Modelo de optimización del despacho: Sistema de Almacenamiento de Baterías Eléctrica (SAEB)

XM SA ESP
Septiembre de 2026

Información Pública. Todos los derechos reservados para XM S.A E.S.P.

Control de Cambios

Versión	Fecha	Modificación
0	22 noviembre de 2026	Emisión original

Información Pública. Todos los derechos reservados para XM S.A E.S.P.

Modelo de optimización para los SAEB cómo activos de red

1. Objetivo.

La Resolución CREG 101 113 de 2026 define los mecanismos para incorporar al Sistema Interconectado Nacional-SIN los Sistemas de Almacenamiento de Energía Eléctrica con Baterías -SAEB- como activos de red, con el propósito de mitigar inconvenientes presentados por la falta o insuficiencia de redes de transporte de energía en el Sistema Interconectado Nacional.

El presente documento es publicado por el Centro Nacional de Despacho en cumplimiento de lo establecido en el Artículo 21 de esta Resolución, en el que se indica:

> *"**Operación de carga y descarga del SAEB.** Para un SAEB como activo de red del STN o del STR la operación de toma y entrega de energía de las baterías se hará de forma remota por el CND o de forma automática. Cuando se trate de activos de red de conexión al SDL, se debe coordinar la operación con el CND, teniendo en cuenta lo establecido en el artículo 71 de la presente resolución, sin que sea obligatorio el envío de consignas remotas.*
>
> *El CND incluirá en el despacho la programación de las horas de carga y de descarga de los SAEB, teniendo en cuenta que el objetivo será minimizar el costo de operación del sistema y cumplir las condiciones para la entrega de energía, establecidas en la identificación de la necesidad del SAEB.*
>
> *Si el CND, debido a las disposiciones establecidas en la presente resolución para los SAEB como activos de red, encuentra necesario actualizar el modelo de optimización del despacho económico de que trata el Código de Operación, Anexo de la Resolución CREG 025 de 1995, para la programación de las horas de carga y las de descarga, deberá hacerlo en un plazo máximo de tres (3) meses contados a partir de la entrada en vigor de la presente resolución.*
>
> *El CND podrá suspender el proceso de carga si la seguridad del sistema así lo requiere y los procesos de carga o descarga podrán ser objeto de redespacho.*
>
> *El agente adjudicatario debe mantener disponibles y operables los equipos en los momentos que lo requiera el CND o el sistema, tanto para la toma como para la entrega de energía.*
>
> *Durante la operación real y ante contingencias, el SAEB cumplirá con la respuesta operativa conforme los requisitos indicados en esta resolución."*

En el presente documento se muestran los principales aspectos relacionados con la determinación de los procesos de carga y descarga de los SAEB como activos de red y otros aspectos relacionados con la operación de estos dispositivos.

Información Pública. Todos los derechos reservados para XM S.A E.S.P.

2. Características técnicas de los SAEB requeridas para la programación y operación.

Para la programación y operación del SAEB, se tendrán en cuenta las características técnicas definidas a continuación:

Capacidad máxima disponible (MWh): Representa el total de la energía que puede ser extraída de la batería en MWh después de un ciclo de carga completo. Dicha información debe tener en cuenta la disponibilidad de los equipos que componen el SAEB.

Eficiencia de carga: Es la relación entre la energía almacenada por el SAEB y la energía tomada del SIN (en el punto de conexión del SAEB al SIN), medida en un intervalo de una hora; utilizada para efectos de la programación de carga y descarga de los SAEB. [%].

Eficiencia de descarga: Es la relación entre la energía entregada al SIN durante la descarga (en el punto de conexión del SAEB al SIN) y la reducción de carga del SAEB, medida en un intervalo de una hora; utilizada para efectos de la programación de carga y descarga de los SAEB. [%].

Eficiencia del almacenamiento por hora: Porcentaje de la energía almacenada en el SAEB que es disipada en una hora cuando este se encuentra en estado de flotación, utilizada para efectos de la programación de carga y descarga de los SAEB. [%].

Estado de carga -SOC- (%): Señal de indicación sobre el nivel de carga del SAEB relativo a su capacidad máxima disponible, donde 0% indica que el SAEB está completamente descargado y 100% que está completamente cargado.

Estado de carga mínimo/máximo operativo: Nivel de carga del SAEB mínimo o máximo que es requerido para preservar la seguridad y confiabilidad del SIN, relativo a su capacidad máxima disponible de energía, utilizada para efectos de la programación de carga y descarga de los SAEB. [%].

Estado de carga mínimo técnico: Nivel de carga del SAEB mínimo que es requerido en cumplimiento de características técnicas propias del equipo, relativo a su capacidad máxima disponible de energía, utilizada para efectos de la programación de carga y descarga de los SAEB. [%]

Límite máximo de carga/descarga: Energía máxima en un periodo horario que puede ser cargada/descargada ya sea por restricción técnica del equipo o limitante operativa, utilizada para efectos de la programación de carga y descarga de los SAEB. [MWh].

La necesidad de la incorporación de otras características técnicas de los SAEB las identificará el CND sobre la base de la experiencia de la operación o de los cambios tecnológicos o normativos, y las incorporará como una modificación al presente procedimiento.

Información Pública. Todos los derechos reservados para XM S.A E.S.P.

3. Modelo del SAEB para los Escenarios de Despacho Económico y Redespacho

A continuación, se presenta la formulación matemática del modelo de optimización con el cual se realiza la programación de la energía asociada a la carga/descarga del SAEB como activo de red en el escenario del Despacho Económico y Redespacho. El modelo tiene como objetivo la operación económica y segura del sistema, tal y como lo establece la regulación vigente, cumpliendo las características técnicas del equipo.

- Conjuntos

$t \in T$	Conjunto de periodos del horizonte de optimización
$r \in R$	Conjunto de Recursos de generación
$u \in U$	Conjunto de unidades de generación
$k \in K$	Conjunto de combustibles
$w \in W$	Conjunto de estados térmicos

- Nuevos conjuntos:

$s \in S$	Conjunto de elementos SAEB

- Variables:

$V_{GenRec_{r,t}}$	Generación asignada el Recurso de generación r en el periodo t [MWh]
V_{Rac_t}	Racionamiento programado en el periodo t [MWh]
$B_{wt,k,w}$	Variable binaria. para el arranque de generación térmico de la unidad u en el periodo t, con el estado térmico w y el combustible k Uno (1) indica arranque del recurso y cero (0) indica sin arranque del recurso.

- Nuevas variables:

$V_{SoC_{s,t}}$	Estado de carga del SAEB s en la hora t [p.u.]
$V_{SoD_{s,t}}$	Estado de descarga del SAEB s en la hora t [p.u.]
$V^{E}_{SoC_{s,t}}$	Estado de carga del SAEB s en la hora t, afectado por la eficiencia de almacenamiento [p.u.]

Información Pública. Todos los derechos reservados para XM S.A E.S.P.

$V_{PC_{s,t}}$; $V_{PD_{s,t}}$	Energía de carga/descarga del SAEB s en la hora t [MWh]
$B_{PC_{s,t}}$	Variable binaria que indica el estado de carga de la batería s en el periodo t [p.u.]
$B_{PD_{s,t}}$	Variable binaria que indica el estado de descarga de la batería s en el periodo t [p.u.]

- Parámetros

$Pofe_r$	Precio de oferta del Recurso de generación r [$/MWh]
PAP_u	Precio de Arranque y Parada del Recurso de generación térmico rt [$]
M	Costo de Racionamiento Estimado [$/MWh], más caro que cualquier generador (Big M)
Dem_t	Demanda del SIN en el periodo t [MWh]

- Nuevos parámetros:

$\eta_s^c;\eta_s^d$	Eficiencia de carga/descarga del SAEB s [p.u.]
η_s^{soc}	Eficiencia del almacenamiento por hora del SAEB s [p.u.]
$Cap_{s,t}$	Capacidad máxima disponible del SAEB s [MWh]
$\overline{PC_{s,t}};\overline{PD_{s,t}}$	Límite máximo de carga/descarga del SAEB s en el periodo t [MWh]
$\underline{SoC_{s,t}};\overline{SoC_{s,t}}$	Estado de carga mínimo/máximo operativo del SAEB s [p.u.]
$\underline{SoC_s^{MT}}$	Estado de carga mínimo técnico del SAEB s [p.u.]
$PC_{s,t};PD_{s,t}$	Valor de carga/descarga requerido para el periodo t del SAEB s [MWh]
ECS_s	Estado de conexión del SAEB al SIN. Uno (1) si está conectado al SIN, cero (0) si está desconectado.

Función objetivo

La función objetivo busca minimizar los costos de operación del sistema incluyendo la carga de los dispositivos SAEB y valorando que estos deben estar en su nivel de Estado de Carga Máximo en el periodo horario previo al inicio de un bloque de periodos de descarga.

Información Pública. Todos los derechos reservados para XM S.A E.S.P.

$$Min\left(\sum_{r,t} Pofe_r \cdot V_{GenRec_{r,t}} + \sum_{u,t,k,w} PAP_{u,t,k,w} \cdot B_{u,t,k,w} + \sum_{t} M \cdot V_{rac_t} + \sum_{s,t} PC_{s,t} \cdot V_{PC_{s,t}}\right)$$

Nuevas restricciones

- Balance de generación-demanda considerando almacenamiento:

  Esta restricción garantiza el balance de carga y generación del sistema considerando la carga y descarga de los SAEB en todo periodo horario.

$$\sum_{r} V_{GenRec_{r,t}} + V_{Rac_t} + \sum_{s} V_{PD} = Dem_t + \sum_{s} V_{PC\,s,t} \;\forall t$$

- Balance del almacenamiento:

  Esta restricción establece la ecuación de continuidad para cada periodo del Estado de Carga de cada SAEB, indicado que el mismo es función del Estado de Carga del periodo anterior, las pérdidas propias del dispositivo, la carga y descarga del SAEB y la eficiencia de estos dos procesos.

$$V_{SoC_{s,t}} = V^{E}_{SoC_{s,t-1}} + \eta^{c}_{s} \cdot \frac{V_{PC_{s,t}}}{Cap_{s,t}} - \frac{1}{\eta^{d}_{s}} \cdot \frac{V_{PD_{s,t}}}{Cap_{s,t}} \;\forall s,t$$

- Afectación del estado de carga por eficiencia de almacenamiento:
  Si en el periodo t existe carga o descarga, la Eficiencia del almacenamiento por hora no debe afectar el Estado de carga. Si en el periodo t no existe carga ni descarga, es decir, el SAEB está en estado de flotación, el Estado de carga se debe afectar por la Eficiencia del almacenamiento por hora.

$$V_{SoC\,s,t}(1-\eta^{SoC}_{s}) \le V^{E}_{SoC\,s,t} + \left(B_{PC\,s,t} + B_{PD\,s,t}\right) \forall s,t$$
$$V_{SoC\,s,t}(1-\eta^{SoC}_{s}) \ge V^{E}_{SoC\,s,t} - \left(B_{PC\,s,t} + B_{PD\,s,t}\right) \forall s,t$$

$$V_{SoC\,s,t} \le V^{E}_{SoC\,s,t} + \left(1 - B_{PC\,s,t}\right) \forall s,t$$
$$V_{SoC\,s,t} \ge V^{E}_{SoC\,s,t} - \left(1 - B_{PC\,s,t}\right) \forall s,t$$

$$V_{SoC\,s,t} \le V^{E}_{SoC\,s,t} + \left(1 - B_{PD\,s,t}\right) \forall s,t$$
$$V_{SoC\,s,t} \ge V^{E}_{SoC\,s,t} - \left(1 - B_{PD\,s,t}\right) \forall s,t$$

Información Pública. Todos los derechos reservados para XM S.A E.S.P.

- Balance de Estado de carga:

  Esta restricción establece, para cada periodo y para cada SAEB, la relación entre el Estado de Carga y Descarga a través del Estado de Carga Máximo.

$$V_{SoD_{s,t}} = 1 - V_{SoC_{s,t}} \; \forall s, t$$

- Mínimo y máximo Estado de Carga del almacenamiento:

  Esta restricción establece, para cada periodo y para cada SAEB, que su Estado de Carga debe estar entre el Estado de Carga Mínimo y Máximo.

$$\underline{SoC_{s,t}} \leq V_{SoC_{s,t}} \leq \overline{SoC_{s,t}} \; \forall s, t$$

- Mínimo técnico del sistema de almacenamiento:

  Esta restricción establece para cada periodo y para cada SAEB que su Estado de Carga debe ser superior al Estado de Carga mínimo técnico.

$$V_{SoC_{s,t}} \geq \underline{SoC_s^{MT}} \; \forall s, t$$

- Causalidad de la carga/descarga:

  Estas restricciones indican que cada SAEB puede estar en un periodo en carga, descarga o ninguno, siendo excluyentes. Adicionalmente indica que, de estar en un periodo de carga, la Energía de Carga debe ser igual o inferior al Límite máximo de Carga, caso análogo si está en un periodo de descarga, la Energía de Descarga debe ser igual o inferior al Límite máximo de Descarga.

$$B_{PC_{s,t}} + B_{PD_{s,t}} \leq ECS_{s,t} \; \forall s, t$$

$$V_{PC_{s,t}} \leq \overline{PC_{s,t}} \cdot B_{PC_{s,t}} \; \forall s, t$$

$$V_{PD_{s,t}} \leq \overline{PD_{s,t}} \cdot B_{PD_{s,t}} \; \forall s, t$$

- Carga y descarga requerida:

  Estas restricciones establecen que la Energía de Descarga de un SAEB debe ser igual al valor descarga requerida en los periodos donde se tenga esta condición, para el resto de los periodos será igual a cero. De igual forma, la Energía de Carga de un SAEB debe ser al menos el valor de carga requerido en los periodos donde se tenga esta condición.

$$V_{PC_{s,t}} \geq PC_{s,t} \cdot ECS_{s,t} \; \forall s, t$$

$$V_{PD_{s,t}} \geq PD_{s,t} \cdot ECS_{s,t} \; \forall s, t$$

Información Pública. Todos los derechos reservados para XM S.A E.S.P.