



COMITÉ CONSULTIVO · NORMA TÉCNICA

Degeneración, precios y desempate de BESS en la programación del SEN

¿Quién decide qué BESS descarga cuando **el modelo es indiferente**?

spec.cl · info@spec.cl
Los Militares 5885, Oficina 803, Las Condes



DS 32: costo de oportunidad como parte integral del despacho

Con el DS 32/2026 el costo de oportunidad deja de ser informativo: **pasa a ordenar el despacho y puede fijar el precio.**



Fuente: DS 125/2017 del Ministerio de Energía, modificado por el DS 32/2026 (D.O. 17-06-2026), Arts. 2 letra cc, 37, 38, 45 bis y 57.

Un CO escalar hora a hora no reproduce el despacho óptimo

El problema multi-horario valora también el **estado de carga** que el sistema tendrá disponible en las horas futuras.

EQUIVALENTE TÉRMICO · HORA A HORA

Despacho **miope**: una hora a la vez, con el costo de oportunidad como un escalar.

$$\min \text{ costo actual} + \text{CO} \cdot p_t^d$$

✗ **No garantiza** la solución del problema multi-horario

e_t energía que queda en la batería al final de la hora

vs

DESPACHO MULTI-HORARIO

Valora la hora actual **y** la energía que deja guardada para las horas siguientes.

$$\min \text{ costo actual} + V_{t+1}(e_t)$$

✓ Formulación exacta de una política hora a hora

V_{t+1} **costo futuro óptimo** desde la hora siguiente

Hay condiciones bajo las cuales el equivalente térmico sí llega al óptimo (lámina siguiente), pero no se dan en mercados reales.

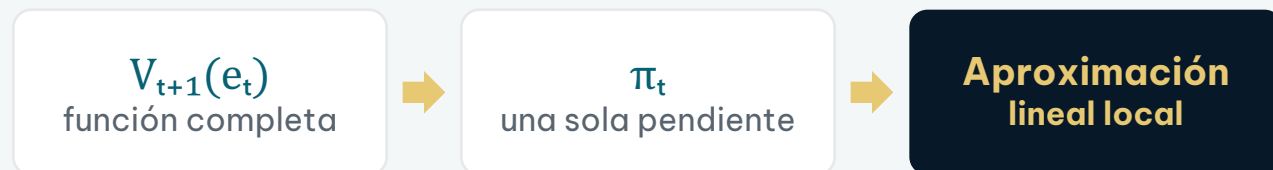
El CO del dual es solo la pendiente local del costo futuro

Reemplazar toda la función futura por una sola pendiente da una **aproximación lineal local**.

LO QUE ENTREGA EL DUAL

$$\pi_t \approx - \partial V_t / \partial e_t$$

El costo de oportunidad del dual es solo la **pendiente marginal** de la función de costo futuro.



Una pendiente local no siempre reproduce la decisión óptima completa, sobre todo si la función futura tiene **quiebres, tramos o degeneración**.

SOLO COINCIDE CON EL ÓPTIMO SI...

- 1 El CO es el **valor marginal exacto** de la energía almacenada, dado el SOC real y el problema futuro real
- 2 Se **recalcula hora a hora**
- 3 La función de costos futuros es **lineal** en el rango relevante
- 4 No hay **degeneración** relevante en el dual ni en el primal

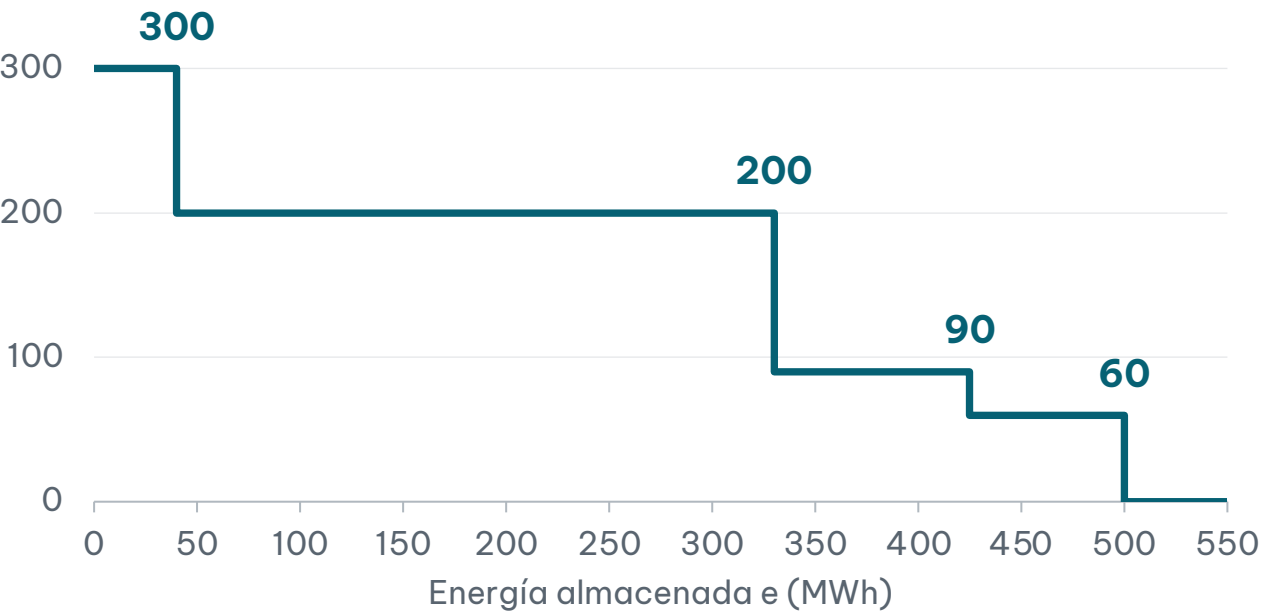
No se cumplen en mercados reales.

El precio sombra indica el valor de **1 MWh adicional**, no necesariamente el costo de **grandes bloques de energía**.

El costo de oportunidad sube a medida que el BESS se descarga

La curva marginal $v_{20}(e)$ se integra para obtener la función de costo de oportunidad $W_{20}(e)$.

Curva marginal de costo futuro $v_{20}(e)$, hora 20, USD/MWh



FUNCIÓN DE COSTO DE OPORTUNIDAD

$W_{20}(e) =$

$300e$	$0 < e \leq 40$
$200e + 4000$	$40 < e \leq 330$
$90e + 40300$	$330 < e \leq 425$
$60e + 53050$	$425 < e \leq 500$
83050	$e \geq 500$

Descargar los primeros **75 MWh** en la hora 19 cuesta efectivamente **60 USD/MWh**; si la descarga es más profunda, el costo marginal aumenta.

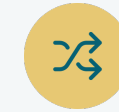
El CO no es un número único: es la **pendiente local de $W_i(e)$** en el SOC del BESS en ese instante, y debe **actualizarse constantemente**.

El diablo está en los detalles: un problema degenerado

Programa de operación reducido a lo esencial: generadores y BESS en una barra, hora a hora.

PROGRAMA DE OPERACIÓN

Objetivo	$\min \Sigma \text{ costo variable} \cdot g$	
Balance	$\Sigma g + \Sigma (d - c) = D$	$\lambda = CMg$
Estado de carga	$e(t) = e(t-1) + \eta c \cdot c - d / \eta d$	$\mu = CO$
Límites	$0 \leq c, d \leq P ; 0 \leq e \leq E$	



Múltiples despachos

Mismo CO y sin límites activos: **solo la suma** está determinada.



Múltiples CO

Ocioso o en su cota: el CO queda en una **banda** de valores óptimos.



Brecha de dualidad

Con variables binarias puede **no existir** un precio que sostenga el despacho.

Descarga si

$$\lambda > \mu / \eta d$$

Carga si

$$\mu \cdot \eta c > \lambda$$

Ocioso si

$$\eta d \cdot \lambda \leq \mu \leq \lambda / \eta c$$

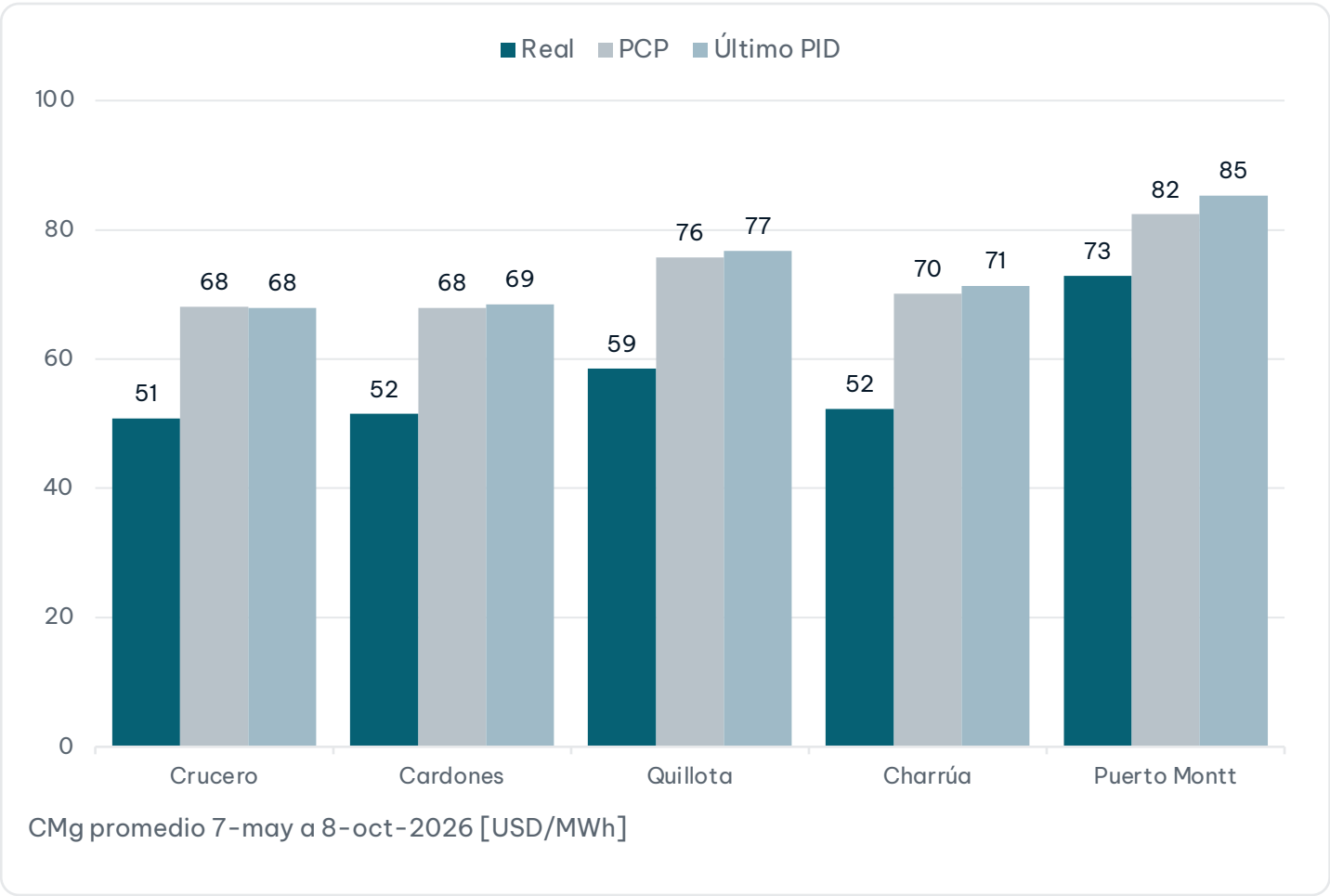
λ y μ : precios sombra (variables duales) de cada restricción. ηc , ηd : eficiencias de carga y descarga. g : generación; c , d : carga y descarga; e : energía almacenada.

CÁLCULO DE CMg PROGRAMADO

¿Qué nivel de precios estamos observando en el programa?

¿Cuánto se equivoca el **precio programado** del Coordinador?

El PCP programa precios 30% sobre el real



Entre el 7 de mayo y el 8 de octubre de 2026 el CMg real promedió 51 a 59 USD/MWh en Crucero, Cardones, Quillota y Charrúa. El PCP lo programó entre 68 y 76: un sesgo de **-16 a -18 USD/MWh**, entre 29% y 34% del precio real.

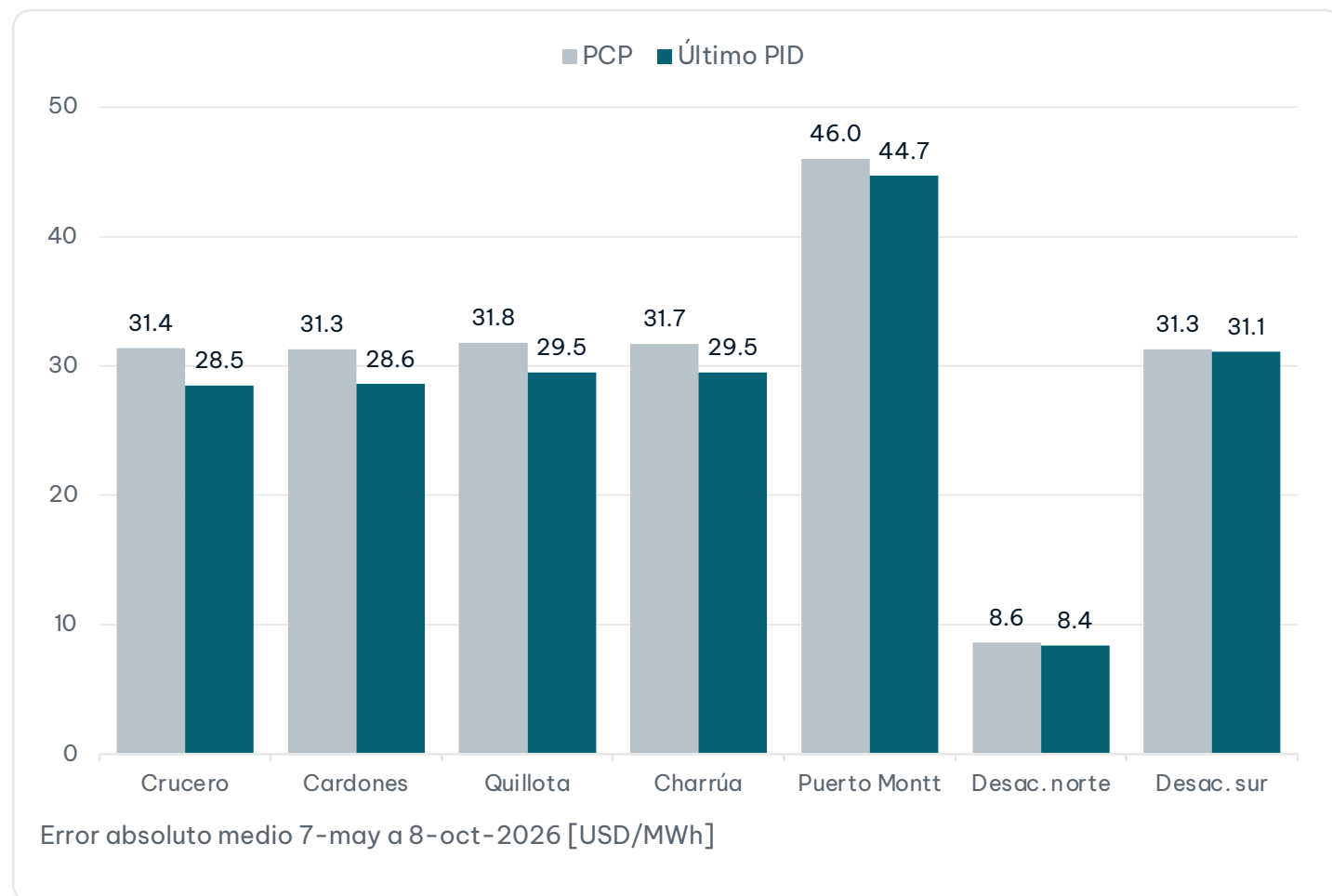
Puerto Montt tiene el precio más alto (73 real, 82 PCP) y un sesgo menor (-9,5), pero el **mayor error absoluto medio**: 46 USD/MWh, contra 31 en las otras cuatro barras.

El último PID no corrige el nivel: programa entre 68 y 77 en las mismas cuatro barras.

ESTO NO ES DE EXTRAÑAR

- 1 Por construcción, el **CMg real y el programado** pueden ser distintos.
- 2 Existen **desvíos de lo programado** en la operación.
- 3 Hay **criterios operativos** que el CEN no incorpora en el programa.
- 4 Los **factores de penalización** se fijan por bloque horario.

El último PID baja el error pero no corrige el sesgo



El último PID reduce el error absoluto medio entre **3% y 9%** según la barra: de 31 a 29 USD/MWh en el norte y centro y de 46 a 45 en Puerto Montt.

El sesgo no cambia: queda entre -17 y -19 USD/MWh en las cuatro barras del norte y centro, y en Puerto Montt empeora de -9,5 a -12,4.

ESTO NO ES DE EXTRAÑAR

- 1 Por construcción, el **CMg real y el programado** pueden ser distintos.
- 2 Existen **desvíos de lo programado** en la operación.
- 3 Hay **criterios operativos** que el CEN no incorpora en el programa.
- 4 Los **factores de penalización** se fijan por bloque horario.

Algunos hallazgos en tres años de programa diario



Demanda sobrestimada

El sistema genera menos de lo programado. El sesgo pasó de -100 MW en 2024-25 a -307 MW en 2025-26 y es sobre todo nocturno.



Vertimiento no anticipado

A las 18 h de verano la solar real queda 1,5 GW bajo el programa. Criterios operacionales del CEN



Baterías se desvían

Los BESS cargan antes de lo previsto y también absorben parte de la rampa solar de salida



Eólica más dispersa

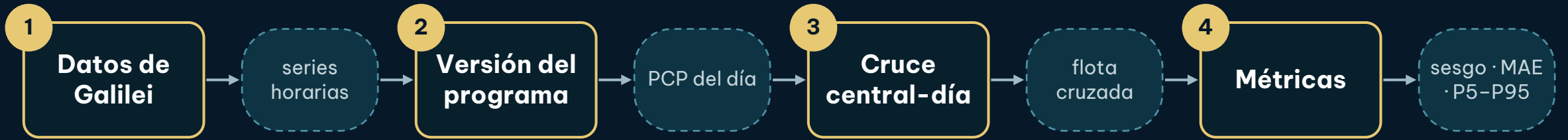
Sesgo casi nulo, pero el rango P5-P95 crece más rápido que la flota: en invierno pasa de ~750 a ~1.200 MW.



Pasada sin modulación

El PCP guarda pasada para la punta y la operación no lo replica. El patrón se atenúa en 2025-26.

Cómo se midió el desvío



MÓDULO 1

Generación real por unidad, programa por configuración (PCP y PID) y vertimiento por central.

MÓDULO 2

PCP = primera versión del día. En 2025-26 también el programa vigente a cada hora (PCP + PID).

MÓDULO 3

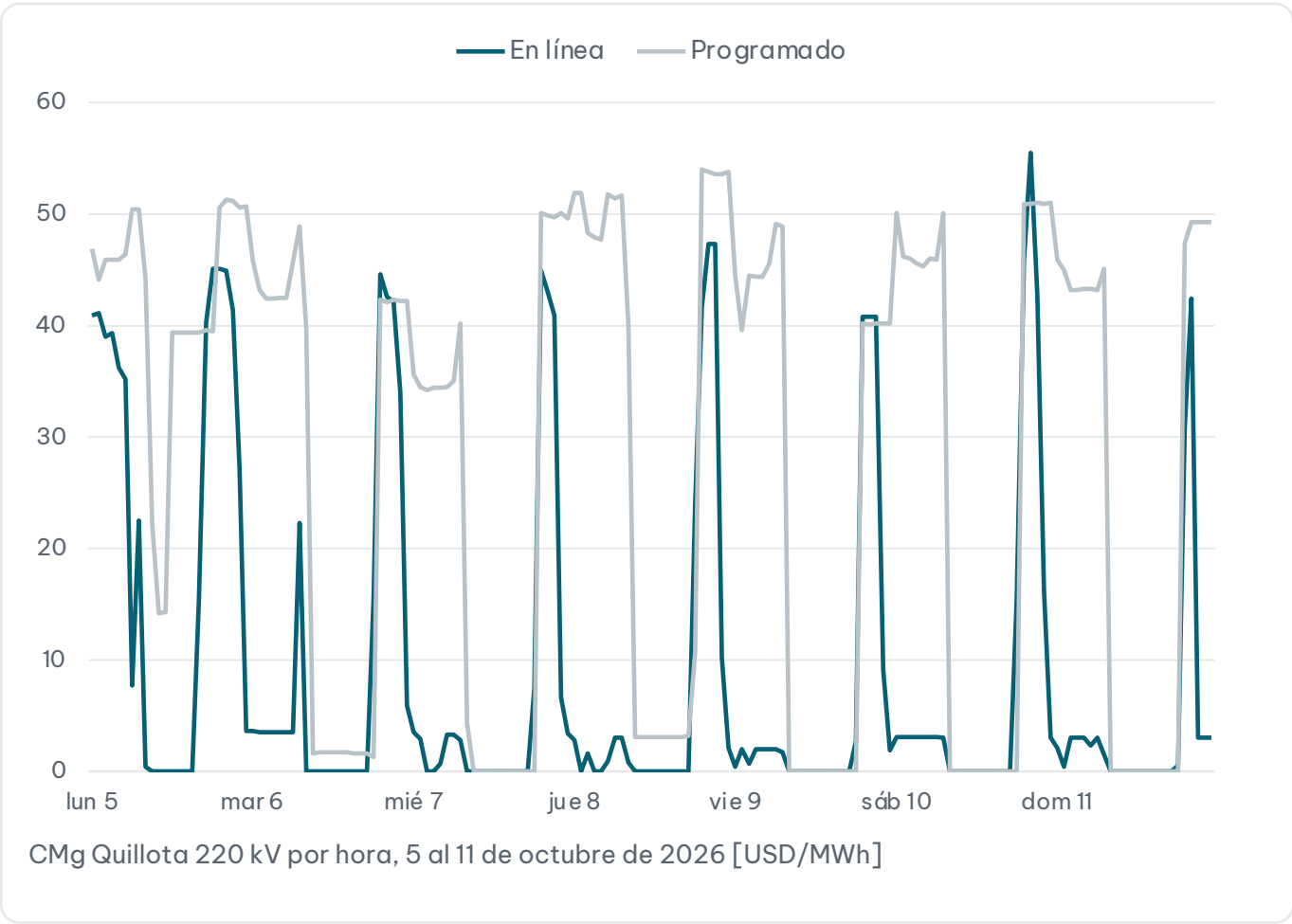
Entra una central el día que tiene medición y programa. Se excluyen horas con cobertura incompleta.

MÓDULO 4

Error = real - programa. Percentiles P5-P95 por hora y estación, sesgo y MAE en MW y % de capacidad.

Demanda = generación total de la flota cruzada, con BESS en neto. Solar potencial = generación real + vertimiento.

Seis madrugadas seguidas con el precio en cero

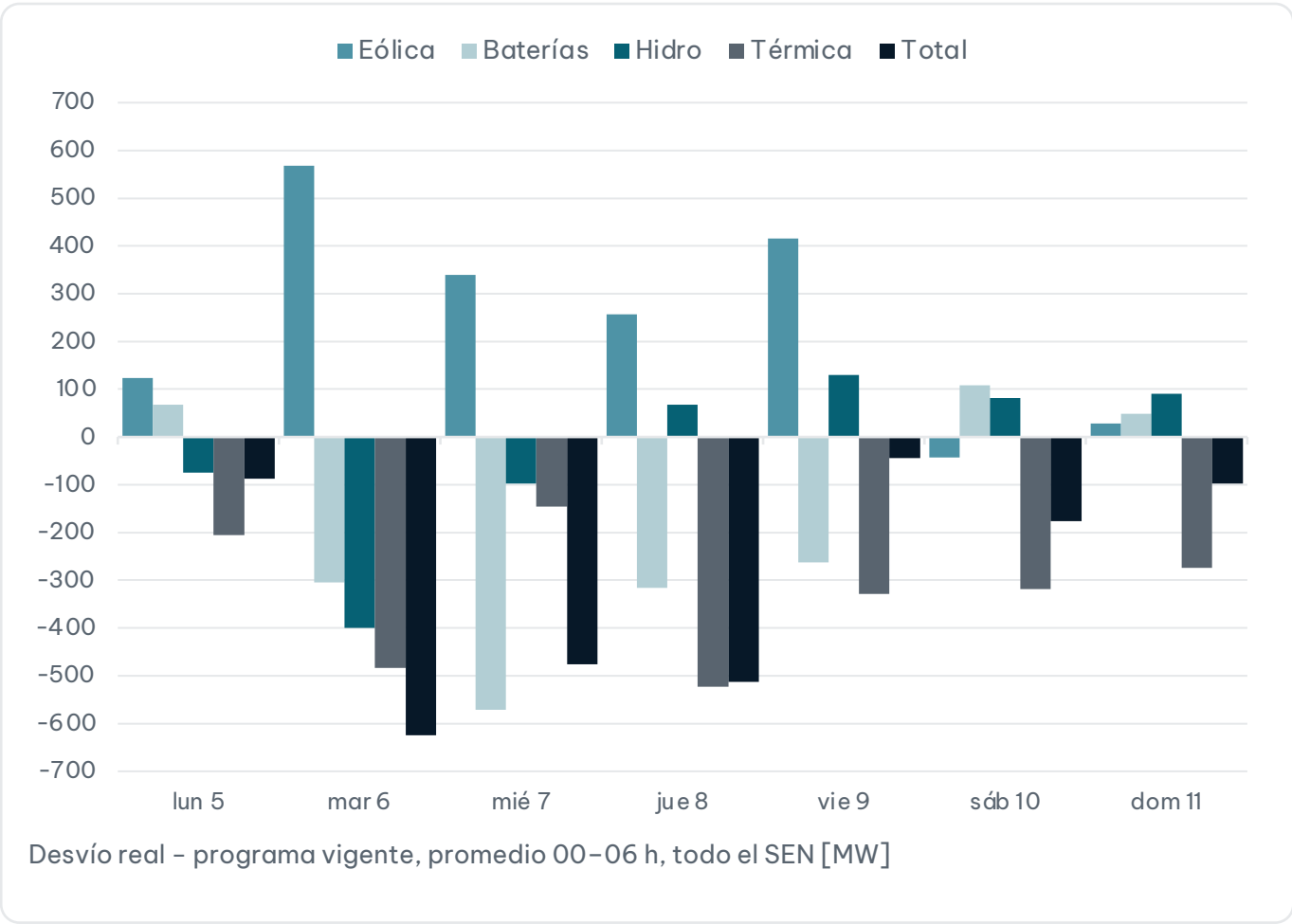


Cada día el precio es cero de 9 a 17 h, como el programa ya esperaba. La diferencia está en la noche: el programa la mantiene entre 35 y 54 USD/MWh, como una noche normal con térmicas a gas en el margen.

EN LÍNEA, EL PRECIO CAE DE NOCHE

- 1 Sube a 35–45 USD/MWh en las primeras tres horas y **vuelve a 2–4 USD/MWh antes de medianoche.**
- 2 Estuvo bajo 5 USD/MWh en **125 de 168 horas**; el programa esperaba 63, casi todas solares.
- 3 La única madrugada normal fue la del **lunes 5** (34 contra 47).
- 4 El patrón **siguió el 12 y el 13 de octubre.**

Menos demanda y más viento dejaron sobrante cada noche



Cada noche entró al sistema más energía barata de la que el programa esperaba, o se necesitó menos.

QUÉ CAMBIÓ CONTRA EL PROGRAMA

- 1 **Demanda:** del 6 al 8, la generación total quedó **480-620 MW bajo el programa**; el PCP esperó más consumo nocturno del que hubo.
- 2 **Viento:** del 6 al 9, la eólica del Norte Grande generó **415-610 MW más** que lo programado; el 10 y el 11, +55.
- 3 **Térmica:** bajó entre **150 y 520 MW** cada noche.
- 4 **Baterías del norte:** descargaron hasta **660 MW menos**.

La formación de los precios cero en la noche



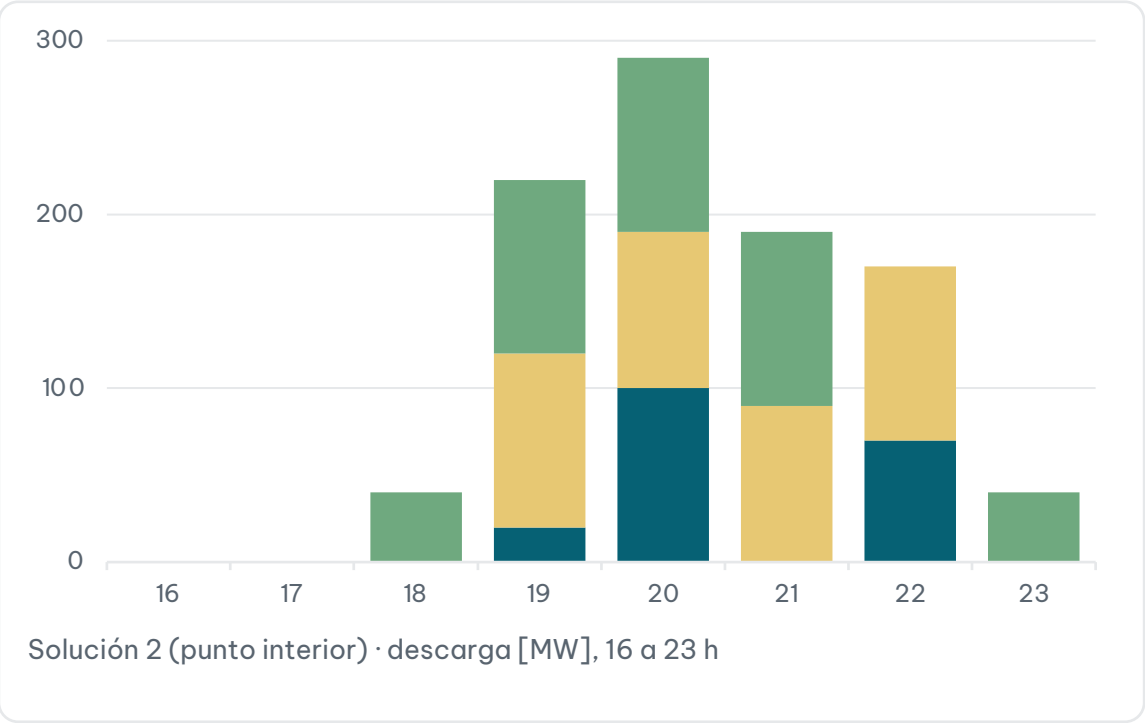
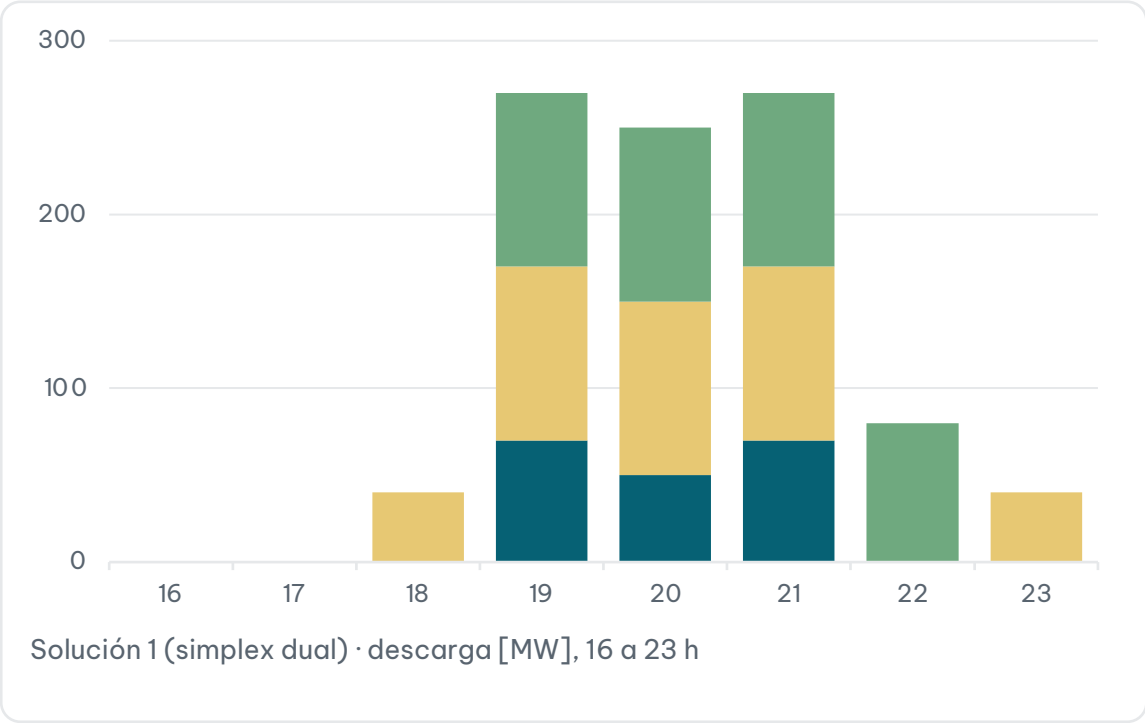
Una mayor demanda proyectada significa que se sincronizan **más unidades de las necesarias**; la operación real, conlleva el uso de otros activos y lleva a unidades a operar a mínimo técnico en la noche

Qué efectos tiene un óptimo que no es único

Dónde aparece la degeneración, **cuándo se convierte en plata** y qué debería definir la Norma Técnica.

Mismo costo, dos despachos distintos

Dos algoritmos del mismo solver resuelven **exactamente el mismo problema** y llegan al mismo costo total, con repartos distintos → Ocurre cuando un grupo de BESS desplazan la misma central en el tiempo o bien hay que decidir a quien despachar cuando una solución está saturada en potencia.



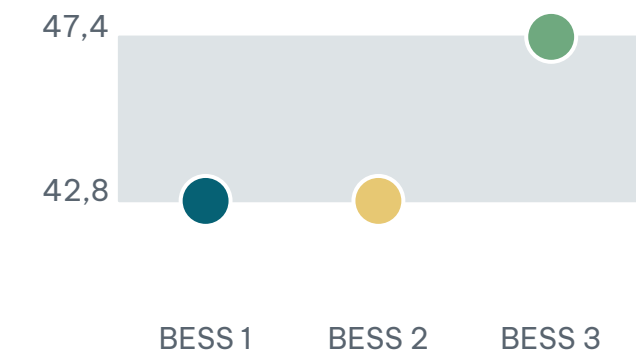
■ BESS 1 · 2 h ■ BESS 2 · 4 h ■ BESS 3 · 4 h

* Ejemplo ilustrativo – Despachos son distintos pues reemplazar la misma unidad térmica

El costo de oportunidad tampoco es único

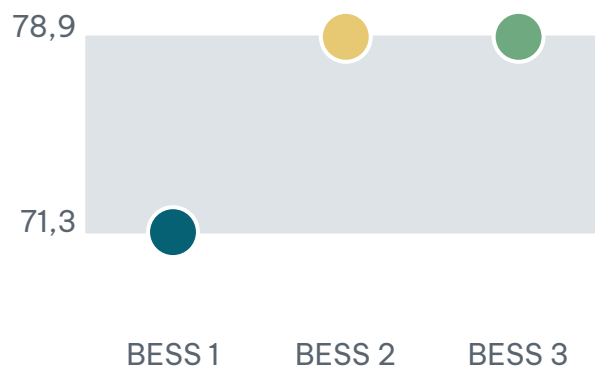
En la misma solución, BESS en el mismo estado reciben **CO distintos**. Todos son óptimos: el modelo no elige.

16 h · BESS llenos · CMg 45



Banda gris: CO óptimos [USD/MWh]

17 h · BESS llenos · CMg 75



Banda gris: CO óptimos [USD/MWh]

* Ejemplo ilustrativo

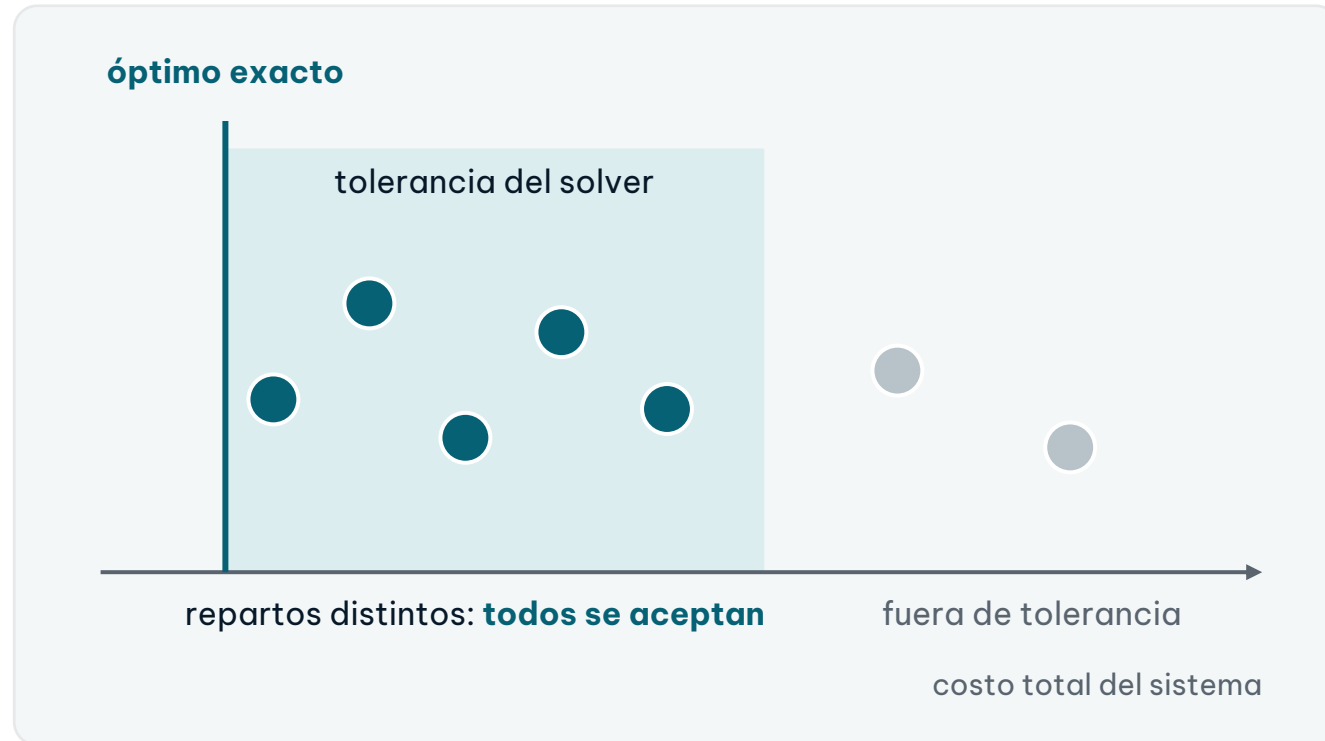
QUÉ OCURRE

- 1 Un BESS ocioso solo exige que su CO esté **en un rango de precios**.
- 2 Cada BESS puede tomar una posición dependiendo del punto elegido por el solver
- 3 El solver informa un punto. Con el DS 32, **ese punto ordena el listado**.

Banda = [ahorro con 1 MWh más ; costo con 1 MWh menos] en el estado de carga, re-resolviendo el modelo.

La tolerancia del solver ensancha el empate

El programa es un modelo entero mixto (MIP): **toda solución dentro de la tolerancia se acepta como óptima.**



Tolerancia MIP

En la práctica, «igual costo» significa **igual dentro de la tolerancia** del solver.

¿Encontrar la solución más justa?



Brecha de dualidad

Con variables binarias, el precio se obtiene **fijándolas** y leyendo el dual. En tiempo real, el precio no incorpora algunos multiplicadores relevantes (**el precio real esconde cosas**)

Los contratos convierten el reparto en plata o riesgo

Bajo el spot conviven PPA. Según su forma, el reparto **cambia el ingreso o el riesgo** de cada BESS.



PPA por producción

- Cobra un precio fijo por cada MWh que inyecta.
- Más MWh asignados es más ingreso, aunque el sistema sea indiferente.



PPA en bloque

- Venta en un bloque horario definido, y compra el faltante a CMg real.
- A precios del programa paga lo mismo con cualquier reparto.
- Con CMg real cambia el riesgo: desviación de 4,1 o 6,5 mil USD/día.

La neutralidad exige **cerrar la brecha programa-operación** y una regla que los contratos puedan anticipar.

El reparto cambia entre programas y en la operación

52 BESS con programa, mismo período. Comparamos el **programa del día anterior (PCP)**, el **programa vigente (último PID)** y la **operación real**.

42%

de la energía programada cambia entre el PCP y el programa vigente

$\Sigma|PID - PCP| / \Sigma|PCP| = 242.910 / 573.960 \text{ MWh (carga y descarga).}$

29%

de la descarga real ocurre en horas sin descarga programada

75.985 de 263.832 MWh descargados en el período.

78%

de diferencia entre la operación real y el programa vigente

$\Sigma|real - PID| / \Sigma|PID| = 441.976 / 569.311 \text{ MWh.}$

Mezclan causas legítimas (SSCC, instrucciones del CDC, pronósticos, restricciones): no prueban degeneración; muestran que el reparto no es trazable. 22-sep a 5-oct-2026, horario. Fuente: Galilei.

ALGUNAS RECOMENDACIONES

Recomendaciones al Comité

Cómo desempatar sin cambiar el costo ni los precios

Ocho principios para una regla de desempate

Sirven para evaluar cualquier alternativa: la NT debería **cumplirlos todos o declarar dónde no**.

1 · Eficiencia primero

Solo se elige entre soluciones de costo óptimo, con tolerancia declarada.

2 · Neutral por MWh

En empates de energía, nadie gana ni pierde por **invertir en más horas**.

3 · Dato medido

Usa datos observables (SoC telemedido), **no las variables empatadas**.

4 · Estable

Mismo dato, mismo resultado; el PID **no reordena sin causa**.

5 · Auditable

Regla y parámetros públicos, verificables con datos del CEN.

6 · Precio coherente

Convención explícita si el CO **no es único**.

7 · Alcance completo

Carga y descarga; **programa (PCP-PID) y tiempo real (SCED)**.

8 · Dentro del marco

Cabe en los tiempos del PID y en el DS 125.

Primera decisión: dónde se rompe el empate

El mecanismo define **en qué parte del proceso** se elige entre soluciones de igual costo.

Mecanismo	A favor	En contra
Lo que entregue el solver	Sin costo de implementación	Arbitrario; cambia con el algoritmo y entre corridas
Penalización pequeña en el objetivo	Una sola resolución	Mal calibrada, cambia el despacho o no rompe el empate
Segunda etapa pública	No cambia costo ni precios; admite cualquier criterio	Un PL adicional por corrida
Prorrata en el listado (Art. 45 bis)	Vigente	Solo tiempo real; no toca el PCP, el PID ni el CO
Rotación o sorteo	Simple	Sin relación con el valor para el sistema; inestable

Recomendación: segunda etapa pública en el programa, y el mismo criterio en la prorrata del Art. 45 bis para el tiempo real.

Elegir entre óptimos sin cambiar el costo

El programa se resuelve dos veces: primero el costo y los precios; después, entre las soluciones de ese costo, **la que mejor cumple un criterio público**.

ETAPA 1 · LA DE HOY

$z^* = \min \sum \text{costo} \cdot g$
 s.a. balance, estado de carga, límites
PL con binarias fijas

ENTREGA

Costo z^* , CMg y CO

POR QUÉ SIRVE

- 1 No cambia el costo ni los precios:** todo óptimo de un PL es compatible con los mismos CMg y CO.
- 2 Reemplaza al solver:** el resultado deja de depender del algoritmo y de la corrida.
- 3 Pública:** la NT fija el criterio, la referencia y la holgura; cualquiera reproduce el resultado.
- 4 Costo:** un PL adicional por corrida.

ETAPA 2 · DESEMPATE

$\min D(x, \text{criterio público})$
 s.a. las mismas restricciones
 $\sum \text{costo} \cdot g \leq z^* + \tau$

ENTREGA

Despacho único y reproducible

D : distancia al criterio, por ejemplo $\sum |\text{SoC \% de cada BESS} - \text{SoC \% promedio}|$. τ : holgura numérica mínima (por ejemplo 1 USD), no la tolerancia MIP.

Segunda decisión: con qué criterio se reparte

El criterio es la referencia que usa el mecanismo. Define **quién gana y quién pierde** cuando el sistema es indiferente.

Criterio	A favor	En contra
Potencia máxima	Simple y observable	Ignora el SoC; vacía primero a los BESS cortos
min(P, SoC) por intervalo	Lectura literal del Art. 45 bis	En la práctica, prorrata por MW salvo cerca de vacío
Energía almacenada (SoC % igual)	Neutral por MWh; flota disponible más tiempo	Más MW por MW a los BESS largos
Programa vigente	Estabilidad entre PCP y PID	Hereda la elección anterior; necesita un criterio base
Costo de ciclado declarado	Costo real; elimina ciclos inútiles	No rompe la simetría: es un complemento

En tiempo real, el mismo criterio cabe en el Art. 45 bis: **Potencia Disponible = min(P, SoC/H)**, con H = horas que quedan de la ventana de descarga.

Si el CO no es único, la convención debe ser explícita

Cuando el CO es una banda, alguien elige un punto. Hoy lo elige el solver; **la NT puede fijarlo.**

Convención	A favor	En contra
Lo que informe el solver	Sin costo	BESS iguales con CO distintos; cambia entre corridas
Un extremo o el punto medio	Simple y reproducible	Un solo número para dos decisiones: cargar y descargar
Agrupación de CO en Tiers	BESS con CO similares dentro de threshold se descargan de la misma forma	Requiere de la definición de una banda de tolerancia
CO por tramos de SoC (curva W)	Evita el todo-o-nada; empates más raros	Corridas paramétricas del mismo modelo (Art. 38)

CO+ = costo de tener 1 MWh menos; CO- = valor de 1 MWh más. Son las pendientes izquierda y derecha de W(e) en un quiebre (lámina 6). Unidad: USD por MWh inyectado o retirado, incluida la eficiencia.

Algunas propuestas a incorporar en la Norma Técnica

Evidentemente el paso 0 es cerrar la importante brecha entre la programación y la operación real



Desempate

- Segunda etapa pública en PCP, PID y despacho automático (Arts. 45 bis y 117 bis)
- Criterio SoC % igual; en el PID, primero el programa vigente
- Potencia Disponible de SAE = $\min(P, \text{SoC}/H)$, con H = ventana restante



Costo de oportunidad

- Publicar la banda $[CO-, CO+]$ por BESS y hora. Agrupación por “tiers” (Art. 38)
- CO desde el PL con binarias fijas; ~~piloto por tramos de SoC~~ (Art. 37)
- Avanzar en estrategias de FCF para cuando SCED esté implementado → Costo Marginal Real fijado por SCED



Calidad del programa

- Modelar criterios utilizados en la operación real y bloques subhorarios en rampas (Art. 38 inc. 1)
- Recalcular CO y PID por evento (Art. 38 inc. 2)
- Publicar tolerancia MIP, regla, banda y sesgo de pronóstico (Art. 38 inc. 3)

SUGERENCIA → Convertir una decisión del solver en una **regla pública, neutral y auditable**.



¡Muchas gracias!

Esríbenos: info@spec.cl

spec.cl · info@spec.cl
Los Militares 5885, Oficina 803, Las Condes

