

**PROCEDIMIENTO PARA LA
DETERMINACIÓN DE LOS PROCESOS DE CARGA Y
DESCARGA DE LOS SISTEMAS DE
ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON
BATERÍAS**

GERENCIA CENTRO NACIONAL DE DESPACHO
Documento CND 020 2019
Septiembre de 2020



Control de Cambios

Versión	Fecha	Modificación
0	05 noviembre de 2019	Emisión original
1	11 mayo de 2020	Recoge comentarios de Agentes y del Consejo Nacional de Operación
2	02 de septiembre de 2020	Recoge comentarios de la Comisión de Regulación de Energía y Gas - Radicado CREG S-2020-004443



Contenido

DETERMINACIÓN DE LOS PROCESOS DE CARGA Y DESCARGA DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON BATERÍAS

1.	Objetivo.	1
2.	Aplicación de los SAEB para mitigar los retrasos en la expansión.	2
3.	Criterios para la programación y operación de las SAEB	2
3.1.	Programación Semanal de Mantenimientos	2
3.2.	Programación en el Despacho Económico	3
3.3.	Programación en el Redespacho	3
3.4.	Operación en tiempo real	4
4.	Características técnicas de los SAEB requeridas para la programación y operación.	4
5.	Modelo del SAEB para los Escenarios de Despacho Económico y Redespacho	5

DETERMINACIÓN DE LOS PROCESOS DE CARGA Y DESCARGA DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON BATERÍAS

1. Objetivo.

La Resolución CREG 098 de 2019 define los mecanismos para incorporar al Sistema Interconectado Nacional-SIN los Sistemas de Almacenamiento de Energía Eléctrica con Baterías -SAEB- 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 27 de esta Resolución, en el que se indica:

“PROCESOS DE CARGA Y DESCARGA DEL SAEB. En la instalación de un SAEB se debe tener en cuenta que la toma y entrega de energía de las baterías serán operadas remotamente por el CND o de forma automática.

El CND incluirá en el despacho la programación de las horas de carga y las de descarga de las baterías teniendo en cuenta el objetivo de minimizar el costo de operación del sistema y las condiciones para la entrega de energía establecidas en los documentos de selección. 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.

Durante los dos meses siguientes a la entrada en vigencia de la presente resolución, el CND elaborará y publicará un procedimiento en el cual se establezca la forma como el CND, en la definición del despacho, estimará las horas para la carga y las condiciones requeridas para la descarga.

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” (Subrayado fuera del texto original).

En el presente documento se muestran los principales aspectos relacionados con la determinación de los procesos de carga y descarga de los SAEB y otros aspectos relacionados con la operación de estos dispositivos. Para este fin, el documento se desarrolla en cinco secciones. Esta primera sección presenta el objetivo del documento, posteriormente en la segunda sección se enmarcan las aplicaciones en las cuales pueden ser definidos los SAEB para mitigar inconvenientes presentados por la falta o insuficiencia de redes de transporte de energía en el SIN. La tercera sección presenta los criterios para la programación y operación de los SAEB para las aplicaciones identificadas anteriormente. En la sección cuatro se indican las características técnicas de los SAEB de mayor relevancia para la programación y operación de estos dispositivos. Finalmente se presenta la formulación matemática de los procesos de Despacho Económico y Redespacho en la sección cinco.



Este documento será actualizado de acuerdo con la experiencia operativa con los SAEB, necesidades del Sistema Interconectado Nacional y cambios regulatorios que lo ameriten.

2. Aplicación de los SAEB para mitigar los retrasos en la expansión.

Considerando que los tiempos de instalación de los SAEB son menores a la construcción de infraestructura lineal tradicional, estos dispositivos pueden ser considerados como medidas para mitigar retrasos en la expansión de la red, los cuales mediante la inyección de potencia activa y reactiva pueden reducir la carga de los elementos del sistema como líneas de transmisión y transformadores, y dar soporte de tensión al sistema.

A la fecha se prevén los siguientes usos para los SAEB con el objetivo de mitigar retrasos en la expansión de la red, para lo cual se deberá tener en cuenta el objetivo de minimizar el costo de operación del sistema y las condiciones para la entrega de energía establecidas en los documentos de selección de la UPME (Artículo 27, Resolución CREG 098 de 2019):

- a) **SAEB para alivio de restricciones eléctricas.** Cuando se tienen sobrecargas en los equipos de transmisión en estado estacionario, la inyección de potencia activa en los nodos adecuados permite reducir la carga de los equipos a valores permisibles. Este uso considera la entrega de potencia siempre que haya capacidad de potencia en el SAEB y que se alivien los valores de sobrecarga en los equipos, cumpliéndose las condiciones para la entrega de energía establecidas en los documentos de selección de la UPME.
- b) **SAEB para alivio de restricciones operativas.** Previendo o ante la ocurrencia de contingencias y sobrecargas en equipos, la inyección de potencia activa en los nodos adecuados permite evitar la sobrecarga de los equipos. Este uso considera la entrega de potencia siempre que haya capacidad de potencia en el SAEB, para que no se presente sobrecarga en los equipos ante contingencias, cumpliéndose las condiciones para la entrega de energía establecidas en los documentos de selección de la UPME.

3. Criterios para la programación y operación de las SAEB

3.1. Programación Semanal de Mantenimientos

La programación semanal de mantenimientos considerará los dispositivos SAEB como un elemento adicional en el sistema de potencia para el control de restricciones, de este modo podrá realizar recomendaciones de acuerdo con las condiciones para la entrega de energía establecidas en los documentos de selección de la UPME y los escenarios bajo análisis, tanto de generación como de topología.

Adicionalmente la programación semanal de mantenimientos debe indicar, si como resultado del análisis de consignaciones se causan restricciones que limiten la carga o descarga del SAEB.



3.2. Programación en el Despacho Económico

La programación de energía asociada a la carga/descarga del SAEB en el Despacho Económico se realizará de acuerdo modelo de optimización enunciado en la sección cuatro de este documento, el cual busca la operación económica y segura del sistema, cumpliendo las características técnicas del equipo y teniendo en cuenta las condiciones para la entrega de energía establecidas en los documentos de selección de la UPME. Para lo anterior se plantean los siguientes criterios:

1. A través de los modelos de red y el análisis eléctrico del Despacho Económico se identifican los periodos horarios en donde se cumple la condición para la entrega de energía establecida en los documentos de selección de la UPME y la energía horaria mínima requerida para la solución de la restricción. A partir de esa identificación se realizará la programación de la carga y descarga del SAEB.
2. En el Despacho Económico se programarán los valores de descarga del SAEB para alivio de restricciones eléctricas o para el alivio de restricciones operativas de manera preventiva, este último de acuerdo con las consideraciones del literal 5 de este numeral. Las descargas del SAEB para alivio de restricciones operativas de manera correctiva (entrega de potencia posterior a ocurrencia de la contingencia) serán gestionadas automáticamente en tiempo real dada la naturaleza de las condiciones de entrega.
3. El Despacho Económico programará la carga de energía del SAEB procurando que se alcance el nivel de Estado de Carga Máximo, en el período previo al inicio de un bloque de periodos de descarga. El modelo de optimización definirá los periodos y la energía asociada a la carga y descarga minimizando los costos de operación del sistema.
4. El Estado de Carga Inicial del SAEB a considerar en el modelo de optimización del Despacho Económico se determinará a las 08:00 a.m. del día previo a la operación, teniendo en cuenta la mejor información disponible que tenga el CND respecto a la finalización del Estado de Carga del SAEB en el día de operación.
5. Ante indisponibilidad de uno de los activos asociados a las condiciones para la entrega de energía establecidas en los documentos de selección de la UPME o el sistema de control del SAEB, el CND programará de manera preventiva en el Despacho Económico los periodos horarios y energía de carga/descarga requeridos para minimizar los efectos que esta indisponibilidad pueda ocasionar en la atención segura y confiable de la demanda, minimizando además los costos de operación de sistema.

3.3. Programación en el Redespacho

La modificación de la energía asociada a la carga/descarga del SAEB programados en el Despacho Económico se realizará en el escenario del Redespacho, cuando se presente una indisponibilidad total o parcial del SAEB declarada por el agente operador del mismo o ante cambios en las condiciones del Estado de Carga del SAEB, además



de los cambios topológicos, de parámetros, de generación, de demanda y otros que modifiquen las condiciones de seguridad y/o calidad del sistema que así lo requieran bajo las causales de redespacho establecidas en la regulación vigente.

La programación de los periodos horarios y la energía asociada a la carga/descarga del SAEB en el escenario de Redespacho se realizará con el mismo modelo de optimización y bajo los mismos criterios establecidos en el escenario de Despacho Económico.

3.4. Operación en tiempo real

En condiciones normales de operación, el SAEB mantendrá la energía asociada a la carga/descarga establecidos en el Despacho Económico o Redespacho.

En caso de ser necesario, durante la operación en tiempo real del sistema, el CND podrá modificar las condiciones de carga/descarga de un SAEB para adaptarlas a las condiciones reales de la operación del sistema, cumpliendo, en la medida de lo posible, las condiciones para la entrega de energía establecidas en los documentos de selección de la UPME.

Para el caso del SAEB para la solución de restricciones operativas de manera correctiva, y de presentarse las condiciones para la entrega de energía previstas en los análisis eléctricos, el SAEB debe realizar la descarga de acuerdo con el sistema de control asociado al mismo. Del mismo modo el CND valorará la situación, y tomará las acciones necesarias para llevar el sistema a un punto seguro de operación.

Ante condiciones de alerta o emergencia en la operación en tiempo real del sistema derivadas de la falta o insuficiencia de redes de transporte y para la atención segura y confiable de la demanda, el CND podrá hacer uso de la descarga del SAEB con fines diferentes a las condiciones para la entrega de energía establecidas en los documentos de selección de la UPME.

4. 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.

5. 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 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 y considerando las condiciones para la entrega de energía establecidas en los documentos de selección de la UPME.

- Conjuntos

$t \in T$ Conjunto de periodos del horizonte de optimización

$r \in R$ Conjunto de Recursos de generación

$rt \in RT$ Conjunto de Recursos de generación térmica

- Nuevos conjuntos:

$s \in S$ Conjunto de elementos SAEB

$tr \in TR$ Conjunto de periodos donde aplique un valor de carga o descarga requerido



$tpd \in TPD$	Conjunto que agrupa el periodo horario previo al inicio de cada bloque de periodos de descarga
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Variables:</u> 	
$V_{GenRec}_{[r][t]}$	Generación asignada el Recurso de generación r en el periodo t [MWh]
$V_{Rac}_{[t]}$	Racionamiento programado en el periodo t [MWh]
$B_{Arr}_{[rt][t]}$	Variable binaria. Para el Recurso de generación térmico rt en el periodo t Uno (1) indica arranque del recurso y cero (0) indica sin arranque del recurso.
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Nuevas variables:</u> 	
$V_{SoC}_{[s][t]}$	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.]
$V_{SoC_E}_{[s][t]}$	Estado de carga del SAEB s en la hora t , afectado por la eficiencia de almacenamiento [p.u.]
$V_{PC}_{[s][t]}, V_{PD}_{[s][t]}$	Energía de carga/descarga del SAEB s en la hora t [MWh]
$B_{PC}_{[s][t]}$	Variable binaria. Para el SAEB s en el periodo t Uno (1) indica carga y cero (0) no carga/descarga.
$B_{PD}_{[s][t]}$	Variable binaria. Para el SAEB s en el periodo t Uno (1) indica descarga y cero (0) no carga/descarga.
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Parámetros</u> 	
$Pofe_{[r]}$	Precio de oferta del Recurso de generación r [\$/MWh]
$PAP_{[rt]}$	Precio de Arranque y Parada del Recurso de generación térmico rt [\$/]
$CROest$	Costo de Racionamiento Estimado [\$/MWh]
$Dem_{[t]}$	Demanda del SIN en el periodo t [MWh]
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Nuevos parámetros:</u> 	
$\eta c_{[s]}, \eta d_{[s]}$	Eficiencia de carga/descarga del SAEB s [p.u.]



$\eta_{soc}_{[s]}$:	Eficiencia del almacenamiento por hora del SAEB s [p.u.]
$Cap_{[s][t]}$:	Capacidad máxima disponible del SAEB s [MWh]
$PCmax_{[s][t]}, PDmax_{[s][t]}$:	Límite máximo de carga/descarga del SAEB s en el periodo t [MWh]
$SoCmin_{[s][t]}, SoCmax_{[s][t]}$:	Estado de carga mínimo/máximo operativo del SAEB s [p.u.]
$SoC_MT_{[s]}$:	Estado de carga mínimo técnico del SAEB s [p.u.]
$PCreq_{[s][tr]}, PDreq_{[s][tr]}$:	Valor de carga/descarga requerido para el periodo tr del SAEB s [MWh]
$PC_{[s][t]} = \frac{Ke \cdot DemTot_{[t]}}{Max\{DemTot_{[t]}\}}$:	Valoración de la carga del SAEB s en el periodo t para diferenciar posibles múltiples soluciones [\$/MWh]. Sujeto a un proceso de desempate aleatorio y equiprobable, análogo al de las plantas de generación.
$DemTot_{[t]}$:	Pronóstico de demanda total para el despacho en el periodo t [MWh]
Ke :	Factor de escala en la Función Objetivo igual a uno (1). [\$/MWh]
$ECS_{[s][t]}$:	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.

$$\min \left\{ \sum_t \sum_r Pofe_{[r]} \cdot V_GenRec_{[r][t]} + \sum_t \sum_{rt} PAP_{[rt]} \cdot B_Arr_{[rt][t]} + \sum_t CROest \cdot V_Rac_{[t]} \right. \\ \left. + \sum_t \sum_s PC_{[s][t]} \cdot V_PC_{[s][t]} + \sum_{tpd} \sum_s CROest \cdot Cap_{[s][tpd]} \cdot V_SoD_{[s][tpd]} \right\}$$



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.

$$\begin{aligned} \sum_r V_{GenRec}_{[r][t]} + V_{Rac}_{[t]} + \sum_s V_{PD}_{[s][t]} \cdot ECS_{[s][t]} \\ = Dem_{[t]} + \sum_s V_{PC}_{[s][t]} \cdot ECS_{[s][t]} \quad \forall t \end{aligned}$$

- 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.

$$V_{SoC}_{[s][t]} = V_{SoC_E}_{[s][t-1]} + ECS_{[s][t]} \left(\eta_{c[s]} \cdot \frac{V_{PC}_{[s][t]}}{Cap_{[s][t]}} - \frac{1}{\eta_{d[s]}} \cdot \frac{V_{PD}_{[s][t]}}{Cap_{[s][t]}} \right) \quad \forall s, t$$

- Afectación del estado de carga por eficiencia de almacenamiento:

Este conjunto de restricciones establece la afectación del Estado de carga por la Eficiencia del almacenamiento por hora, con el objetivo de considerarlo en la ecuación de Balance del almacenamiento como el estado del periodo anterior.

De este modo, 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.

$$-(B_{PC}_{[s][t]} + B_{PD}_{[s][t]}) + V_{SoC}_{[s][t]} (1 - \eta_{soc[s]}) \leq V_{SoC_E}_{[s][t]} \quad \forall s, t$$

$$V_{SoC}_{[s][t]} (1 - \eta_{soc[s]}) + (B_{PC}_{[s][t]} + B_{PD}_{[s][t]}) \geq V_{SoC_E}_{[s][t]} \quad \forall s, t$$

$$-(1 - B_{PC}_{[s][t]}) + V_{SoC}_{[s][t]} \leq V_{SoC_E}_{[s][t]} \quad \forall s, t$$

$$V_{SoC}_{[s][t]} + (1 - B_{PC}_{[s][t]}) \geq V_{SoC_E}_{[s][t]} \quad \forall s, t$$

$$-(1 - B_{PD}_{[s][t]}) + V_{SoC}_{[s][t]} \leq V_{SoC_E}_{[s][t]} \quad \forall s, t$$



$$V_SoC_{[s][t]} + (1 - B_PD_{[s][t]}) \geq V_SoC_E_{[s][t]} \quad \forall s, t$$

- 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.

$$V_SoD_{[s][t]} = 1 - V_SoC_{[s][t]} \quad \forall s, t$$

- 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.

$$SoCmin_{[s][t]} \leq V_SoC_{[s][t]} \leq SoCmax_{[s][t]} \quad \forall s, t$$

- 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.

$$V_SoC_{[s][t]} \geq SoC_MT_{[s]} \quad \forall s, t$$

- 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.

$$B_PC_{[s][t]} + B_PD_{[s][t]} \leq 1 \quad \forall s, t, ECS_{[s][t]} = 1$$

$$0 \leq V_PC_{[s][t]} \leq PCmax_{[s]} \cdot B_PC_{[s][t]} \quad \forall s, t, ECS_{[s][t]} = 1$$

$$0 \leq V_PD_{[s][t]} \leq PDmax_{[s]} \cdot B_PD_{[s][t]} \quad \forall s, t, ECS_{[s][t]} = 1$$

- 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.

$$V_PD_{[s][t]} = \begin{cases} PDreq_{[s][tr]} & \forall s, tr, ECS_{[s][t]} = 1 \\ 0 & \forall s, t \neq tr, ECS_{[s][t]} = 1 \end{cases}$$

$$V_PC_{[s][tr]} \geq PCreq_{[s][tr]} \quad \forall s, tr, ECS_{[s][tr]} = 1$$

