.*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/EI2.2018.8582088.
- [18] H. Khaloie *et al.*, “Coordinated wind-thermal-energy storage offering strategy in energy and spinning reserve markets using a multi-stage model,” in *Appl. Energy*, vol.259, no.October, 2020, p. 114168, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114168.
- [19] M. Kleinberg *et al.*, “Energy storage valuation under different storage forms and functions in transmission and distribution applications,” in *Proc. IEEE*, vol.102, no.7, 2014, pp. 1073–1083, doi: 10.1109/JPROC.2014.2324995.
- [20] W. Jewell and Z. Hu, “The role of energy storage in transmission and distribution efficiency,” in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, pp.1–4, 2012, doi: 10.1109/tdc.2012.6281537.
- [21] R. T. Elliott *et al.*, “Sharing Energy Storage Between Transmission and Distribution,” in *IEEE Trans. Power Syst.*, vol.34, no.1, 2019, pp. 152–162, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2866420.
- [22] E. Brun, “Key Performance Indicators for the monitoring of large scale battery storage systems,” Master of Science Thesis Dissertation, KTH School of Industrial Engineering and Management, Division of Heat and Power Technology, 2019. urn:nbn:se:kth:diva-263899.
- [23] DNV GL - Energy, *DNVGL-RP-0043 Safety, operation and performance of grid-connected energy storage systems*. Chalfont, 2017.
- [24] K. Smith, M. Baggu, A. Friedl, T. Bialek and M. R. Schimpe, “Performance and health test procedure for grid energy storage systems,” in *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2017, pp. 1-5, doi:10.1109/PESGM.2017.8274326.
- [25] IEEE Standards Coordinating Committee 21, *IEEE Std 2030.2.1 IEEE Guide for Design, Operation, and Maintenance of Battery Energy Storage Systems, both Stationary and Mobile, and Applications Integrated with Electric Power Systems*. New York: IEEE, 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8930450.

- [26] S. Jansson, “Evaluation of KPIs and Battery Usage of Li-ion BESS for FCR Application,” no. September, 2019. urn:nbn:se:uu:diva-394015
- [27] F. Karoui, D. L. Ha, T. Delaplagne, M. F. Bouaaziz, V. Eudier, and M. Lévy, “Diagnosis and prognosis of complex energy storage systems: Tools development and feedback on four installed systems,” in *Energy Procedia*, vol.155, 2018, pp. 61–76, doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.066.
- [28] D. Rosewater, “Intro to FMEA and SSA in Energy Storage Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) Systems Theoretic Process Analysis (STPA) Parting Knowledge,” in *Energy Storage Association Annual Meeting 2015*, p. 7.
- [29] Federal Financial Institutions Examination Council’s (FFIEC). (2022, May). System Development Life Cycle. <https://ithandbook.ffiec.gov/it-booklets/development-and-acquisition/project-management/system-development-life-cycle.aspx>.
- [30] M. S. Jiménez, C. Filiou, V. Giordano, I. Onyeji, and G. Fulli, *Guidelines for Conducting a Cost-benefit analysis of Smart Grid projects*. European Comission, 2012.
- [31] U.S. Department of Energy, *Distribution Automation: Results from the Smart Grid Investment Grand Program*, 2016.
- [32] R. Echeverri-Martínez, W. Alfonso-Morales, and E. F. Caicedo-Bravo, “A methodological Decision-Making support for the planning, design and operation of smart grid projects,” in *AIMS Energy*, vol.8, no.4, 2020, pp. 627–651, doi: 10.3934/energy.2020.4.627.