



Operação de BESS no SIN com forte crescimento da geração solar

Roberto Brandão

PD 10307-0222/2023

Pesquisa de aplicação de sistemas de armazenamento de energia de baterias (BESS) no sistema de transmissão.

Histórico da Pesquisa e Resultados Obtidos

- Estudo da influência do BESS no planejamento da expansão da geração
- Estudo sobre custos de Instalação e Operação dos Projetos do BESS
- Estudo dos Fluxos de Receita ou Economia do BESS
- Proposta e avaliação de Modelos de Negócios
- Cálculo de potência firme equivalente de projetos de BESS
- Proposta de inovações regulatórias
- **Estudo sobre operação de BESS no LRCAP de Armazenamento 2025**

Sumário

1. Introdução
2. Operação do Sistema em 2023 e 2024
3. Metodologia utilizada nas simulações
4. Operação do Sistema em 2030
5. Conclusões sobre a operação de BESS no SIN e implicações

1. Introdução

- Cenário atual: **rápido crescimento** da geração **solar** na matriz elétrica.
- Objetivo do estudo: explorar o **papel dos BESS na operação do sistema** em 2030, considerando diretrizes da Consulta Pública nº 176/2024.
- Fatores **impulsionadores** do crescimento **solar**:
 - **Redução acentuada de custos** de painéis solares (US\$ 0,10/W em 2024, metade do preço de 2022), acompanhada de aumento de eficiência.
 - **Subsídios**: Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) para geração distribuída e descontos tarifários para projetos de geração renovável centralizada.

1. Introdução

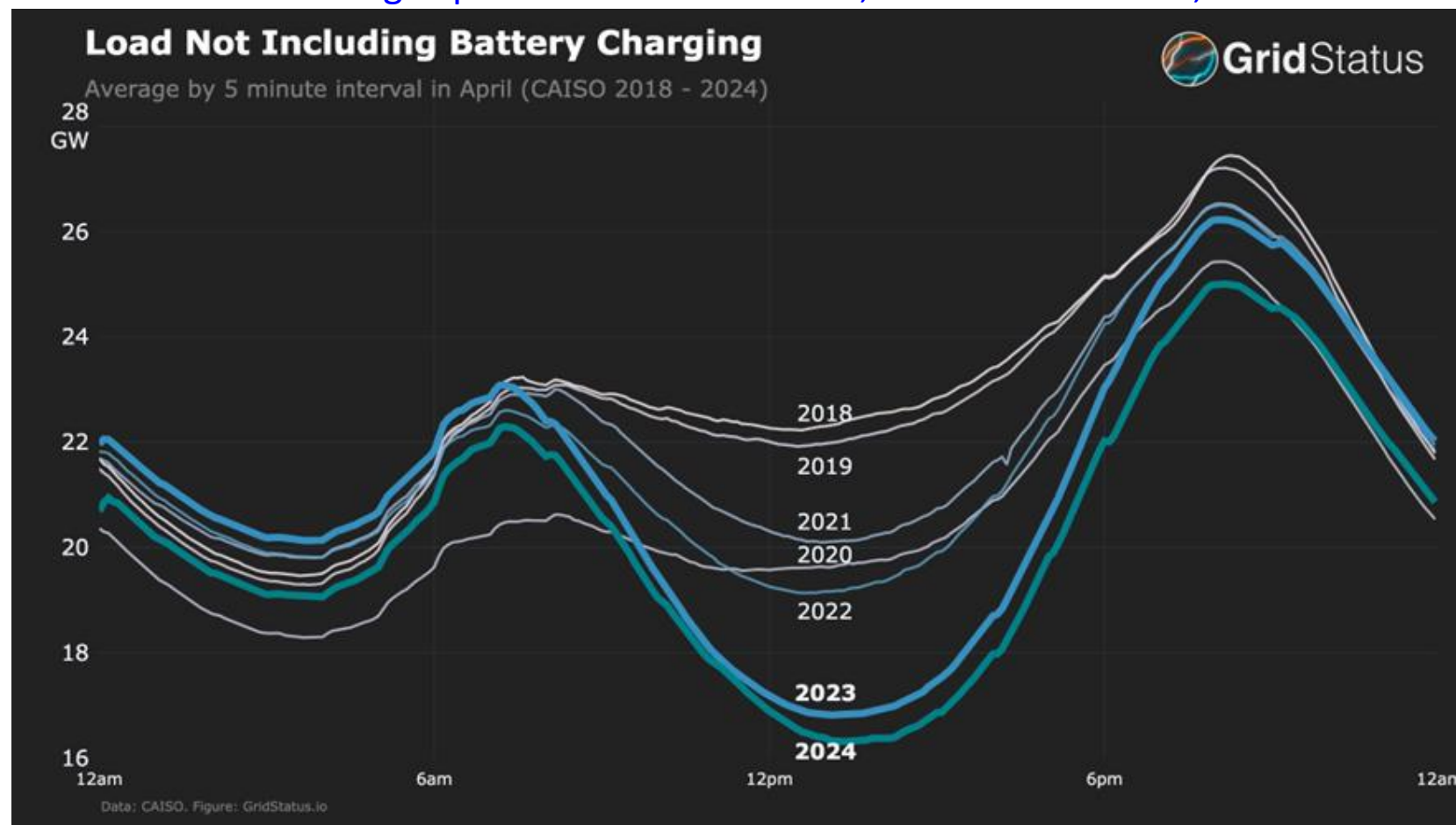
Proposta do estudo:

1. **Analisar a operação de BESS no SIN oferecendo:**
 - Capacidade firme.
 - Flexibilidade operacional.
 - Atendimento à demanda de ponta.
 - Redução do desperdício de energia renovável.
2. **Subsidiar decisões estratégicas** associadas ao Leilão de Reserva de Capacidade (LRCAP) 2025.

2. Operação do SIN em 2023 e 2024

O surgimento da curva do pato na operação do SIN.

California: Carga aparente no mês de abril, entre 2018 e 2024, em GW

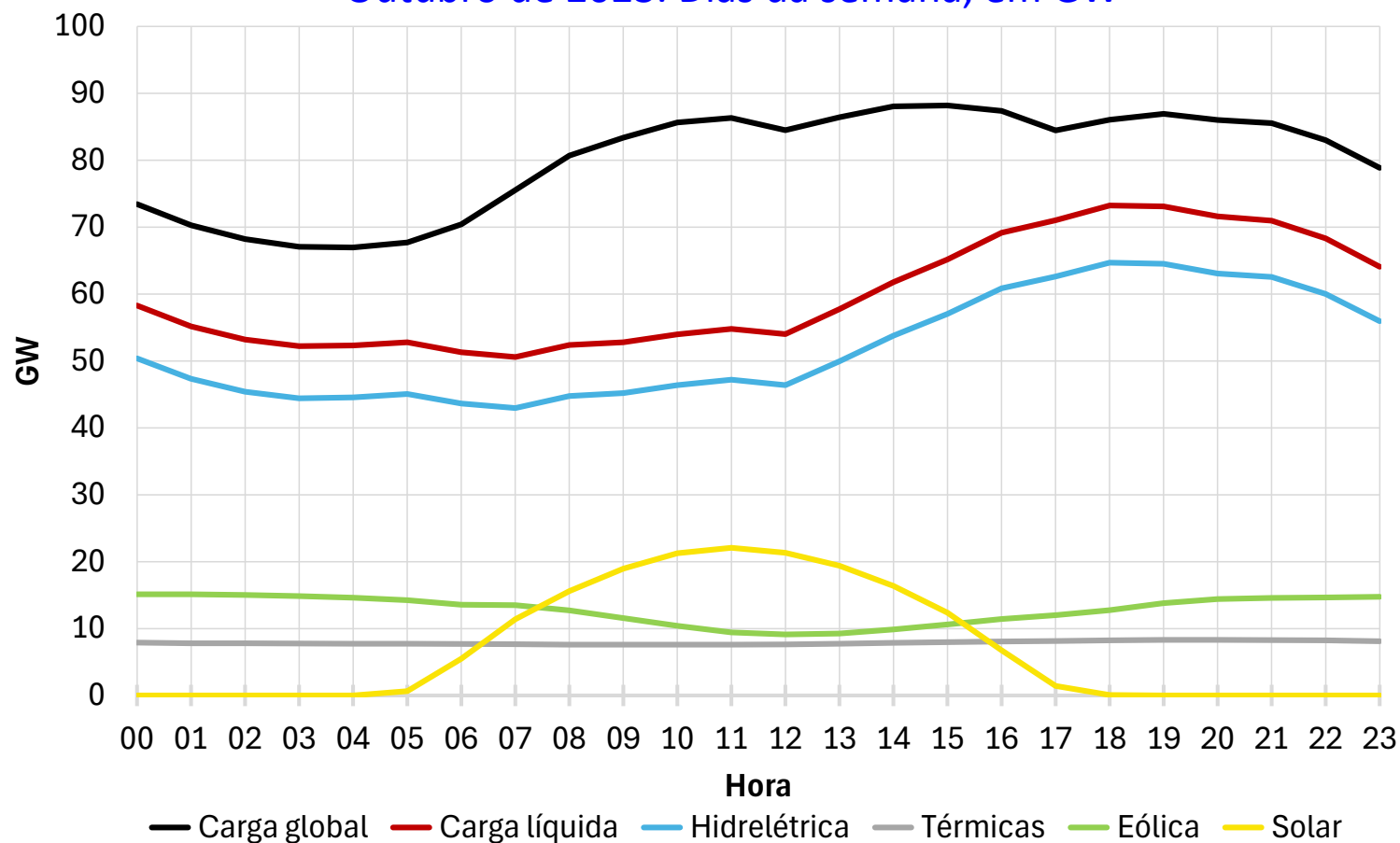


Fonte: Grid Status

2. Operação do SIN em 2023 e 2024

O surgimento da curva do pato na operação do SIN.

SIN: Carga global, carga líquida e composição da geração
Outubro de 2023. Dias da semana, em GW

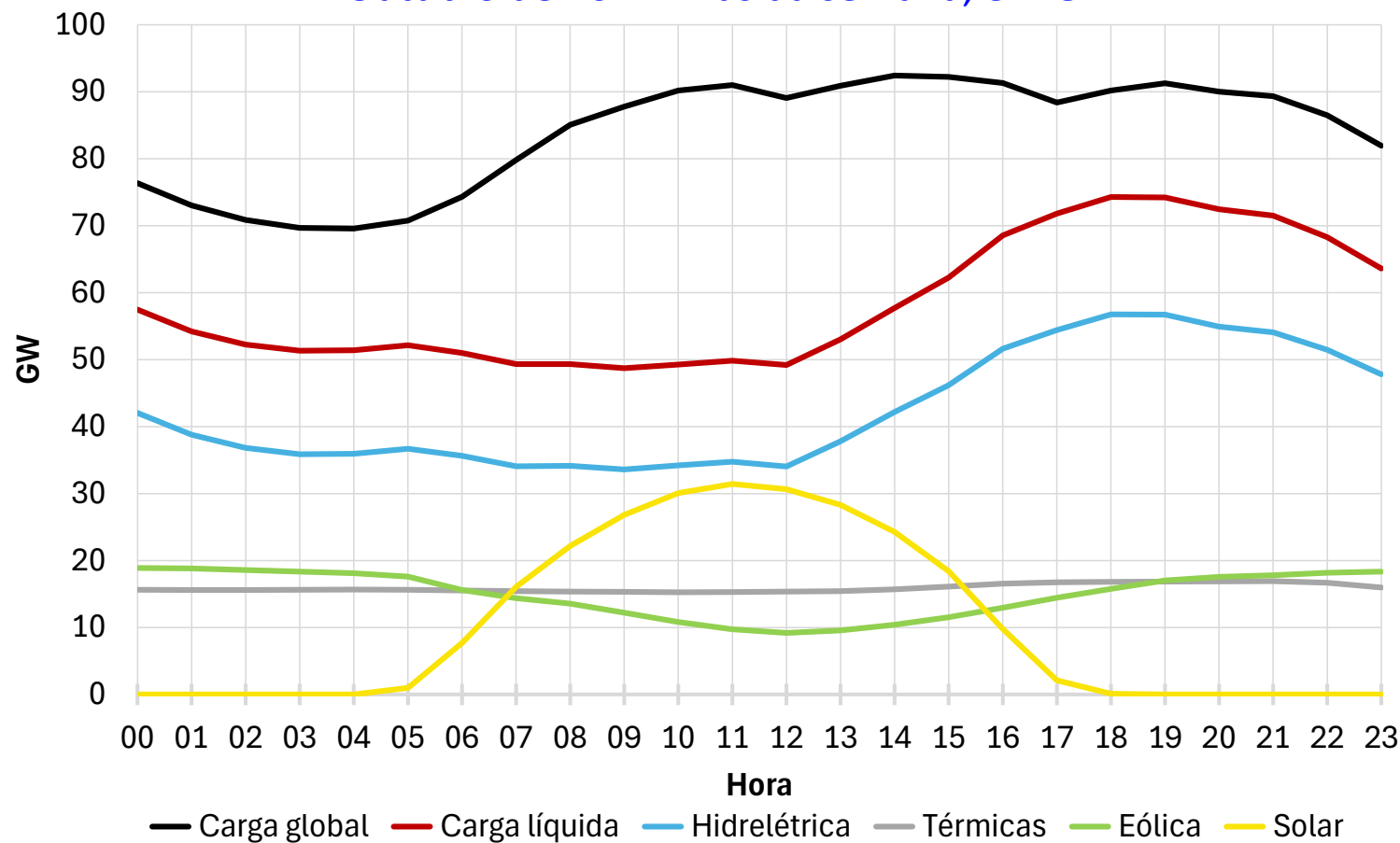


ONS, Histórico da operação

2. Operação do SIN em 2023 e 2024

O surgimento da curva do pato na operação do SIN.

SIN: Carga global, carga líquida e composição da geração
 Outubro de 2024. Dias da semana, em GW



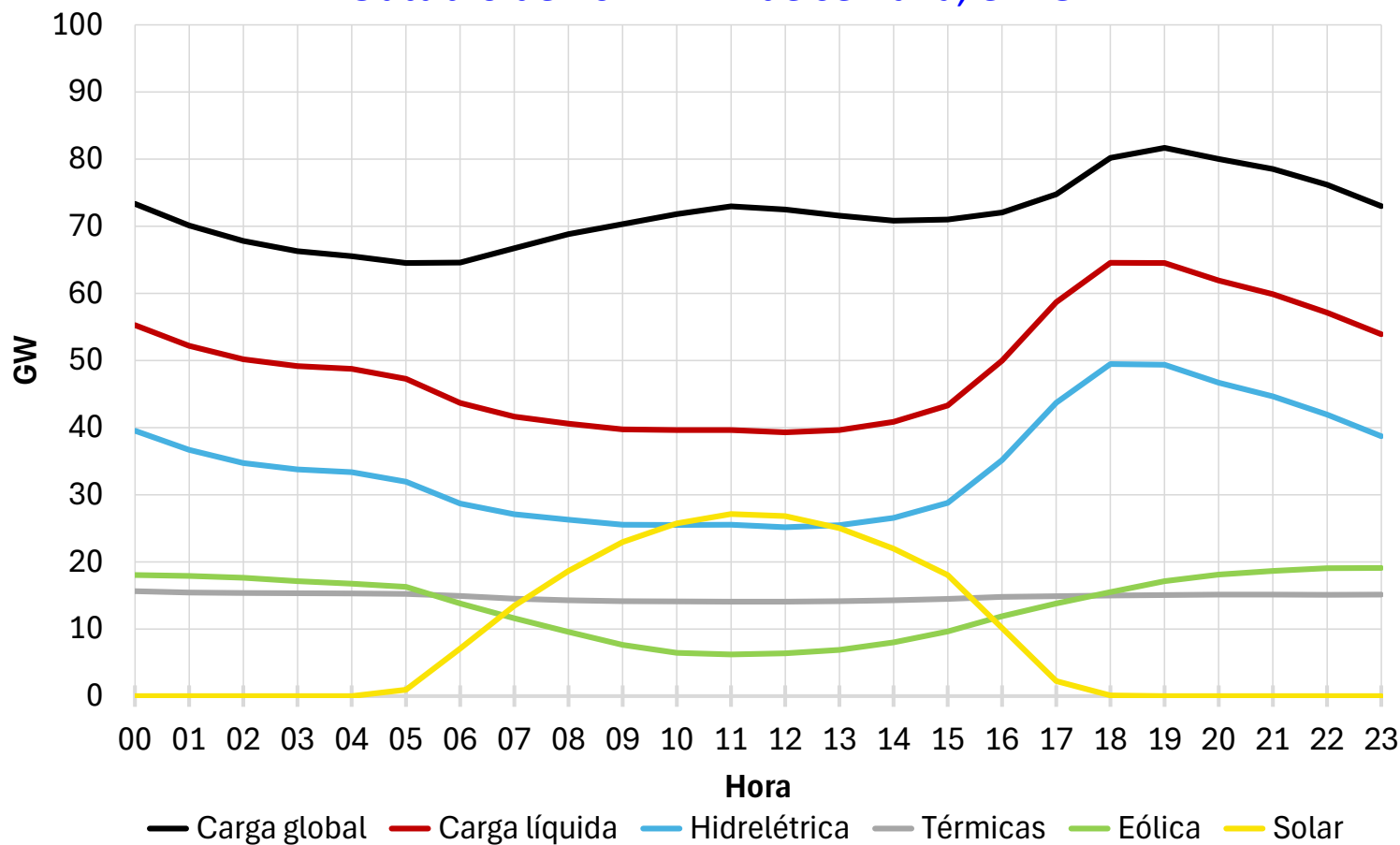
> 2030

ONS, Histórico da operação

2. Operação do SIN em 2023 e 2024

O surgimento da curva do pato na operação do SIN.

SIN: Carga global, carga líquida e composição da geração
Outubro de 2024. Fim de semana, em GW



> 2030

ONS, Histórico da operação

3. Metodologia utilizada nas simulações

Expansão do SIN para 2030.

Simulações da expansão e da operação ao mínimo custo do SIN em 2030.

- Objetivo: entender a lógica de operação dos BESS e identificar implicações para a formatação do leilão e da regulação associada.

Configuração das Simulações:

- Ferramenta utilizada: software Plexos 10.
- Referência inicial: Plano de Operação Energética 2027 (PEN 2027, do ONS).

3. Metodologia utilizada nas simulações

Expansão do SIN para 2030.

Parâmetros de expansão até 2030:

- Ponto de partida é a configuração do PEN em 2027.
- Crescimento da carga projetado: 3,4% ao ano até 2030.
- Incrementos mínimos em geração eólica.
- Crescimento da geração solar desacelera, mas é a tônica da expansão em termos de energia.

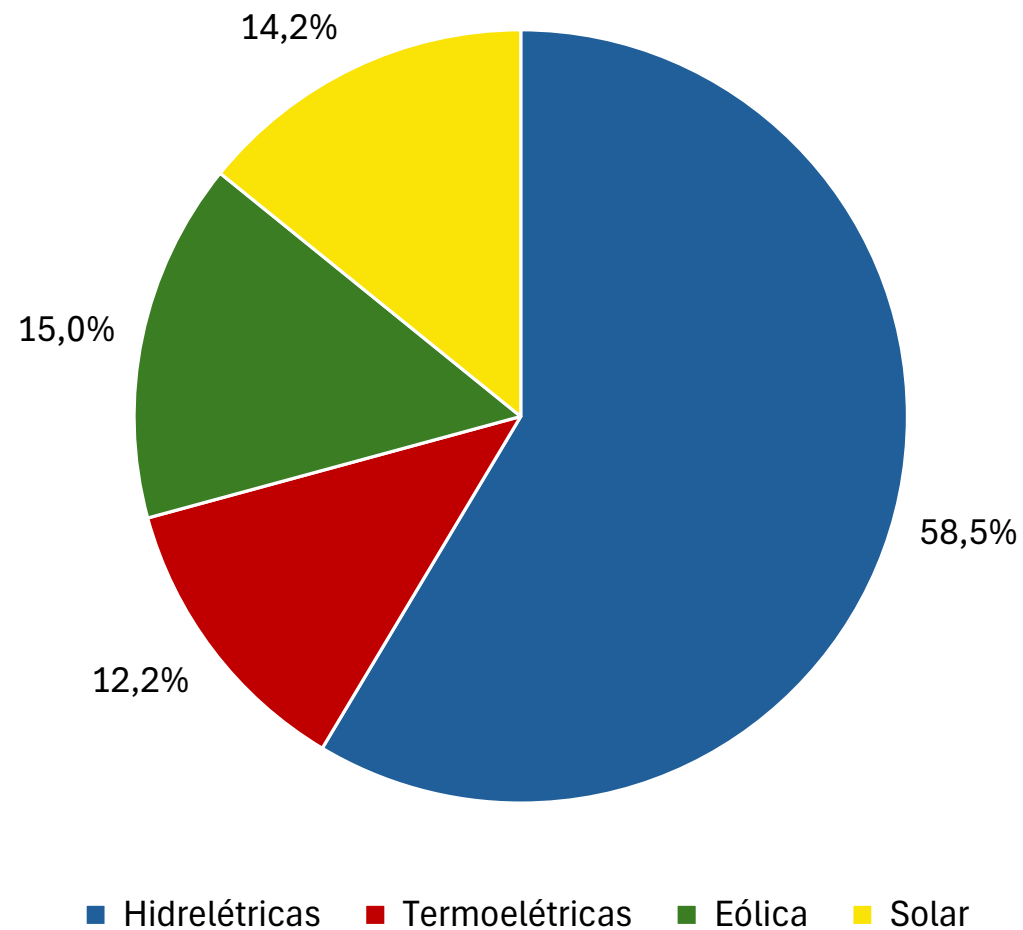
Modelagem da operação deu destaque à representação da flexibilidade operativa:

- Flexibilização do despacho térmico (Ton atual não é representado).
- Representação das restrições de rampas de defluência de hidrelétricas.

3. Metodologia utilizada nas simulações

Expansão do SIN para 2030.

Mix de geração em 2030, em % da geração total

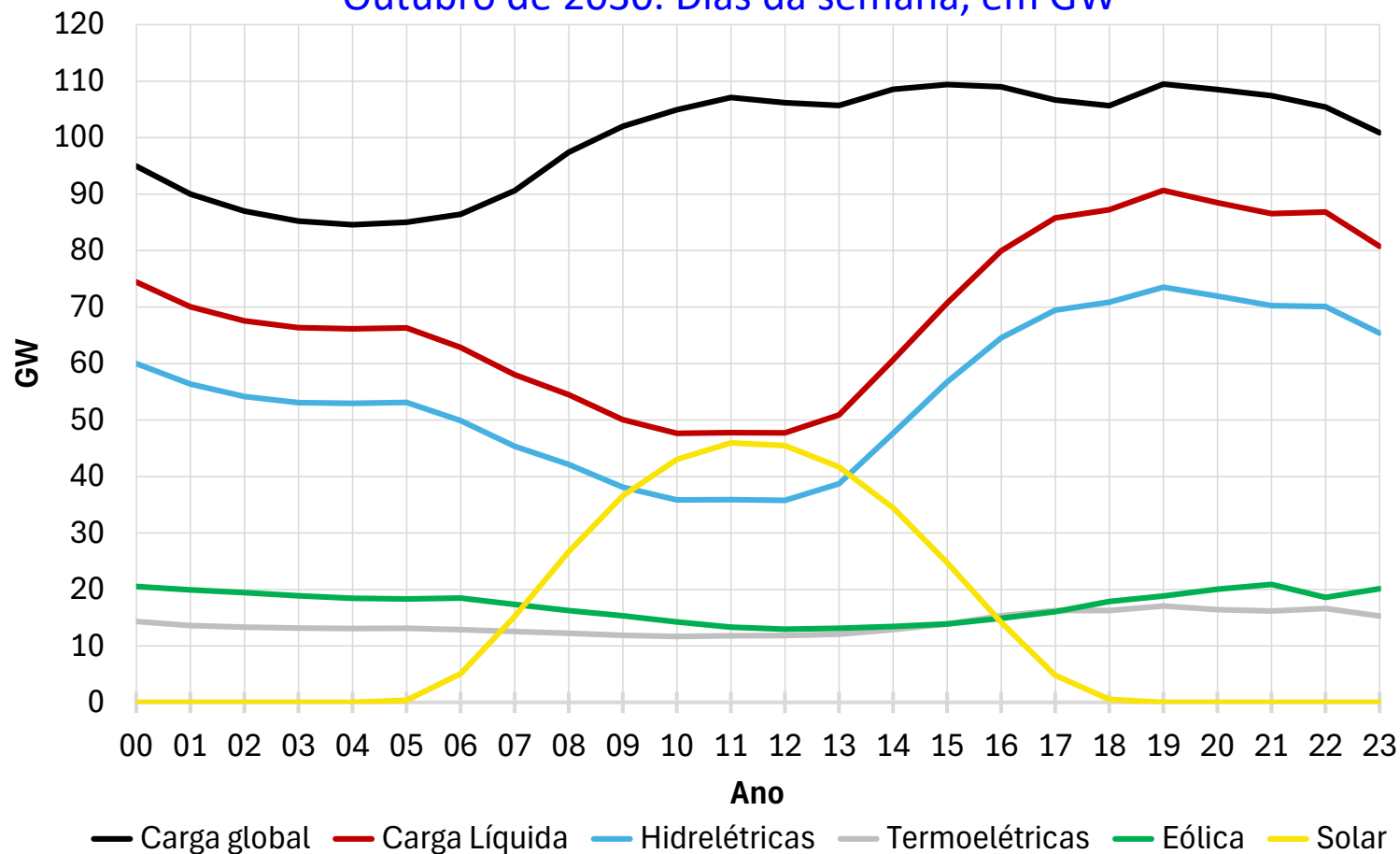


Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Caso base: sem nenhum BESS.

SIN: Carga global, carga líquida e composição da geração
 Outubro de 2030. Dias da semana, em GW



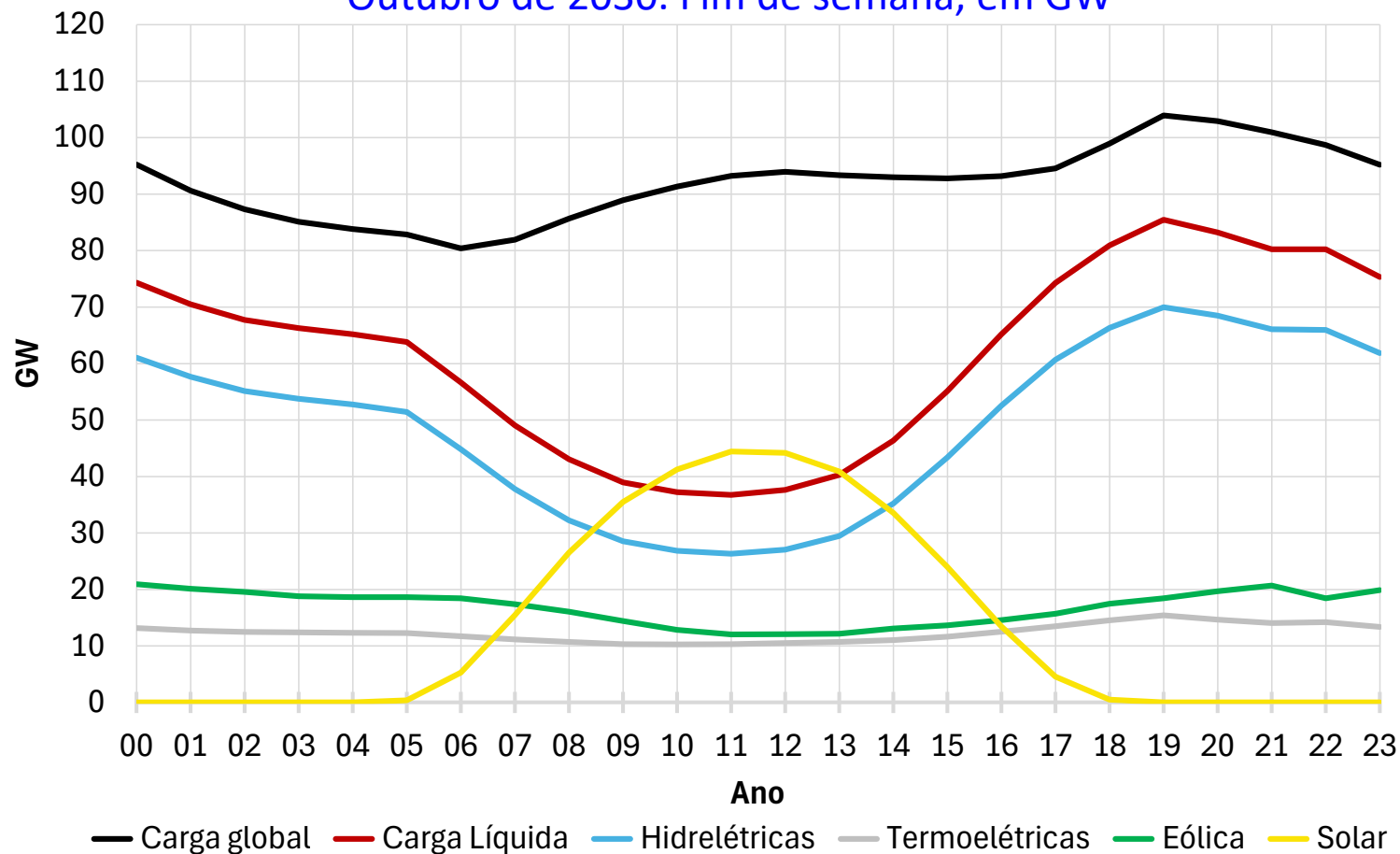
> 2024

Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Caso base: sem nenhum BESS.

SIN: Carga global, carga líquida e composição da geração
 Outubro de 2030. Fim de semana, em GW



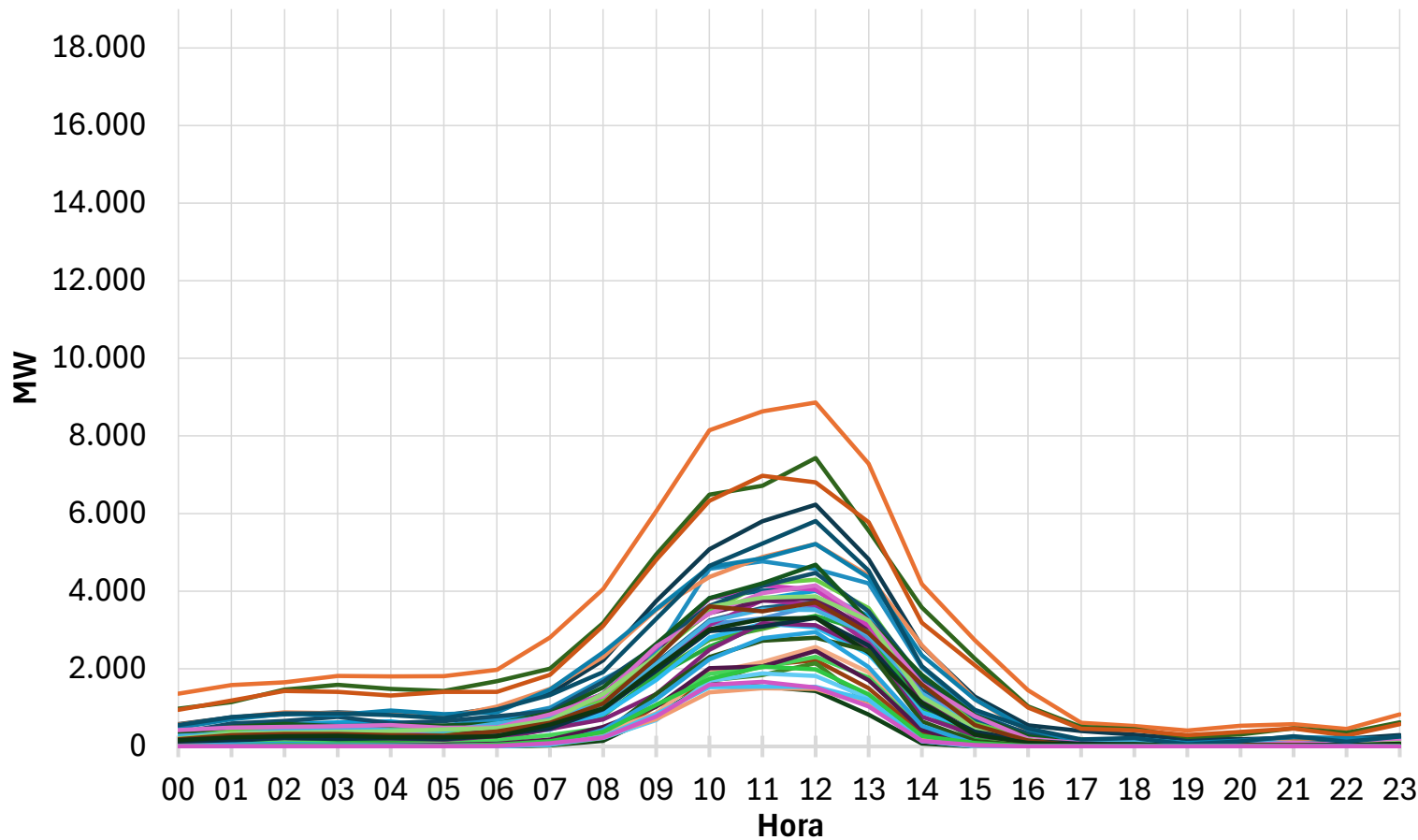
> 2024

Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Caso base: sem nenhum BESS.

SIN: Curtailment em 40 séries
Dia de semana em 2030, em MW

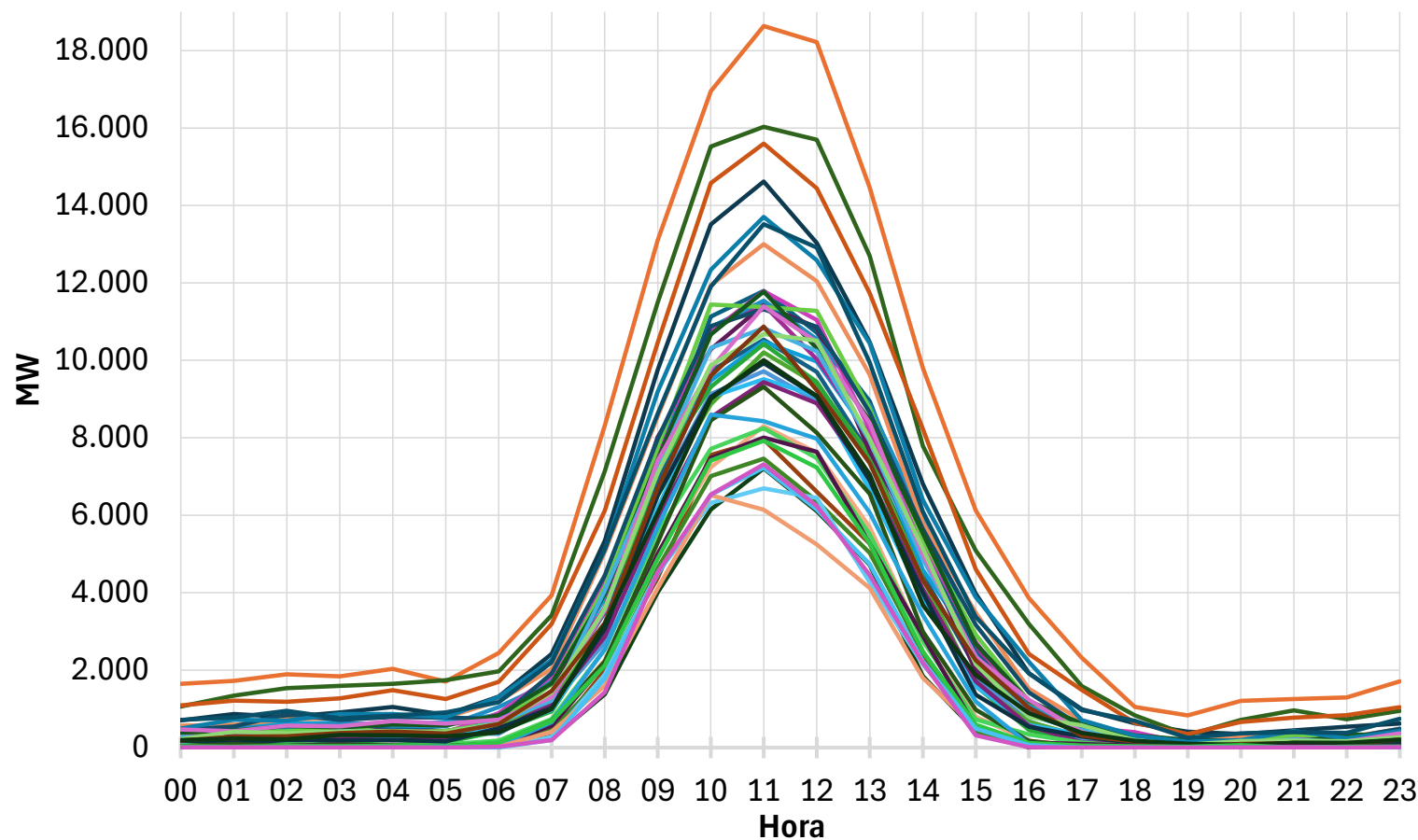


Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Caso base: sem nenhum BESS.

SIN: Curtailment em 40 séries
Fim de semana em 2030, em MW

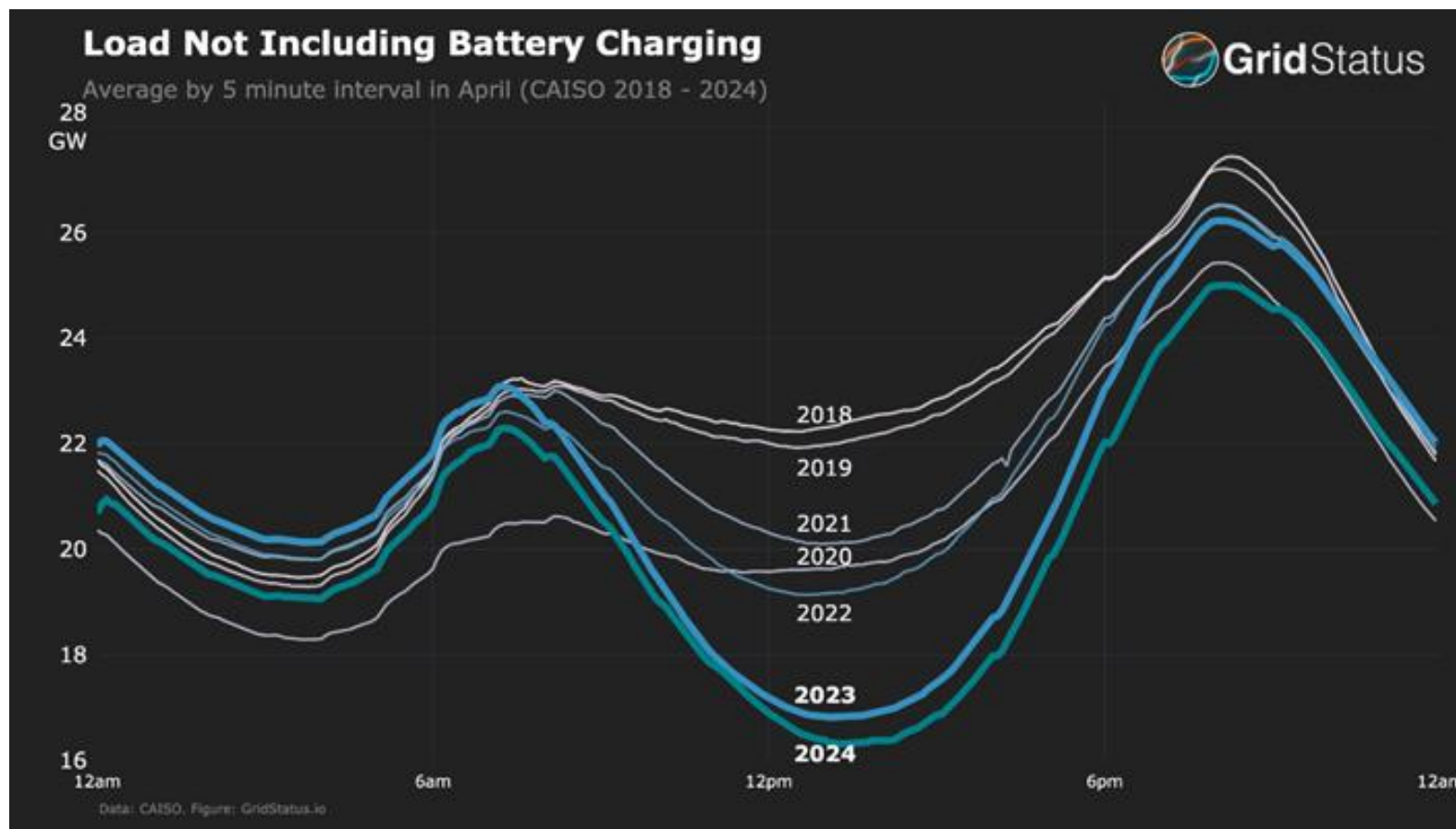


Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Operação de BESS na Califórnia.

CAISO: Carga excluindo o carregamento das baterias em um dia médio do mês de abril, entre 2018 e 2024, em GW

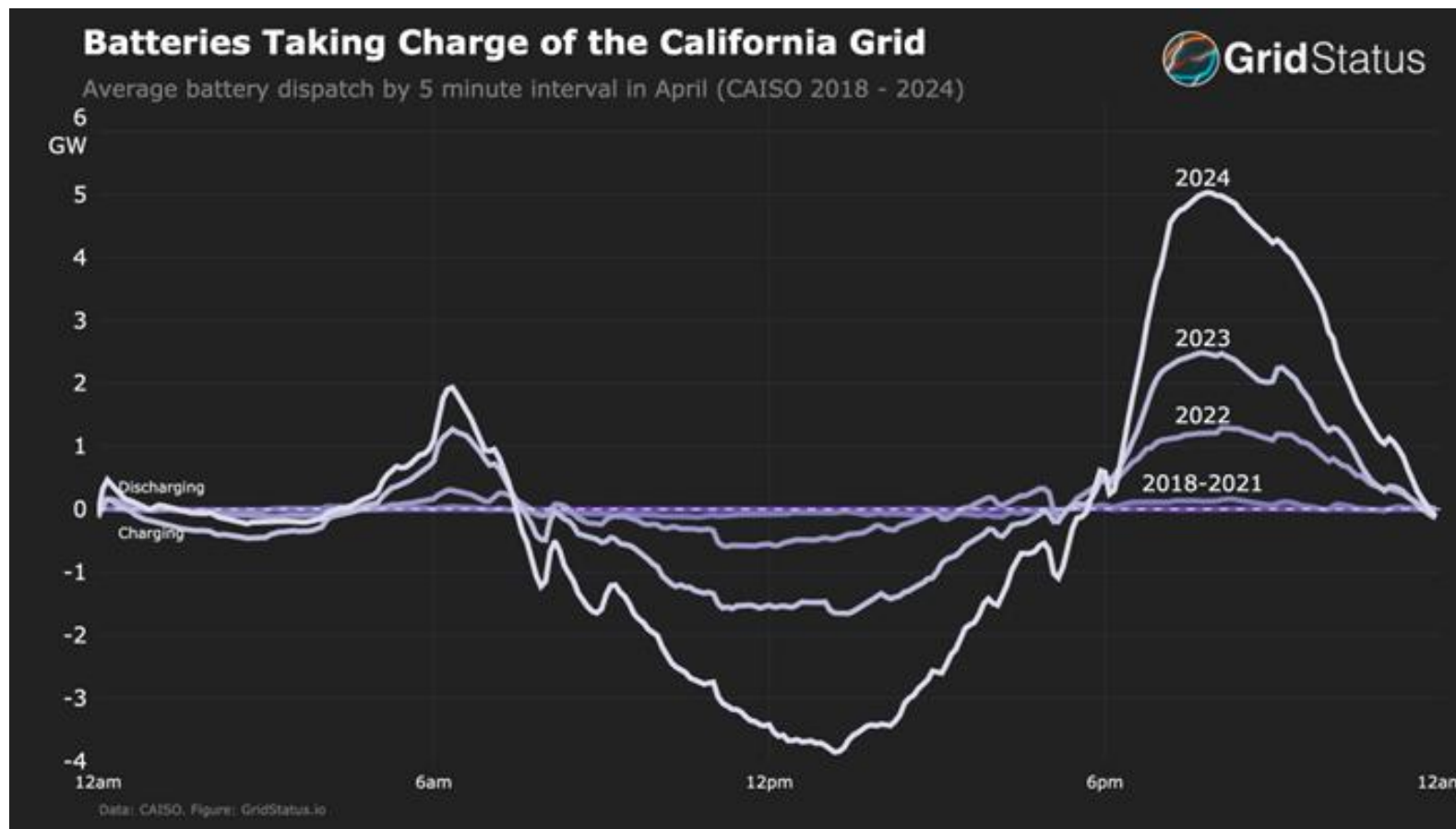


Fonte: Grid Status

4. Operação do Sistema em 2030

Operação de BESS na Califórnia.

CAISO: Operação das baterias em um dia de abril, entre 2018 e 2024, em GW



> BR 2030

Fonte: Grid Status

4. Operação do Sistema em 2030

Funções básicas dos BESS no LRCAP 2025.

Objetivo primário: fornecer **capacidade firme** para o Sistema Interligado Nacional (SIN), garantindo confiabilidade em momentos críticos.

Funções complementares:

- **Flexibilidade operativa:** suporte às rampas de carga líquida (entrada e saída da geração solar) com atenuação do fenômeno da “Curva do Pato”.
- **Redução de curtailment e vertimentos:** absorção de excedentes de geração renovável em horários de baixa demanda.
- **Atendimento** à demanda de **ponta:** injeção de energia em horários críticos (fim da tarde e início da noite).

4. Operação do Sistema em 2030

Funções básicas dos BESS no LRCAP 2025.

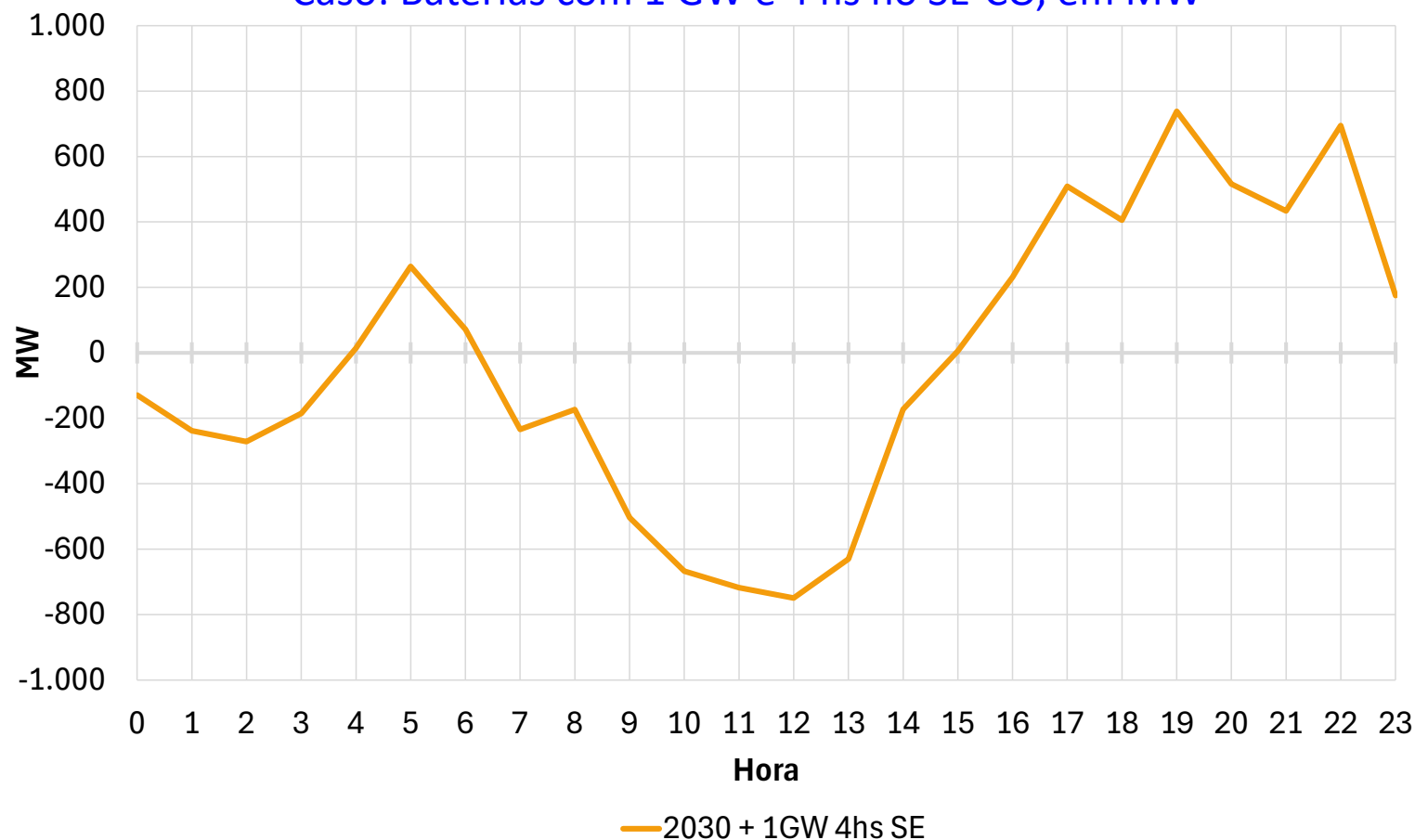
Requisitos operacionais:

- Disponibilidade de 4 horas à potência máxima por dia (1 ciclo completo).
- Despacho pelo ONS: participação no despacho otimizado do sistema, minimizando custos operacionais.

4. Operação do Sistema em 2030

Operação dos BESS no SIN em 2030.

Operação de baterias em dia útil de outubro de 2030
 Caso: Baterias com 1 GW e 4 hs no SE-CO, em MW



> California

Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Operação dos BESS no SIN em 2030.

Geração (carga) horária em semana média em 2030

Caso: Baterias com 1 GW e 4hs no SE-CO, em MW

Dia/Hora	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Domingo	-58	-112	-127	-73	52	257	29	-264	-593	-655	-595	-596	-544	-441	-361	-104	-2	203	630	822	682	440	586	182
Segunda	-72	-234	-270	-214	-63	209	302	39	-101	-488	-752	-749	-784	-690	-325	-11	41	172	218	626	728	817	828	495
Terça	-317	-308	-383	-347	-109	220	312	80	-66	-495	-720	-769	-780	-665	-194	9	333	648	502	691	485	359	542	121
Quarta	-87	-273	-312	-233	-47	225	265	13	-146	-518	-751	-777	-794	-699	-169	12	338	658	522	717	469	328	520	141
Quinta	-81	-266	-315	-230	-71	229	285	2	-149	-519	-769	-774	-808	-703	-172	9	348	652	543	737	464	308	500	145
Sexta	-72	-239	-311	-209	-66	227	240	-21	-110	-510	-752	-775	-817	-717	-205	18	319	629	583	748	462	261	494	144
Sábado	-38	-173	-199	-116	54	259	98	-145	-335	-652	-715	-686	-713	-578	-330	-37	63	447	727	879	696	336	351	63
Média	-104	-230	-274	-203	-36	232	219	-42	-214	-548	-722	-732	-749	-642	-251	-15	206	487	532	746	569	407	546	185

Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Operação dos BESS no SIN em 2030.

Custo Marginal da Operação (CMO) em semana média em 2030
 Caso: Baterias com 1 GW e 4hs no SE-CO, em R\$/MWh

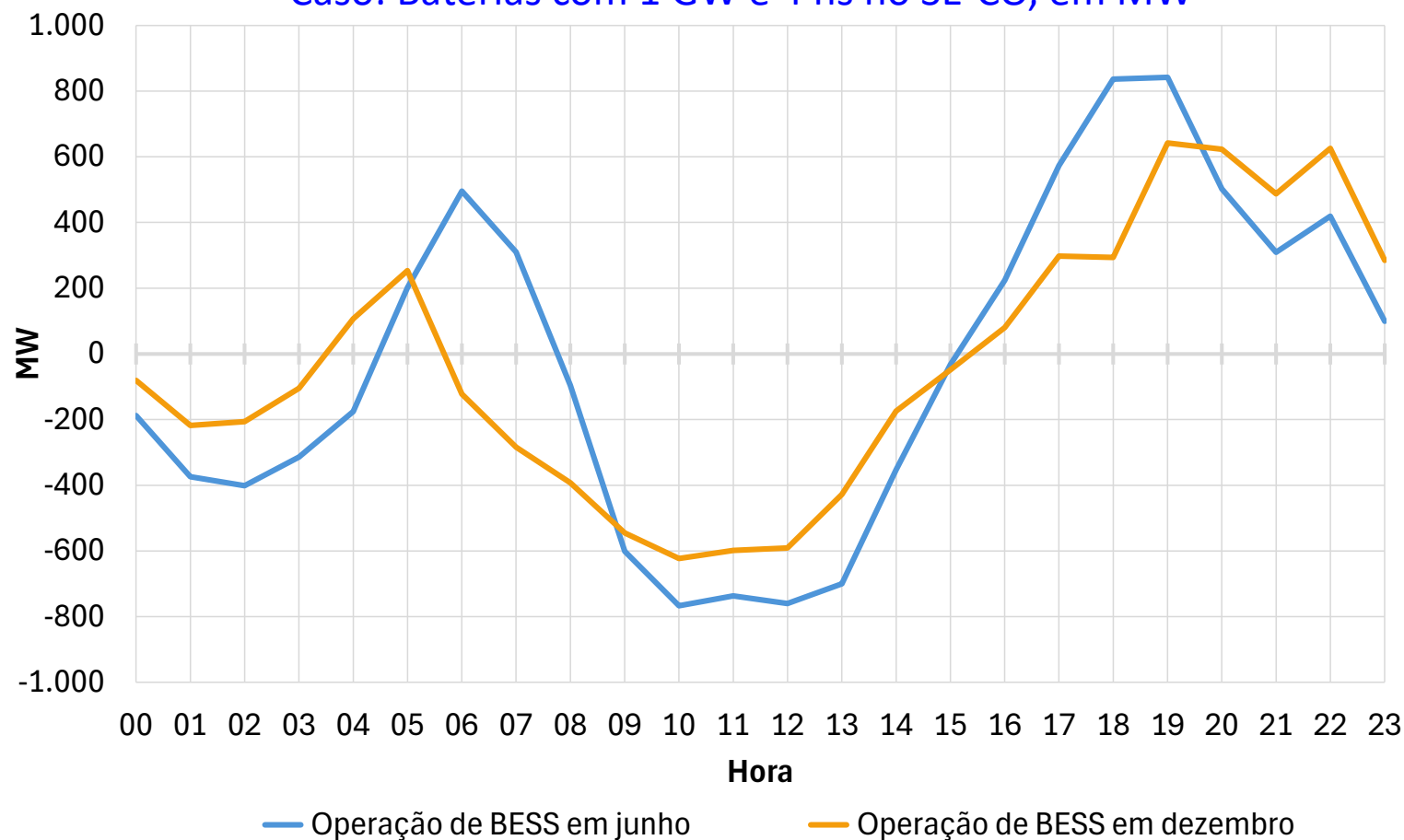
Dia/Hora	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Média
Domingo	136	117	102	101	100	98	62	10	1	0	0	0	0	1	2	11	67	141	188	206	191	178	182	155	85
Segunda	125	105	100	97	101	108	109	87	63	30	18	17	10	15	38	105	221	329	380	426	429	436	430	332	171
Terça	174	116	101	94	96	101	97	77	58	29	14	11	8	12	52	131	205	234	220	236	225	217	222	191	122
Quarta	163	128	118	119	121	128	127	102	74	34	17	15	10	14	65	142	203	234	220	237	222	216	223	190	130
Quinta	162	126	115	115	119	127	126	100	72	34	15	13	9	16	64	138	205	230	219	231	217	209	217	189	128
Sexta	164	133	120	119	121	129	129	98	76	35	16	13	9	13	62	139	192	218	214	224	212	202	210	186	126
Sábado	161	134	121	116	119	123	96	49	13	4	2	2	2	3	10	49	123	176	209	229	204	183	181	157	103
Média	155	123	111	109	111	116	107	75	51	24	12	10	7	10	42	102	174	223	236	255	243	234	238	200	124

Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Operação dos BESS no SIN em 2030.

Operação de baterias em junho e dezembro de 2030
 Caso: Baterias com 1 GW e 4 hs no SE-CO, em MW

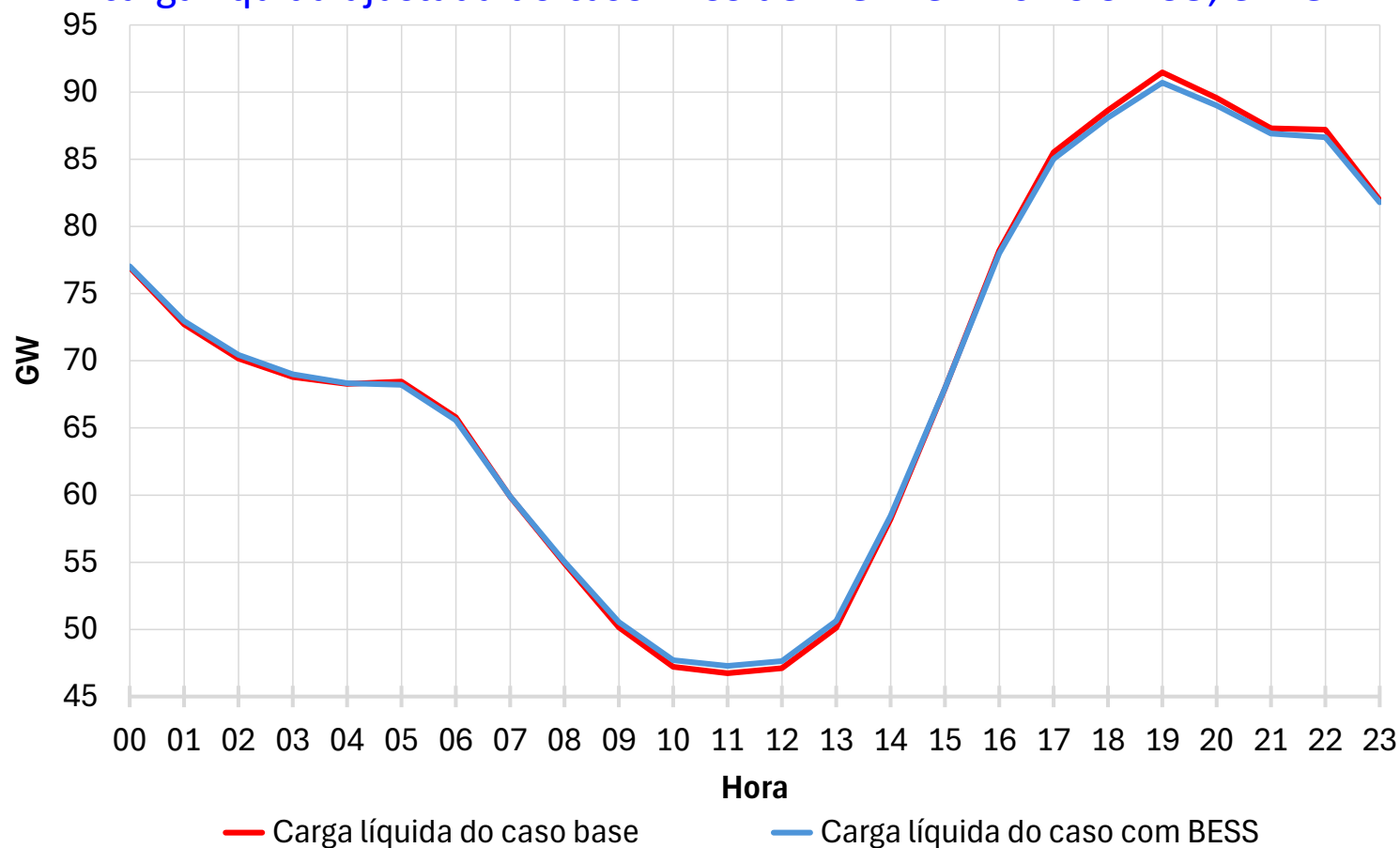


Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Operação dos BESS no SIN em 2030.

Impacto da operação de BESS em dia médio de 2030. Carga líquida do caso base e carga líquida ajustada do caso BESS de 1 GW e 4 hs no SE-CO, em GW

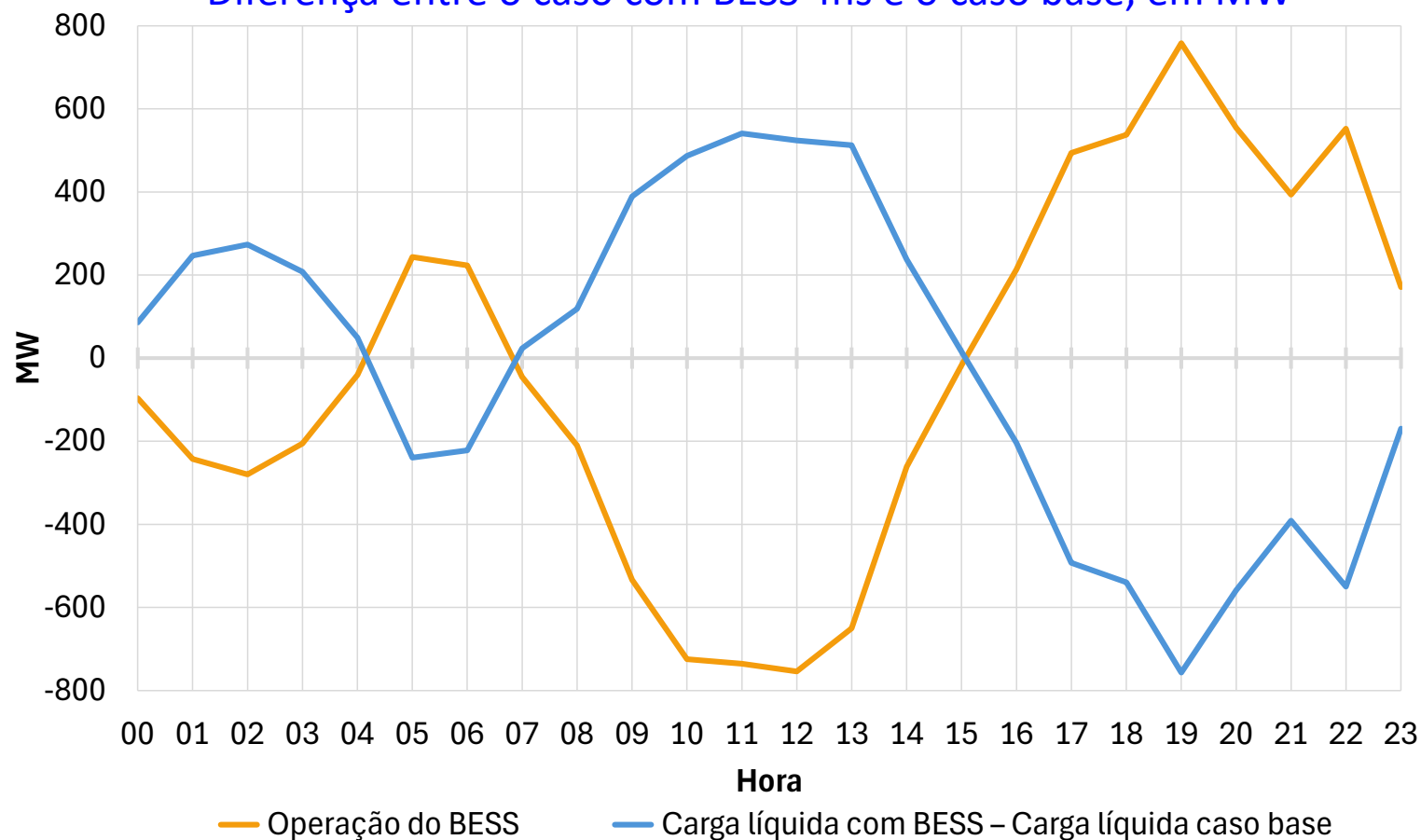


Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Operação dos BESS no SIN em 2030.

Impacto dos BESS na operação da geração. Dia da semana de 2030
 Diferença entre o caso com BESS 4hs e o caso base, em MW

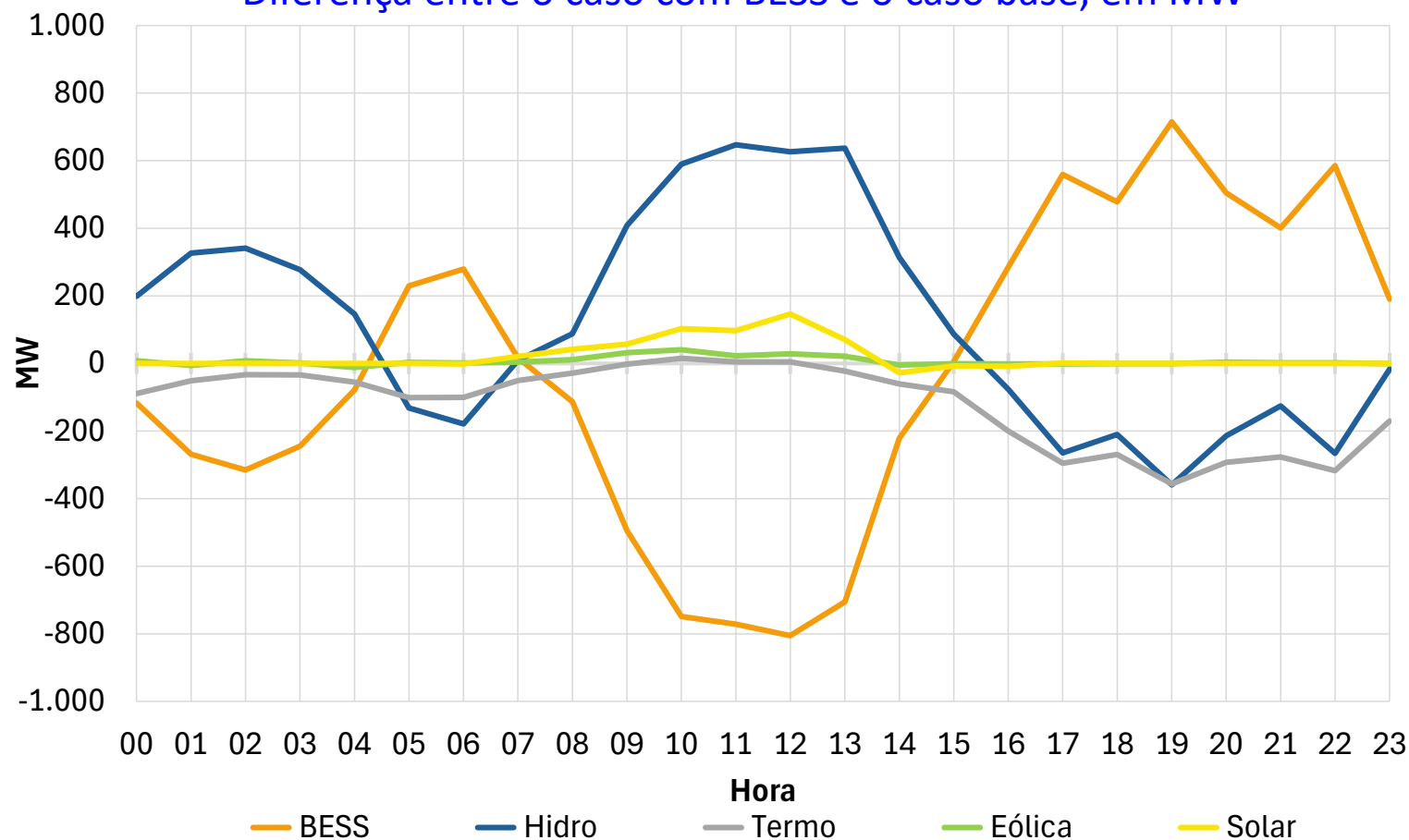


Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Operação dos BESS no SIN em 2030.

Impacto dos BESS na operação da geração. Dia da semana de 2030
Diferença entre o caso com BESS e o caso base, em MW

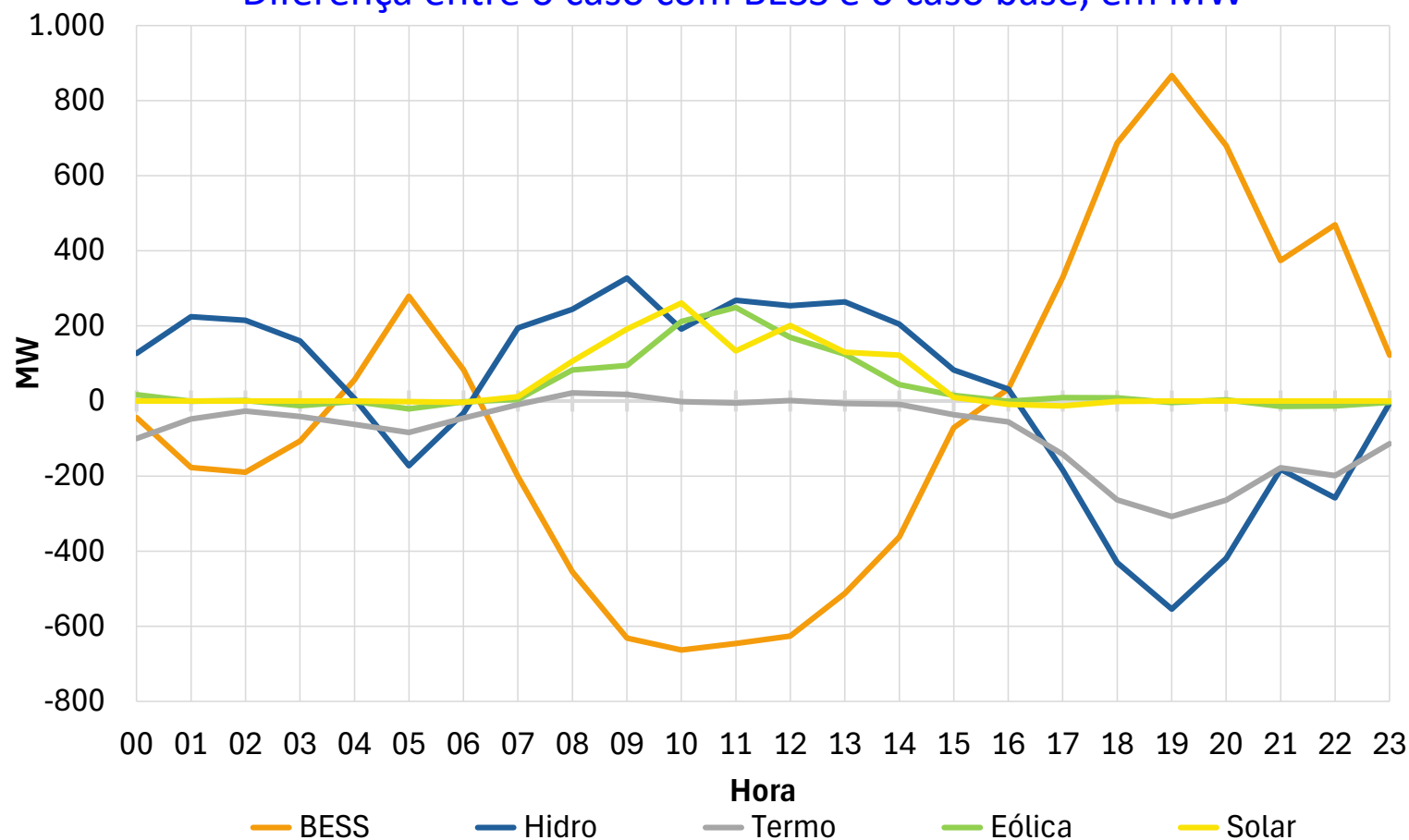


Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Operação dos BESS no SIN em 2030.

Impacto dos BESS na operação da geração. Fim de semana de 2030
 Diferença entre o caso com BESS e o caso base, em MW



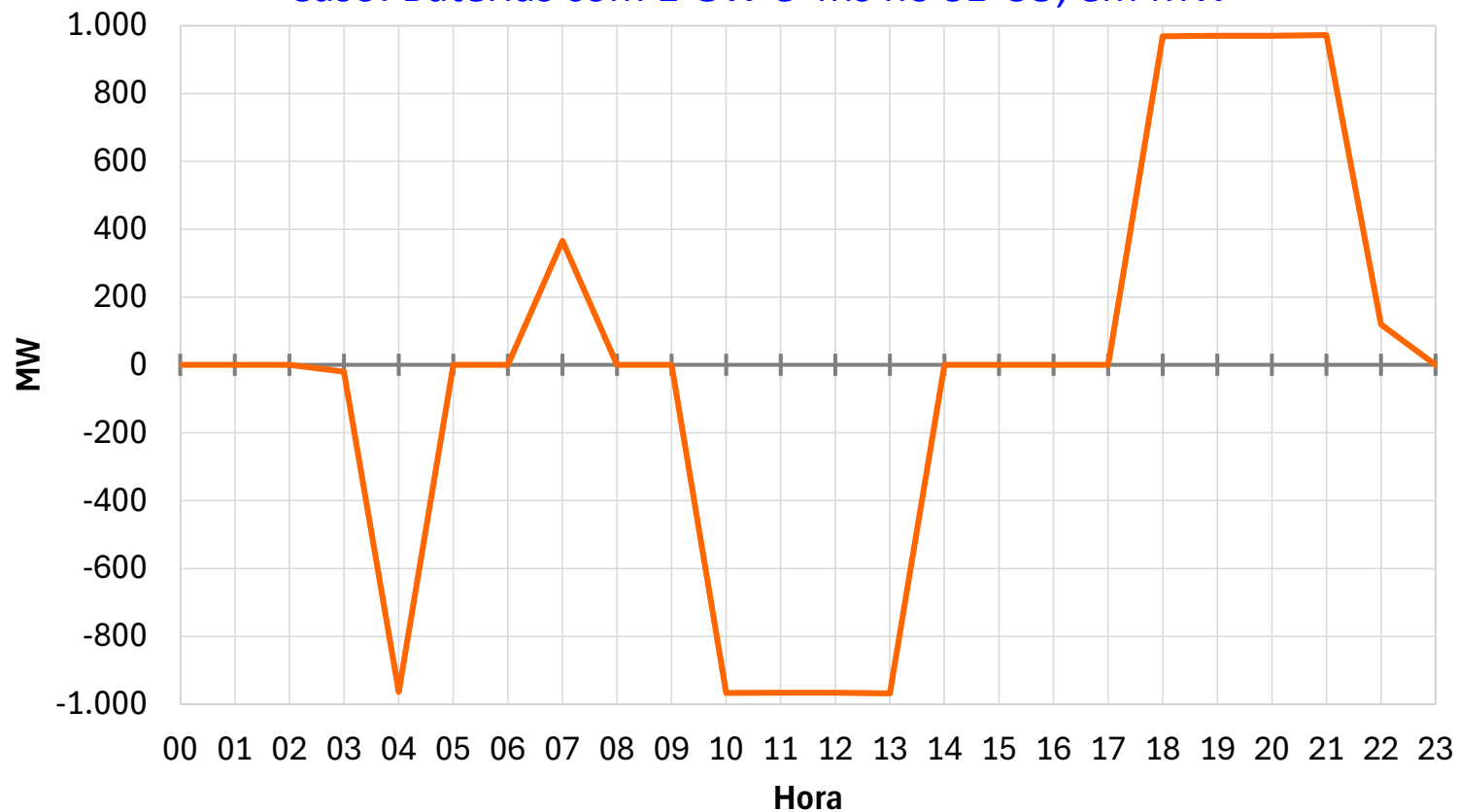
Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Operação dos BESS no SIN em 2030.

Operação de baterias em déficit de potência em agosto de 2030

Caso: Baterias com 1 GW e 4hs no SE-CO, em MW



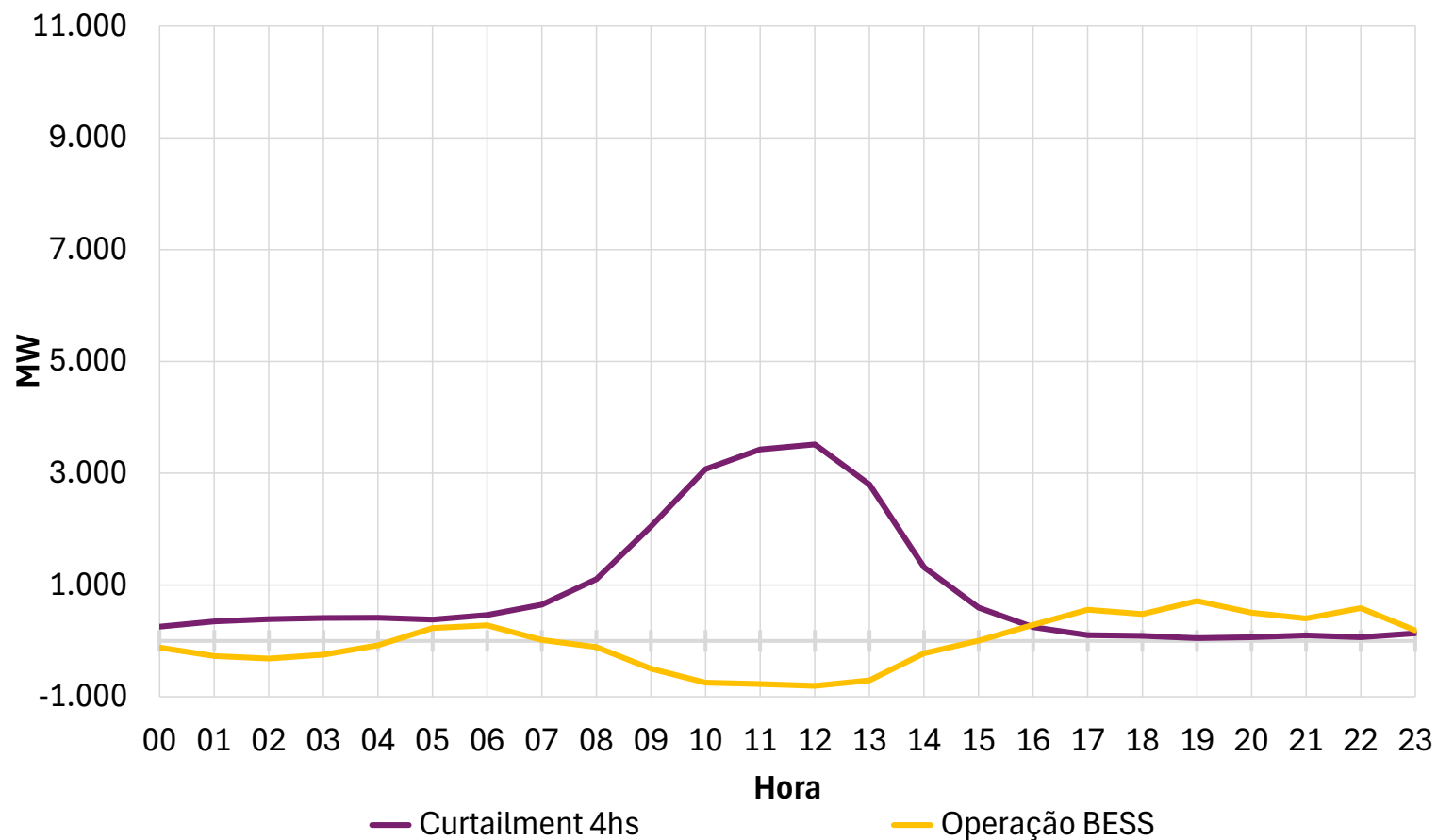
— Operação de BESS 1GW 4hs em dia de déficit

Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Operação dos BESS no SIN em 2030.

Curtailment e operação dos BESS. Dia de semana em 2030
 Caso: Baterias com 1 GW e 4hs no SE-CO, em MW

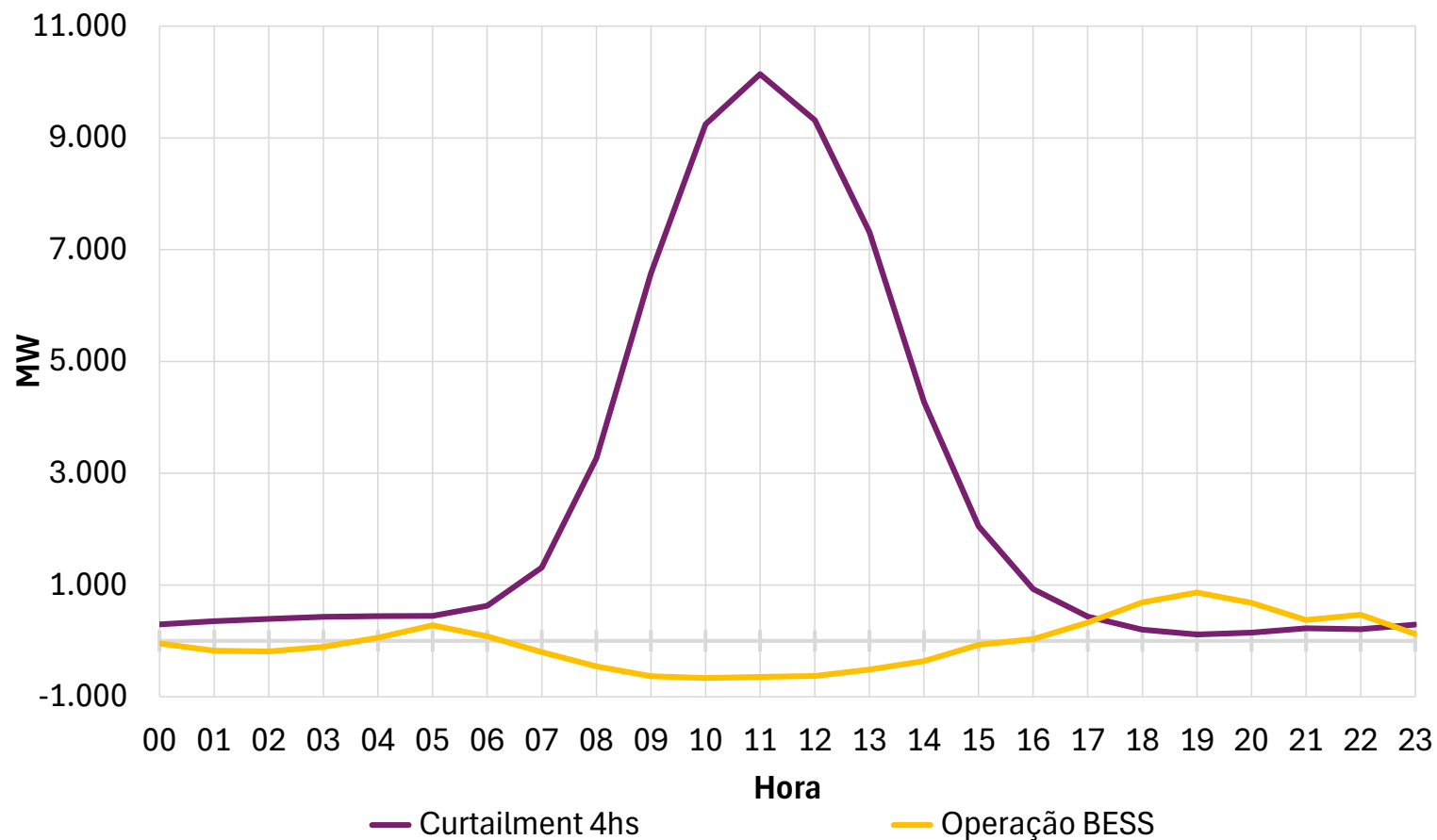


Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Operação dos BESS no SIN em 2030.

Curtailment e operação dos BESS. Fim de semana em 2030
 Caso: Baterias com 1 GW e 4hs no SE-CO, em MW



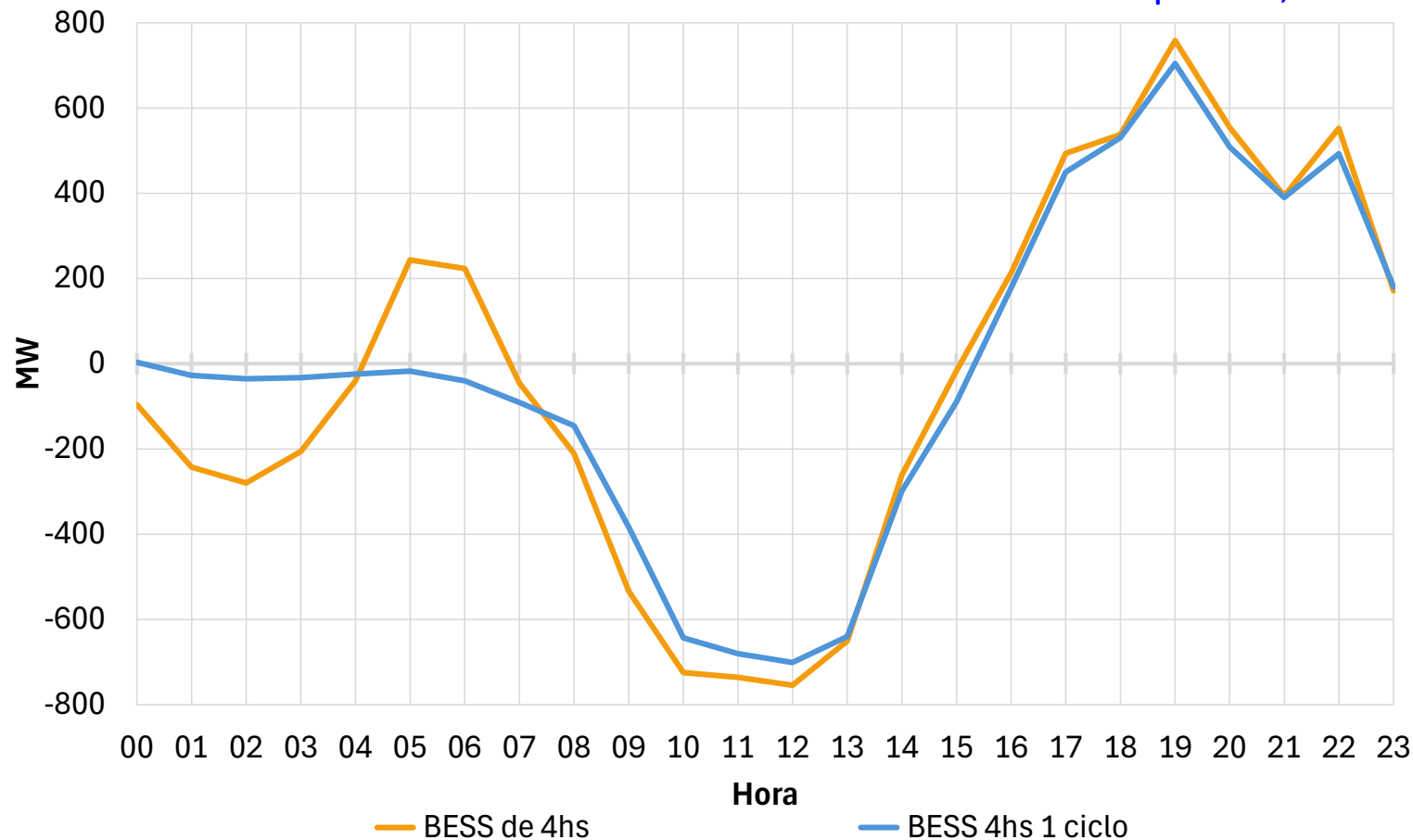
Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Operação de outras configurações de BESS.

Comparação da operação de baterias em 2030

Casos: BESS com 1 GW no SE-CO com 4hs e 4hs limitada a um ciclo por dia, em MW



Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Operação de outras configurações de BESS.

Operação de baterias em dezembro de 2030. Dia de semana

Casos: BESS com 1 GW no SE-CO. com 4hs, 5hs e 6hs de descarga, em MW

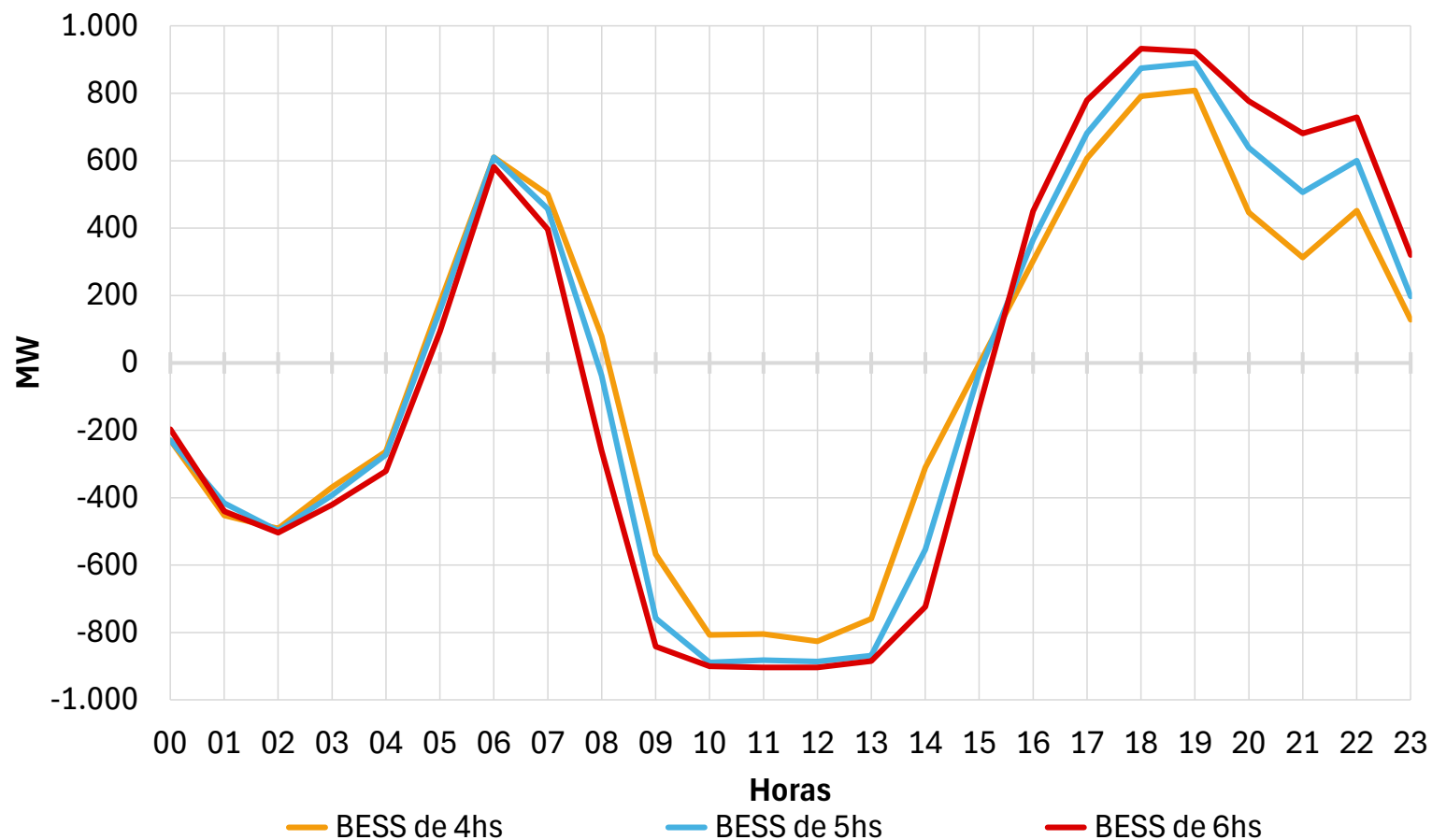


Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Operação de outras configurações de BESS.

Operação de baterias em junho de 2030. Dia da semana
 Casos: BESS com 1 GW no SE-CO. com 4hs, 5hs e 6hs, em MW



Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Operação de outras configurações de BESS.

Estatísticas descritivas para BESS operando em 2030
Em ciclos por dia

Caso		4hs	5hs	6h	4hs 1 ciclo	4hs sem rampa
Percentil	95	1,94	1,70	1,51	1,00	1,73
	90	1,85	1,61	1,47	1,00	1,62
	70	1,65	1,46	1,32	1,00	1,34
	50	1,49	1,35	1,22	1,00	1,12
	30	1,30	1,19	1,13	1,00	1,00
	10	1,03	1,00	0,97	0,73	0,92
	5	1,00	0,97	0,84	0,51	0,73
Média		1,47	1,32	1,21	0,92	1,18

Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Energia não suprida no caso base.

Energia não suprida ou violação de reservas em 2030
 Cabo base, sem baterias, no SE-CO, em GWh

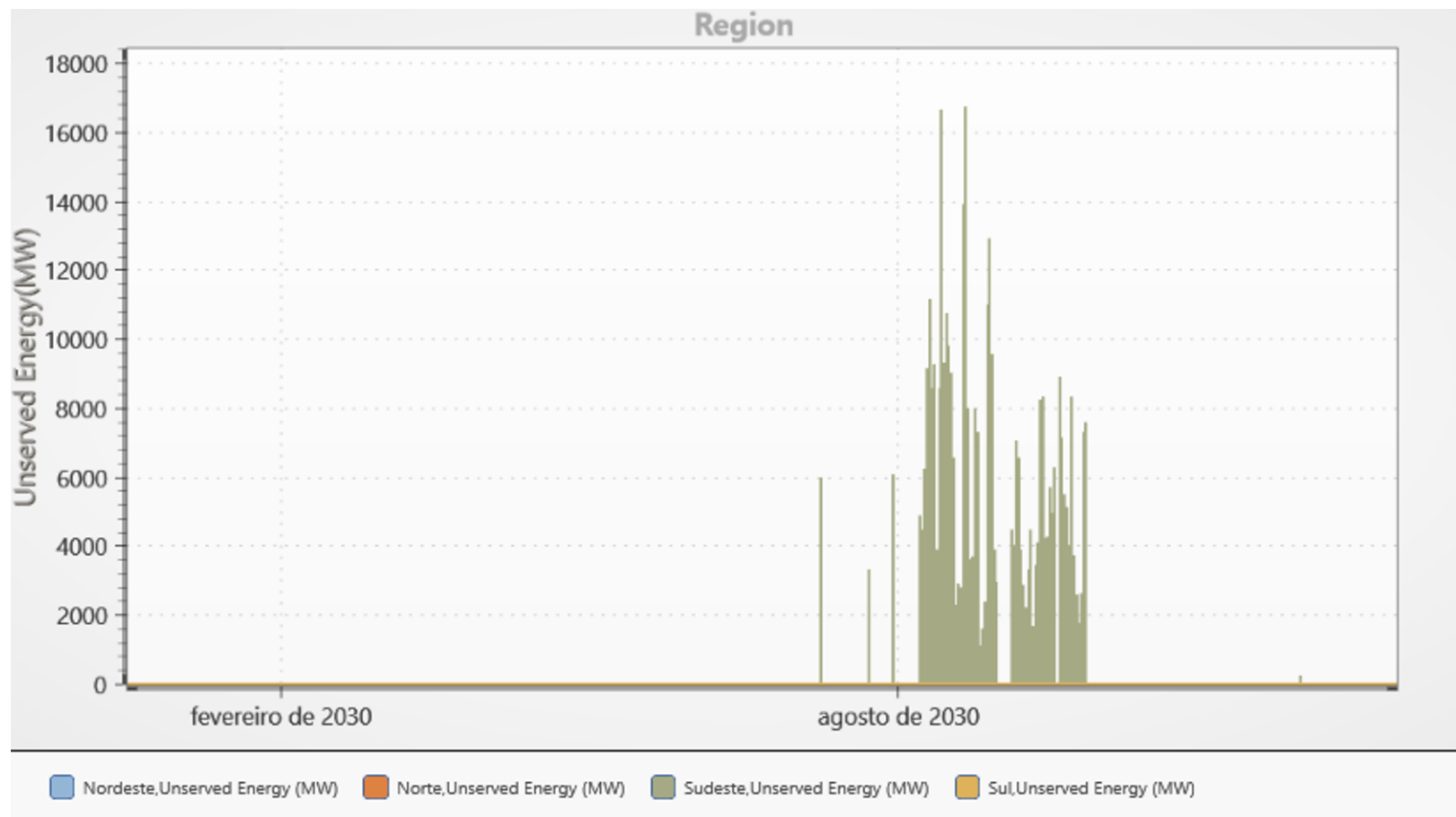
Série	GWh
40	1.394,1
8	1.164,9
39	19,5
13	3,8
14	3,7
30	2,0
11	1,0

Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Energia não suprida no caso base.

Energia não suprida ou violação de reservas. Todas as horas de 2030
 Caso base, série muito seca, sem baterias, no SE-CO, em MW

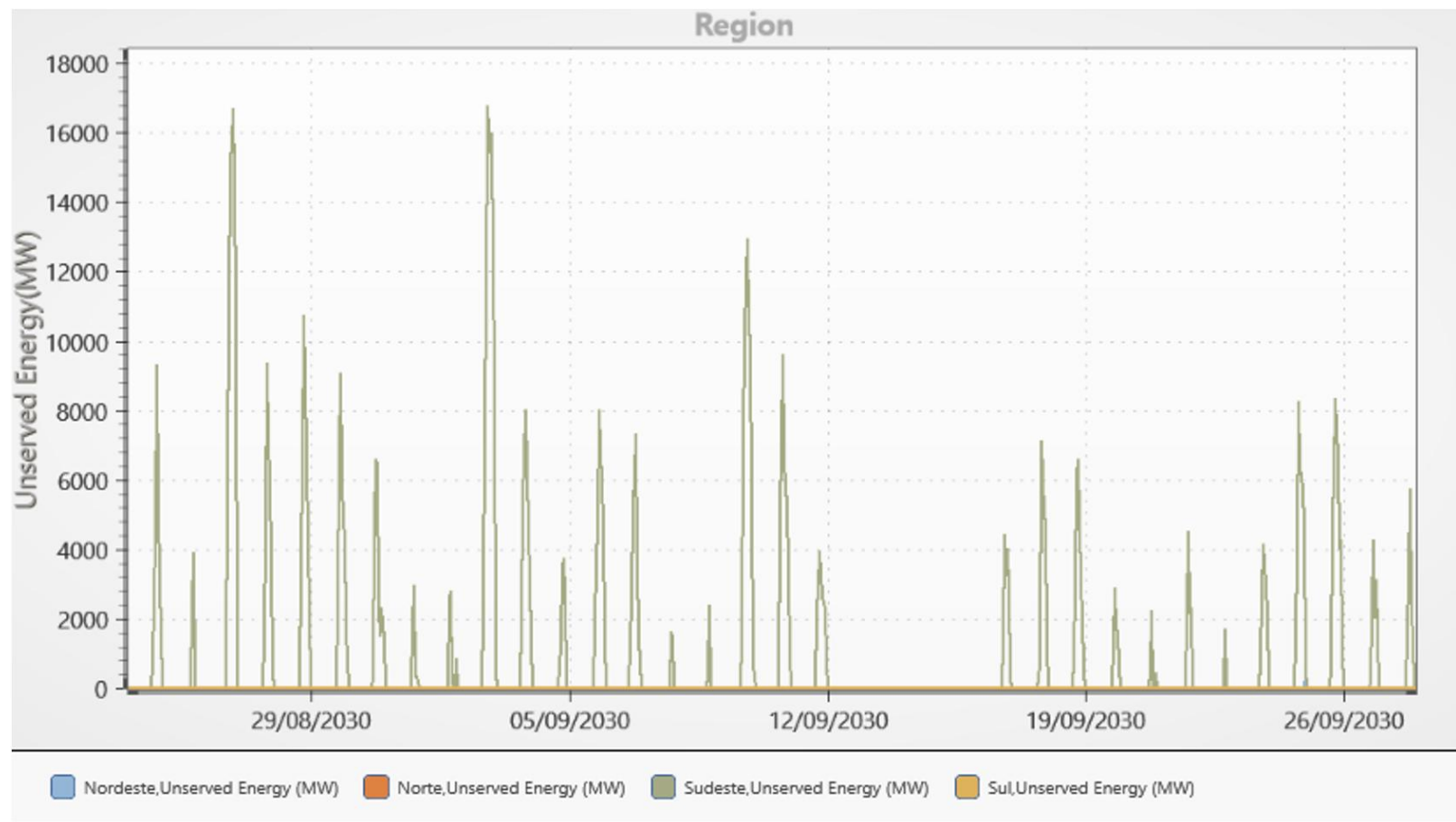


Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Energia não suprida no caso base.

Energia não suprida ou violação de reservas em cinco semanas críticas de 2030
 Caso base, série muito seca, sem baterias, no SE-CO, em MW



Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Energia não suprida no caso base.

Horário crítico para Energia não suprida ou violação de reservas em 2030
 Caso base, em % da ENS ou dos episódios de déficit de potência

Indicador	Entre 16hs e 00hs	Entre 15hs e 00hs
Volume de energia não suprida ou violações de reserva	98,9%	99,4%
Quantidades de episódios	97,1%	98,5%

Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Balanço de energia, custos e ENS.

Impacto de várias configurações de BESS no balanço de energia do SIN em 2030, em relação ao caso base (sem BESS), em MW_{méd}

Configuração BESS	Hidro (1)	Eólica (2)	Solar (3)	Impacto Renováveis (4=1+2+3)	Consumo líquido BESS (5)	Termo (6)	ENS (7)	Balanço Total (8=4+5+6+7)
4hs	91,6	16,3	28,2	136,1	-27,2	-108,6	-0,26	0,0
5hs	114,3	15,9	33,3	163,5	-30,5	-132,6	-0,42	0,0
6hs	124,5	19,6	35,4	179,4	-33,5	-145,3	-0,56	0,0

Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Balanço de energia, custos e ENS.

Impacto de BESS na energia não suprida (ENS), custo do despacho térmico e rampa
 Como diferença em relação ao caso base (exceto rampas)

Configuração BESS	Número de séries com ENS	Redução ENS/ ENS base (%)	Custo do despacho (R\$ mi/ano)	Rampa das 12hs às 19hs (MW)
4hs	6	-4,2%	-263,6	1.512
5hs	5	-6,7%	-318,1	1.649
6hs	4	-9,0%	-352,3	1.741

Fonte: Gesel

4. Operação do Sistema em 2030

Balanço de energia, custos e ENS.

Impacto de BESS no CMO, custo do despacho térmico e receitas com arbitragem.
 Como diferença em relação ao caso base (R\$/MWh e R\$ milhões/ano)

Configuração BESS	CMO BESS – CMO Caso base (R\$/MWh)	Custo do despacho (R\$ mi/ano)	Receita líquida MCP (PLD) (R\$ mi/ano)	Receita líquida (CMO) (R\$ mi/ano)
4hs	-4,21	-263,6	252,0	375,3
5hs	-4,97	-318,1	300,7	431,4
6hs	-5,35	-352,3	324,6	483,8

Fonte: Gesel

5. Conclusões sobre a operação de BESS no SIN e implicações

1. Funções principais dos BESS: confiabilidade, flexibilidade, atenuação de rampas e redução de curtailment e vertimentos.
2. BESS **reduzem custos operacionais** e ENS do SIN. Conceitualmente eles **umentam a garantia física** do sistema.
3. A operação de BESS no SIN, despachados ao mínimo custo, se assemelha mais a um **serviço ancilar** do que à geração ou consumo: serviços ao ONS para garantir a confiabilidade e a economicidade do despacho.
4. Receita esperada no MCP da CCEE não cobre o custo do investimento. Mecanismo de suporte como o proposto no LRCAP viabiliza o investimento.

5. Conclusões sobre a operação de BESS no SIN e implicações

5. Instalação deve ser preferencialmente em regiões com alta geração renovável e gargalos de escoamento durante o dia. Escoamento para o SE durante a noite é essencial para a função de confiabilidade.
6. BESS com maior tempo de descarga (5h-6h) oferecem maior eficiência e benefícios.
7. Limite de 1 ciclo por dia parece insuficiente para a operação eficiente dos BESS.



Obrigado!

robertobrandao@gmail.com

GESEL - UFRJ

(21) 2051-5177 / 3577-3953

PD 10307-0222/2023

Pesquisa de aplicação de sistemas de armazenamento de energia de baterias (BESS) no sistema de transmissão.