



Mudanças na matriz de geração e na operação do sistema

ROBERTO BRANDÃO

RIO DE JANEIRO, 11 DE OUTUBRO DE 2024

Sumário

1. Mudanças na matriz de geração
2. Impactos na operação do sistema
3. Impactos no planejamento
4. Abordagem adotada no estudo
5. Análise dos resultados
6. Conclusões

Mudanças na matriz de geração

Está em curso uma mudança na matriz de geração brasileira:

- No início do século a matriz de geração era predominantemente hídrica;
- Houve crescimento expressivo da geração térmica a gás, carvão e óleo, sobretudo até meados da década passada.

Mais recentemente tem havido forte crescimento da geração não controlável:

- Primeiro geração hídrica a *fio d'água* (sazonais, com pouca ou nenhuma capacidade de modulação da geração em nível horário);
- A partir de 2015 geração *eólica* (sazonalidade complementar à hídrica, com considerável variabilidade horária, sobretudo nos primeiros meses do ano);
- Nos últimos poucos anos houve rápido crescimento da geração *solar*, tanto centralizada como distribuída, com oferta exclusivamente durante o dia.

Impactos na operação do sistema

A operação do sistema também precisou mudar:

- No início do século a geração *hídrica* fazia o *acompanhamento de carga* e a geração térmica era um backup de geração de base para hidrologias ruins;
- Recentemente, a potência disponível das hídricas, sobretudo entre setembro e janeiro, pode não mais ser suficiente para atender à ponta sozinha -> *térmicas* passam a atuar na *ponta* quando há pouca água nas usinas do norte;
- Também recentemente o crescimento da geração eólica e solar (23,2% da geração efetiva nos 12 meses terminados em maio/24), têm gerado *episódios de sobregeração*, sobretudo nas manhãs de fim de semana e em escala menor também nas manhãs de dias de semana. As razões são: a insuficiência na capacidade de transporte; estabilidade da rede; necessidade de compensar rampas de geração muito íngremes associadas à geração solar; e a falta de mercado.

Impactos na operação do sistema

Para os próximos anos o cenário é:

- *Crescimento da carga* com estagnação da geração hídrica;
- *Geração adicional* de energia estará concentrada no crescimento da geração eólica e, sobretudo, no crescimento da geração *solar*;
- Consequência imediata: sistema precisará de reforço de *potência firme* → leilões de capacidade.

Consequência de maior alcance: crescente *variabilidade* na geração *reduz a produtividade* efetiva de todas as fontes mesmo com o sistema equilibrado:

- *Hídricas* operam com *menor fator de capacidade* devido à forte redução de geração durante o dia;
- Crescente *difículdade* de despachar *térmicas na base* em hidrologias ruins (tendência à sobregeração em algumas horas mesmo com forte escassez hídrica);
- *Curtailment* elevado de fontes renováveis.

Será difícil atender a rampas cada vez maiores sem *novos recursos de flexibilidade*.

Impactos no planejamento

- Embora as consequências gerais da mudança na matriz de geração sejam claras, *não é trivial* determinar quais os *melhores caminhos* para mitigar alguns efeitos negativos da mudança na matriz de geração.
- Em particular, os *modelos* oficiais *brasileiros* de planejamento da expansão e da operação de médio/longo prazos *não captam* adequadamente como a *variabilidade da geração* renovável (23% da geração e crescendo) afeta a *operação de curto prazo* do sistema.
- Ex: Newave representa geração eólica e solar como abatendo da carga e representa carga mensal e a geração em patamares de carga não cronológicos.
- Esta ferramenta não permite estimar nem a melhor operação, nem seus custos, nem serve de base para avaliar quais as opções mais econômicas para a expansão do sistema. MDI + Newave não permitem estimar como e a que custo o despacho compensará variabilidade da geração; tampouco estimam o *curtailment*; nem representam adequadamente o funcionamento do armazenamento e seu impacto na operação do sistema.

Abordagem adotada no estudo

- A seguir será apresentado um estudo mostrando *evoluções* possíveis do SIN para os horizontes de *2030* e *2040*.
 - A expansão do SIN foi definida com uma ferramenta de simulações de *planejamento da expansão*, que respeita restrições da *operação de curto prazo* do sistema.
 - São apresentadas simulações do *planejamento da operação de curto prazo*.
 - O *objetivo* é *revelar tendências* para mudanças: na matriz de geração; no despacho da geração controlável; nos custos marginais; no *curtailment*; e nas receitas dos agentes.

Abordagem adotada no estudo

- O ponto de partida para as projeções do sistema para 2030 e 2040 é o sistema projetado pelo *PEN* para 2027.
 - A *expansão* foi calculada pelo *mínimo custo global* para os dois anos.
 - Por custo global entende-se a soma dos custos de investimento (em anuidades) com o custo de operação anual (gasto de combustíveis).
 - A minimização do custo global é a abordagem utilizada pela EPE no PDE (MDI + Newave).
 - A ferramenta utilizada aqui foi o *Plexos 10* (equivale a MDI + Newave + Decomp + Dessem em um só software, utilizando o mesmo *dataset* para todas as simulações).

Abordagem adotada no estudo

Dados das simulações:

- *Sistema existente*, carga e expansão prevista até 2027 são do *PEN* (ONS); *carga pós 27* cresce a *3,4%* aa, *GD* cresce a *6,5%*aa;
- *Hidrelétricas* e *termelétricas* são *individualizadas*; *renováveis* são *agregadas* (eólicas por estado; biomassa, solar e PCH, por subsistema);
- Candidatos à *expansão* e seus custos são do *PDE 2031*. Sem candidatos hídricos.
- Restrições de *rampa* (UTES), *vazões mínimas* e *máximas*, tempos de *viagem*, *reservas*, usam dados do *ONS*;
- *Rampas de defluência* foram estimadas a partir do *histórico* da geração horária do *ONS*;
- *Unit commitment* foi modelado mas *não* está *ativado* nas simulações;
- Geração *eólica* estimada a partir de séries de vento horário georreferenciadas (ERA5, Copernicus), *calibrado* conforme geração efetiva de cada parque existente (*ONS*).

Abordagem adotada no estudo

Simulações da *expansão* :

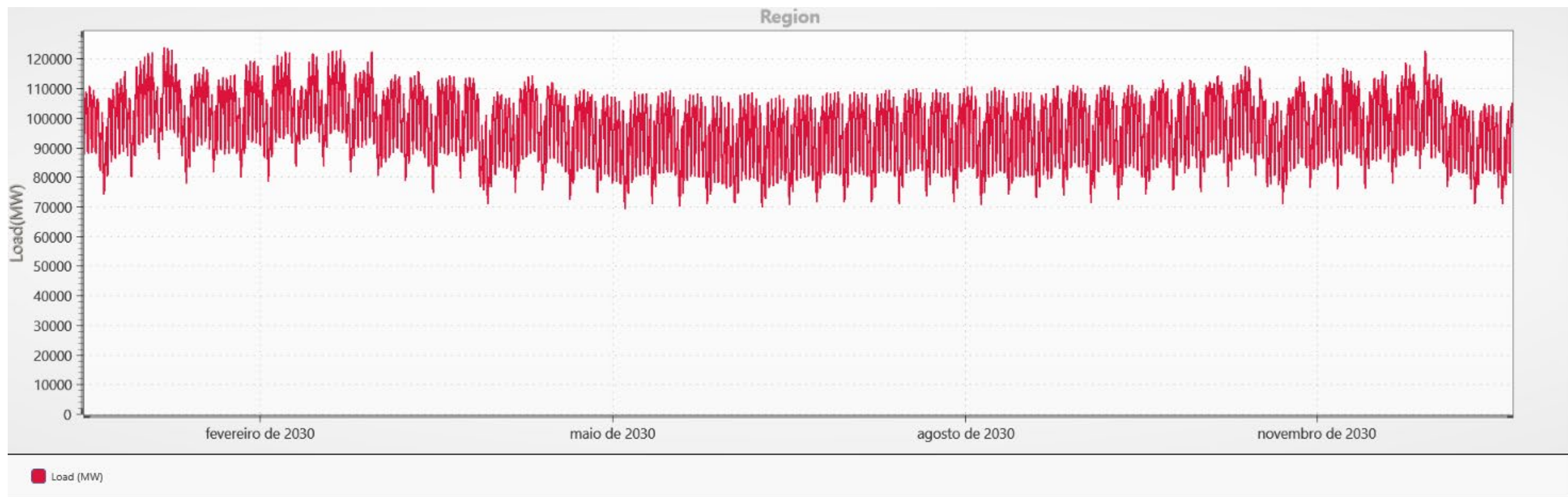
- Simulação de Longo Prazo (Plexos) resolvida em *problema único*: expansão e operação são simuladas simultaneamente;
- A simulação é *cronológica*, com as restrições da página anterior;
- Horizonte de 12 meses, cada um *representado* por uma *semana típica*.
- Geração renovável e carga horárias são ajustadas na semana típica para corresponder com a total do mês;
- Balanço hídrico para usinas com reservatório substancial é feito mensalmente;
- Tempo de viagem = 0.

Abordagem adotada no estudo

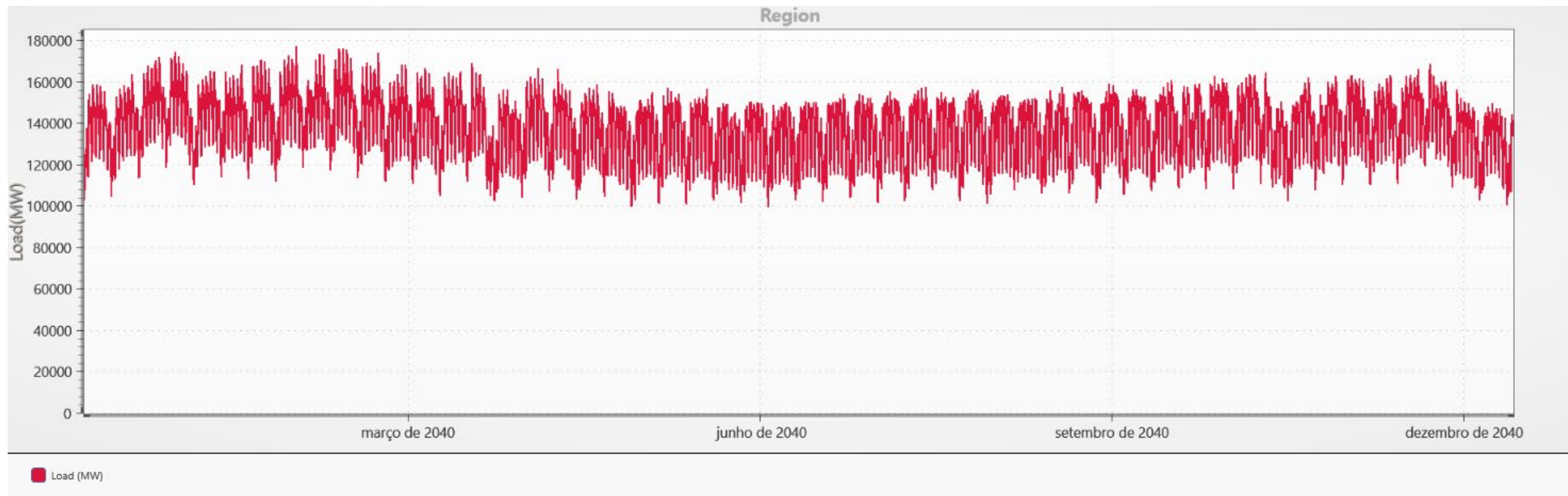
Simulações do planejamento da *operação*:

- *Estratégia de gestão* de cada *reservatório* é definida por simulação do planejamento da operação no *médio prazo* (53 semanas);
- Planejamento da *operação diária* usa a estratégia de gestão de reservatórios definida acima, encadeando a trajetória dos reservatórios em todas as 53 semanas do ano para cada uma das séries hidrológicas.
- Simulação é *cronológica*, com carga e geração renovável variando a *nível horário*.
- *Balanco hídrico* é *horário* e tempos de viagem (ONS) são utilizados.

Carga 2030



Carga 2040



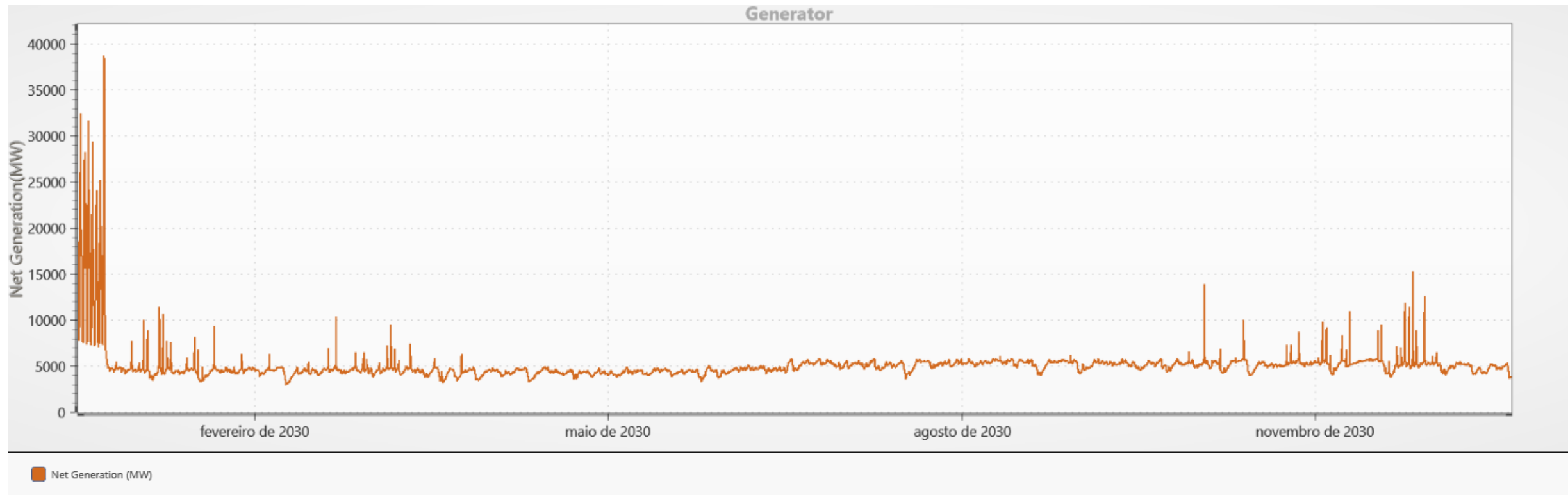
Capacidade instalada e 2030 e 2040 (MW)

Tipo	2030		2040	
	MW	% Total	MW	% Total
Biomassa	15.320	5,6	18.320	4,8
Eólicas	28.882	10,5	89.427	23,4
Hidro (c/ PCH)	117.984	42,9	117.984	30,8
Solar (c/ GD)	69.282	25,2	86.289	22,6
Termelétricas	43.288	15,7	50.601	13,2
Baterias	584	0,2	19.963	5,2
Total	275.339	100,0	382.583	100,0

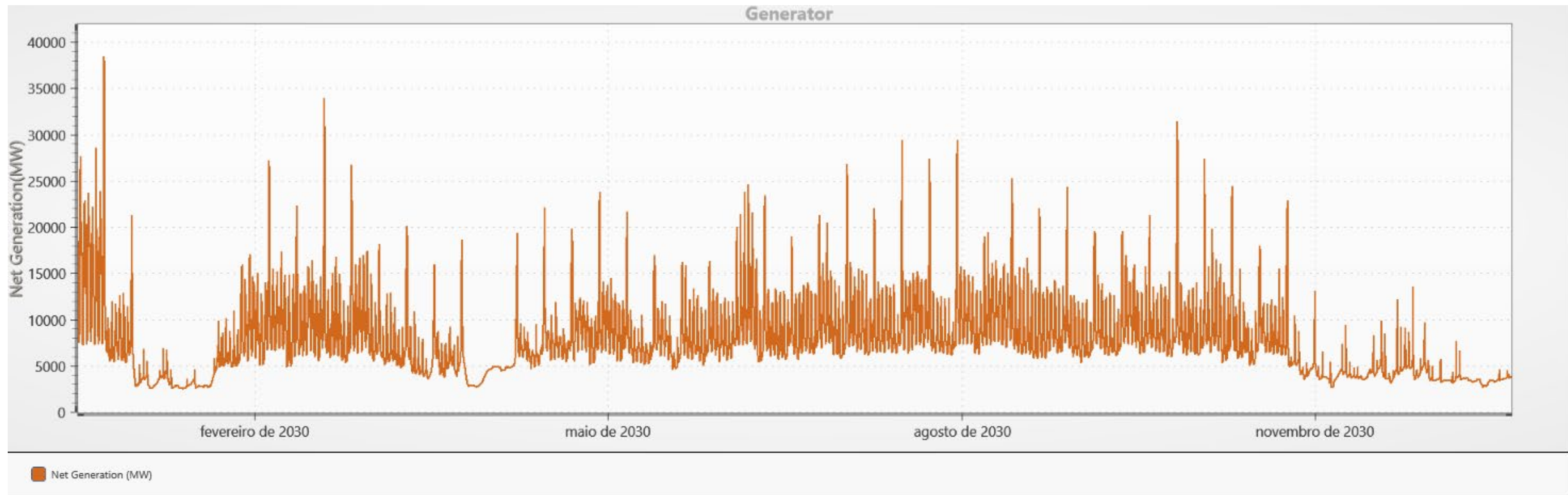
Geração em 2030 e 2040 (GWh)

Tipo	2030		2040	
	GWh	% Total	GWh	% Total
Biomassa	39.634	4,7	47.966	4,1
Eólicas	121.022	14,3	377.299	32,3
Hidro (c/ PCH)	491.422	58,1	514.728	44,1
Solar (c/ GD)	119.398	14,1	150.559	12,9
Termelétricas	74.265	8,8	76.339	6,5
Total Geração	845.741	100,0	1.166.890	100,0
Baterias	-132	0,0	-3.658	-0,3
Consumo SIN	845.609	100,0	1.163.232	99,7

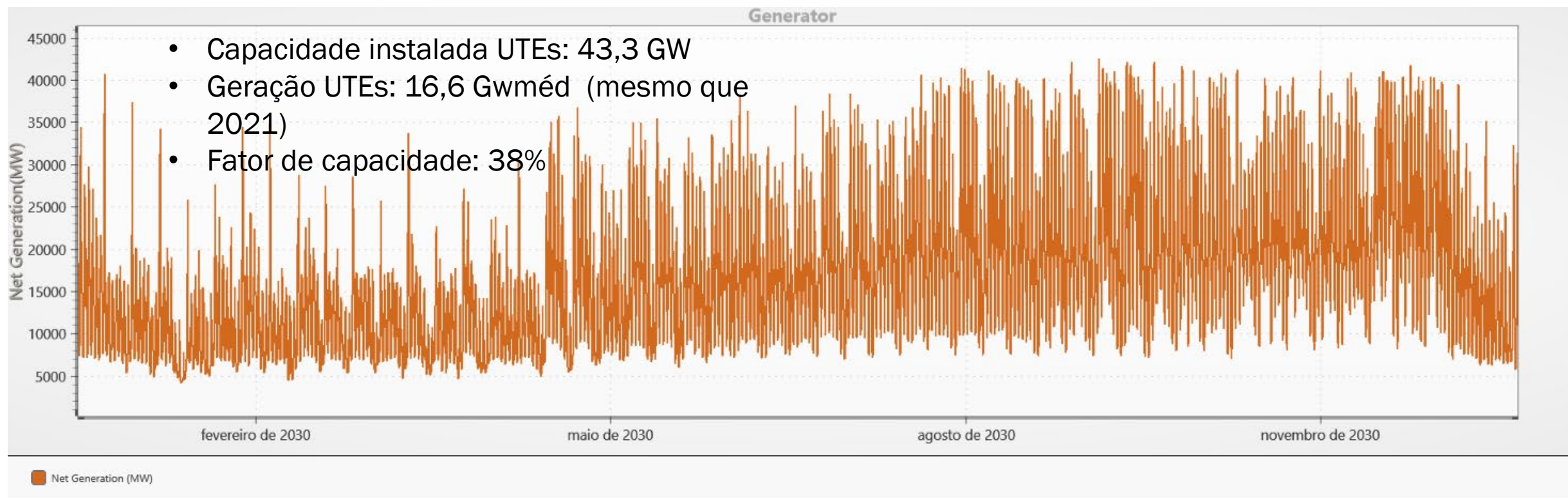
Despacho UTE 2030. Hidrologia boa.



Despacho UTE 2030. Hidrologia média.

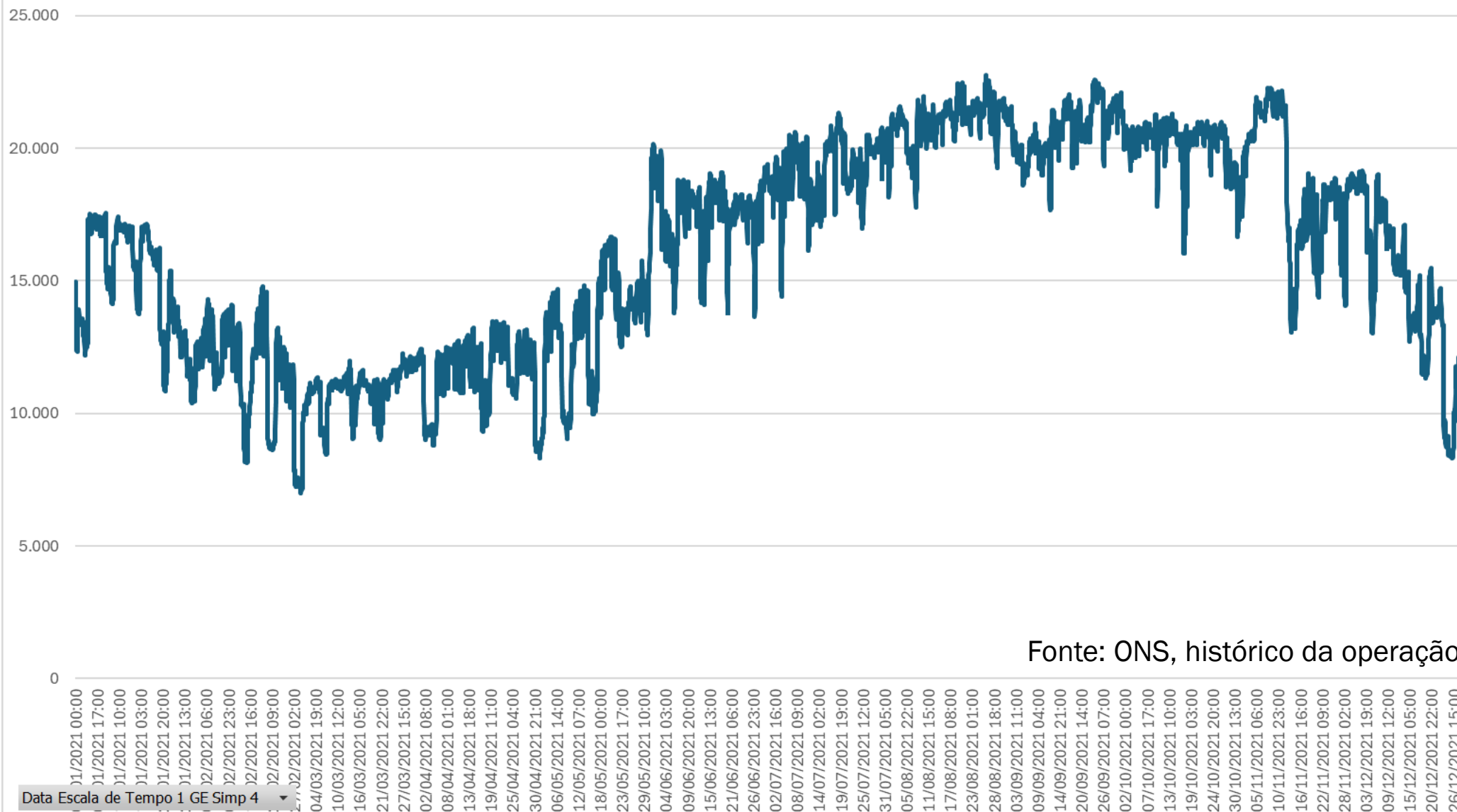


Despacho UTE 2030. Pior hidrologia.

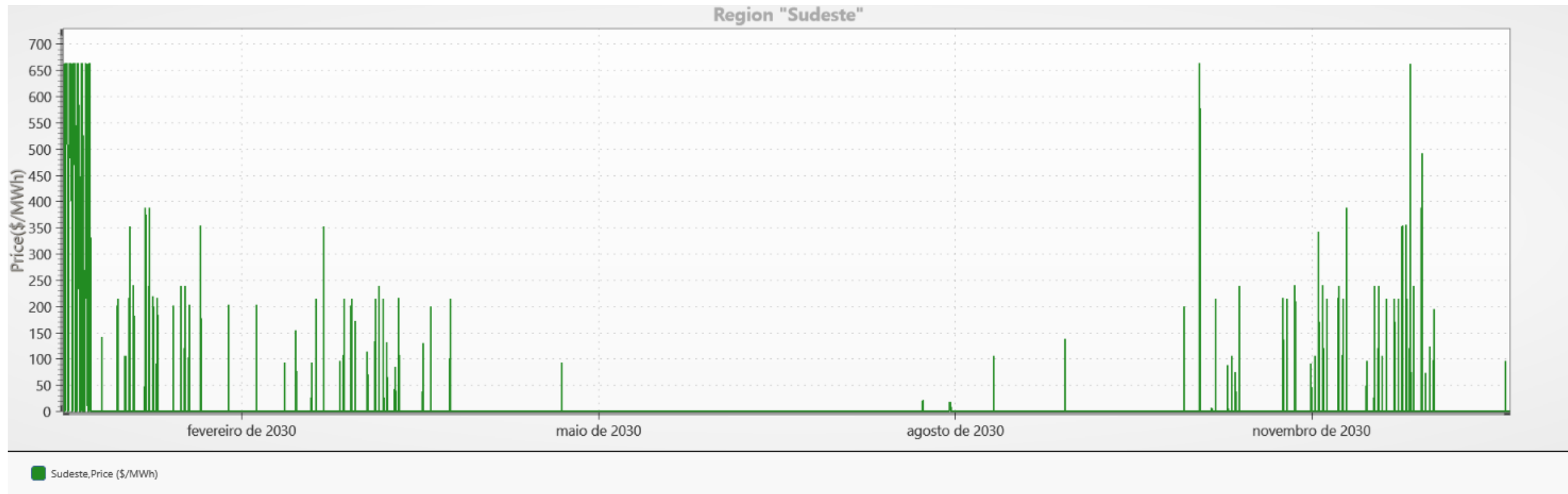


Soma de Seleção Tipo de GE Simp 4

Despacho horário UTE + UTN em 2021



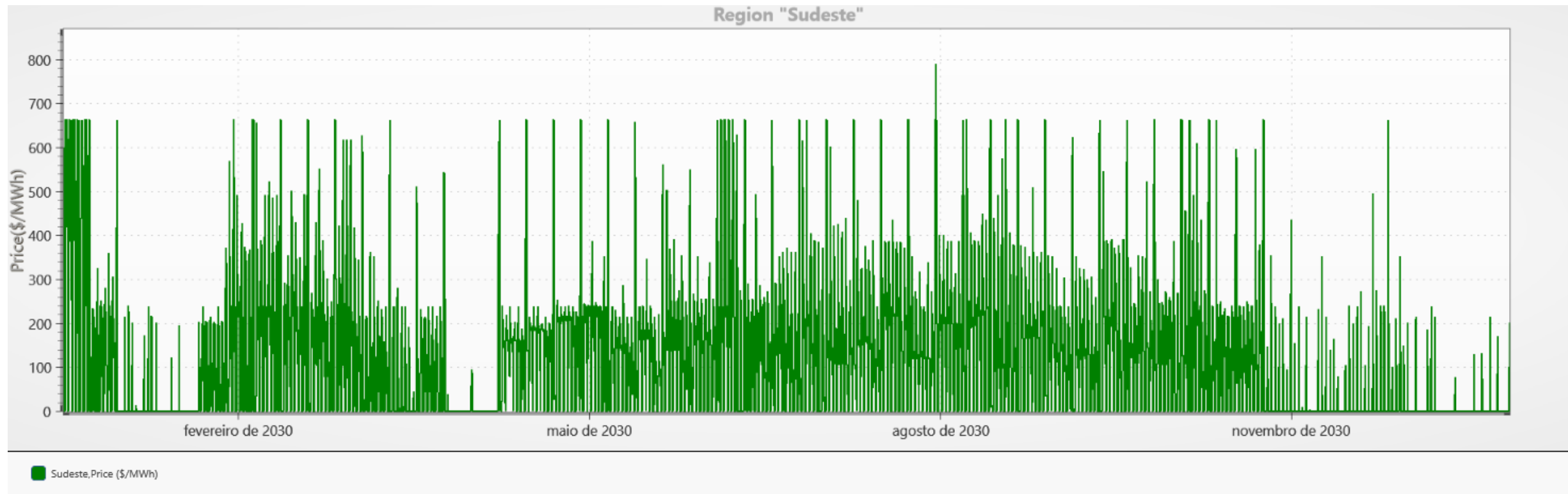
CMO SE 2030. Hidrologia boa.



CMO SE 2030. Hidrologia boa.

		Hora																								Dia
		00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
Dia	sáb	7	9	11	4	9	9	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	7	13	13	20	17	13	13	13	7
	dom	13	7	8	4	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	13	13	13	13	13	13	6
	seg	13	4	7	12	9	13	2	0	0	0	0	0	0	0	0	11	13	26	27	56	61	28	54	16	15
	ter	15	12	12	7	12	12	0	1	2	0	0	0	0	0	5	12	12	17	14	25	27	24	26	12	10
	qua	13	13	13	13	13	7	9	2	0	0	0	0	0	0	6	13	13	27	15	49	32	15	25	13	12
	qui	13	13	13	11	13	13	11	5	0	0	0	0	0	0	0	6	13	22	18	51	47	45	24	17	14
	sex	11	13	13	5	10	6	4	0	0	0	0	0	0	0	1	4	13	16	15	31	36	21	19	16	10
Hora		12	10	11	8	10	9	4	1	0	0	0	0	0	0	2	7	10	19	16	35	33	23	25	14	10

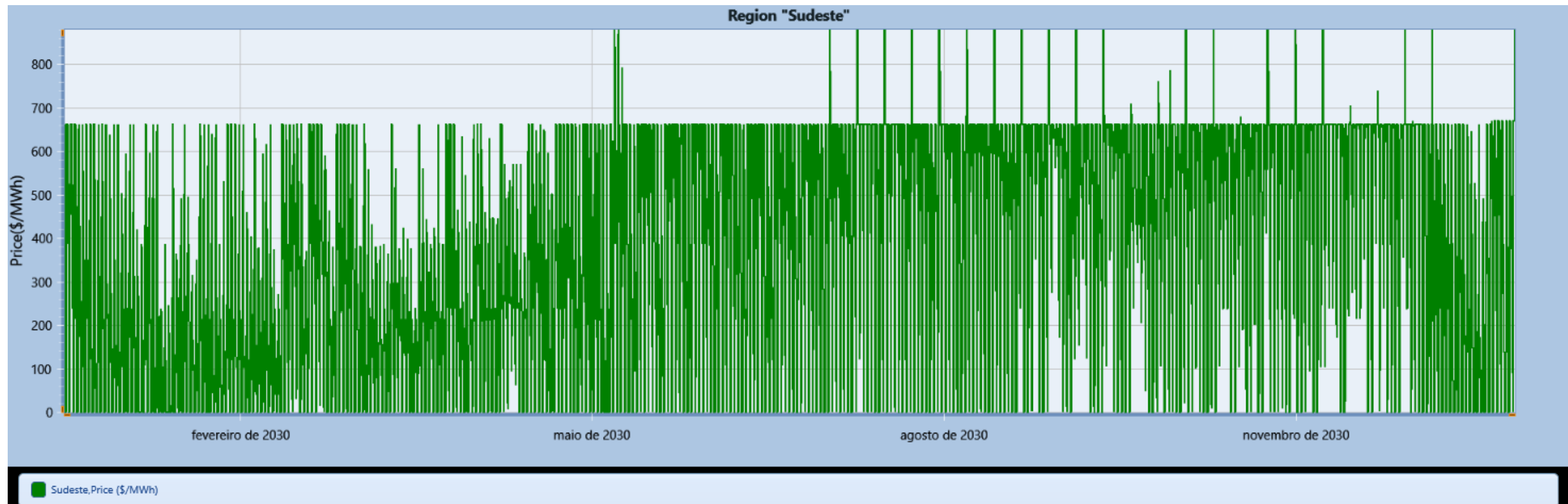
CMO SE 2030. Hidrologia média.



CMO SE 2030. Hidrologia média.

		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	Dia
Dia	sáb	149	135	126	120	120	127	98	31	4	0	0	0	0	0	0	23	124	184	215	251	218	188	185	151	102
	dom	140	118	101	87	91	94	42	0	0	0	0	0	0	0	0	2	44	152	190	219	192	166	189	155	83
	seg	118	109	94	98	93	107	104	65	40	12	0	0	0	0	11	112	271	404	458	489	487	475	482	439	186
	ter	101	66	50	50	56	60	63	52	34	6	2	1	0	0	13	98	187	247	222	243	234	200	227	178	100
	qua	143	119	120	114	122	126	124	81	51	19	5	1	0	1	30	126	208	235	234	279	238	214	239	187	126
	qui	146	117	124	118	124	141	123	84	51	12	2	2	2	3	31	120	210	251	241	251	228	229	248	176	126
	sex	151	130	112	117	115	138	124	89	54	14	2	0	0	0	37	140	201	227	222	279	210	217	222	186	124
	Hora	136	113	104	100	103	113	97	57	34	9	2	1	0	1	18	88	178	243	254	287	258	241	256	210	121

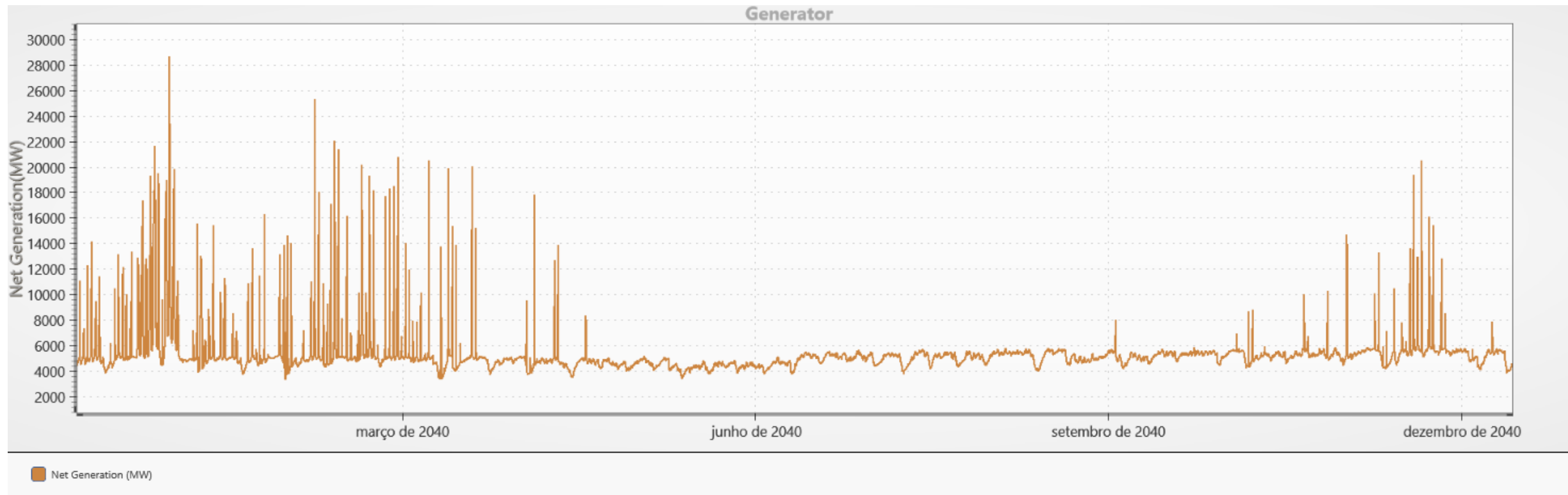
CMO SE 2030. Pior hidrologia.



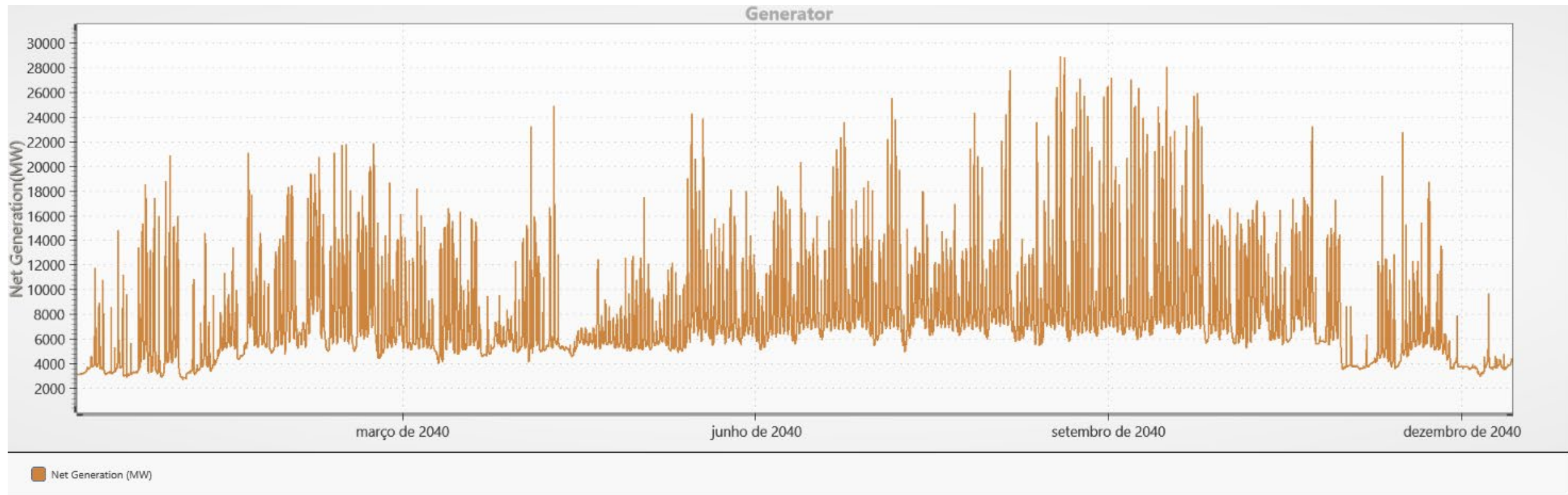
CMO SE 2030. Pior hidrologia.

		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	Dia	
Dia	sáb	508	460	427	405	399	414	360	219	60	16	4	9	7	17	63	219	425	527	560	601	552	542	520	476	325	
	dom	441	395	359	323	325	321	195	39	2	0	0	0	0	0	21	83	255	444	510	546	550	503	511	466	262	
	seg	390	359	305	306	325	339	333	290	219	132	77	81	70	83	190	433	592	641	1.057	1.797	1.803	1.876	1.512	897	588	
	ter	610	528	455	434	429	441	453	405	324	154	63	63	50	59	263	484	584	628	621	647	647	637	641	575	425	
	qua	542	496	458	444	411	465	465	420	298	173	79	77	60	90	267	479	593	628	625	650	630	614	631	588	424	
	qui	534	486	433	437	428	450	477	403	321	157	72	76	56	71	284	478	576	625	599	641	596	604	598	568	415	
	sex	529	481	450	413	415	453	445	392	328	163	77	73	44	72	268	465	561	583	597	601	576	573	601	567	405	
Hora		508	458	412	395	391	412	390	310	222	114	53	54	41	56	194	377	512	582	653	783	765	764	716	591	406	

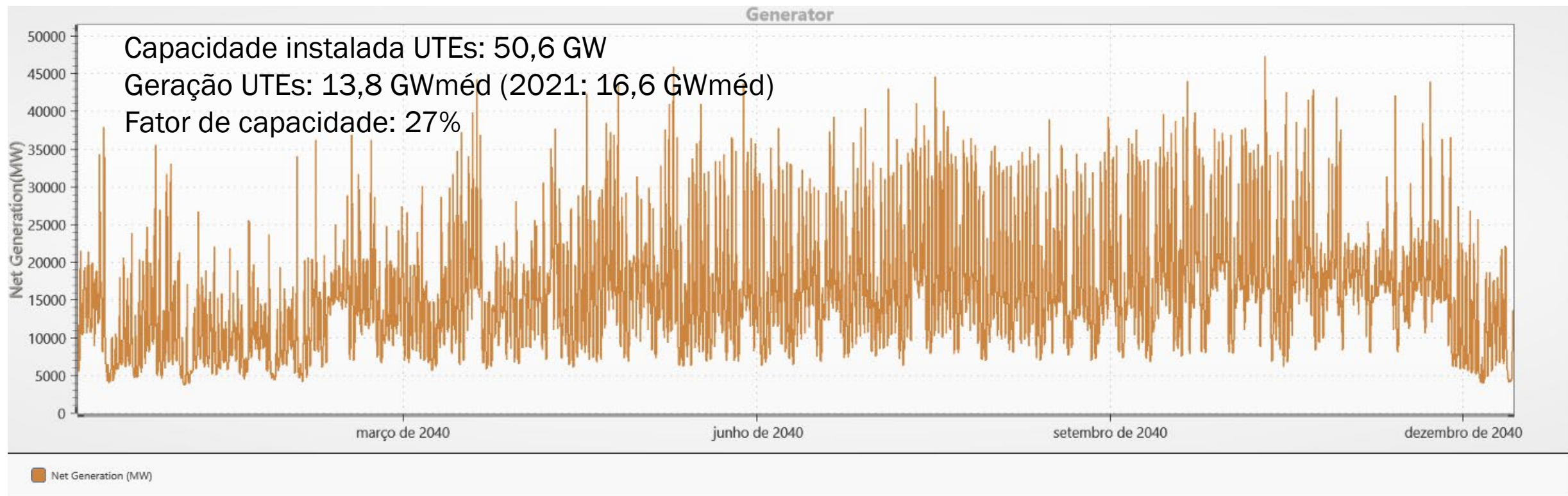
Despacho UTE 2040. Hidrologia boa.



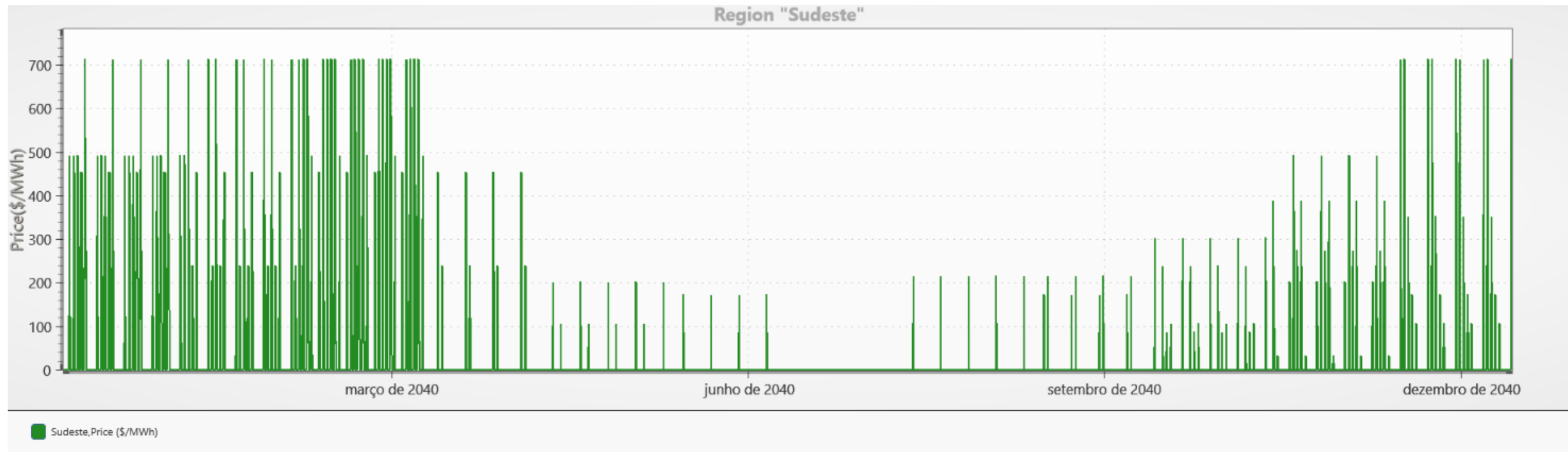
Despacho UTE 2040. Hidrologia média.



Despacho UTE 2040. Pior hidrologia.



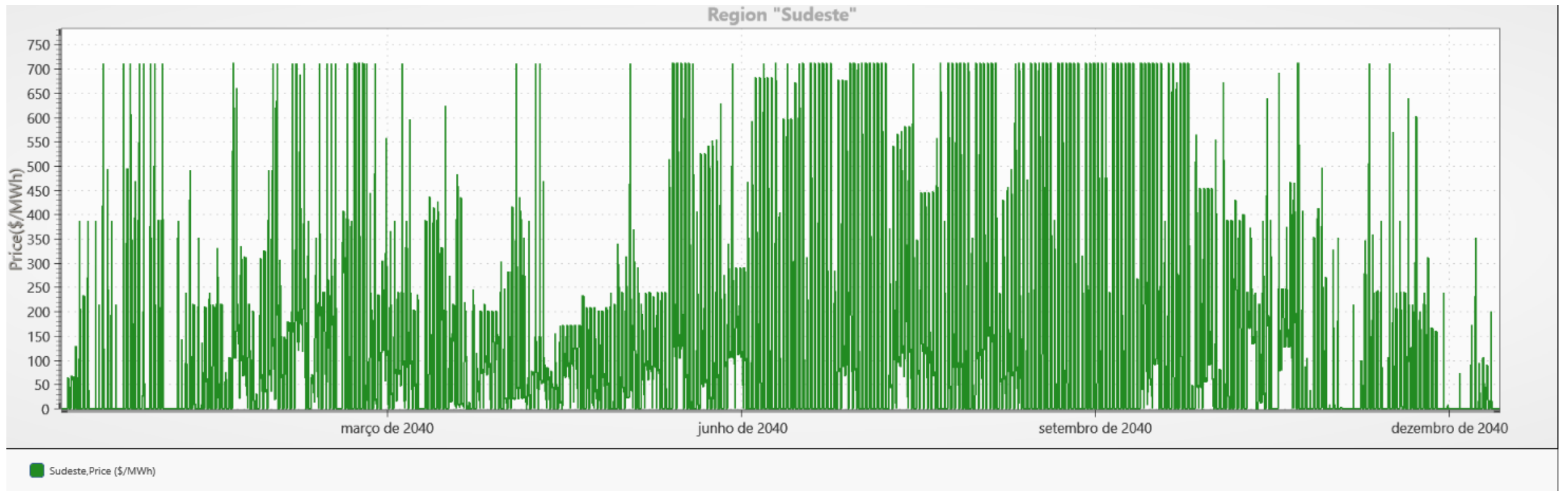
CMO SE 2040. Hidrologia boa.



CMO SE 2040. Hidrologia boa.

		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	Dia
Dia	sáb	16	13	13	9	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	12	30	43	11	5	2	7
	dom	56	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	4	19	2	4
	seg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	15	38	86	23	78	32	35	53	22	16
	ter	13	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	32	60	88	41	121	67	75	44	18	24
	qua	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	21	36	85	44	66	81	37	61	32	20
	qui	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	22	49	98	45	67	61	32	57	24	20
	sex	13	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	68	62	51	57	51	62	26	28	18
Hora		16	5	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	14	36	61	31	61	48	36	38	18	16

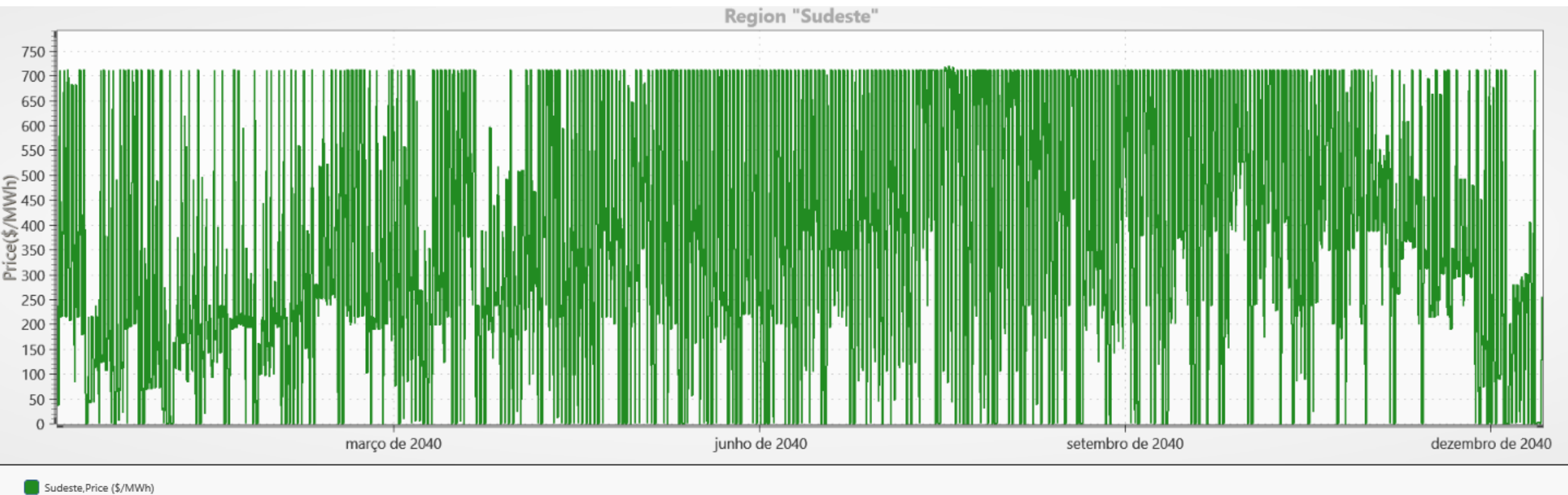
CMO SE 2040. Hidrologia média.



CMO SE 2040. Hidrologia média.

		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	Dia
Dia	sáb	191	85	48	44	43	38	29	7	4	1	1	0	1	0	9	38	115	286	369	426	359	350	327	231	125
	dom	76	48	23	12	6	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	63	156	190	162	146	145	91	47
	seg	41	22	22	21	21	21	24	15	12	8	6	6	9	10	50	131	315	398	386	389	382	362	392	292	139
	ter	95	63	52	46	45	47	38	35	29	19	18	14	15	20	51	141	328	391	382	385	406	387	395	310	155
	qua	115	77	55	46	41	42	41	31	28	17	14	15	16	14	51	161	335	388	397	406	385	399	389	322	158
	qui	158	69	46	45	41	41	40	34	29	20	19	19	20	30	70	192	376	430	429	426	424	411	430	379	174
	sex	218	98	56	46	46	47	47	37	32	20	16	14	18	16	67	201	331	408	395	418	402	388	404	336	169
	Hora	128	66	43	37	35	34	31	23	19	12	11	10	11	13	42	123	258	337	359	377	359	348	354	280	138

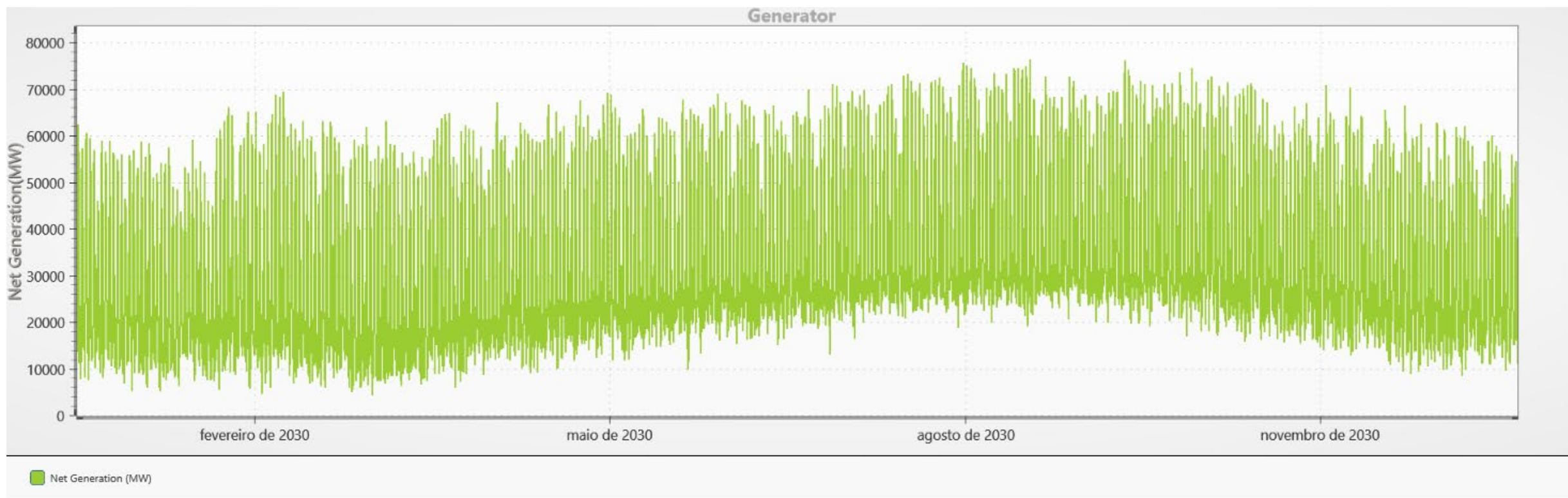
CMO SE 2040. Pior hidrologia.



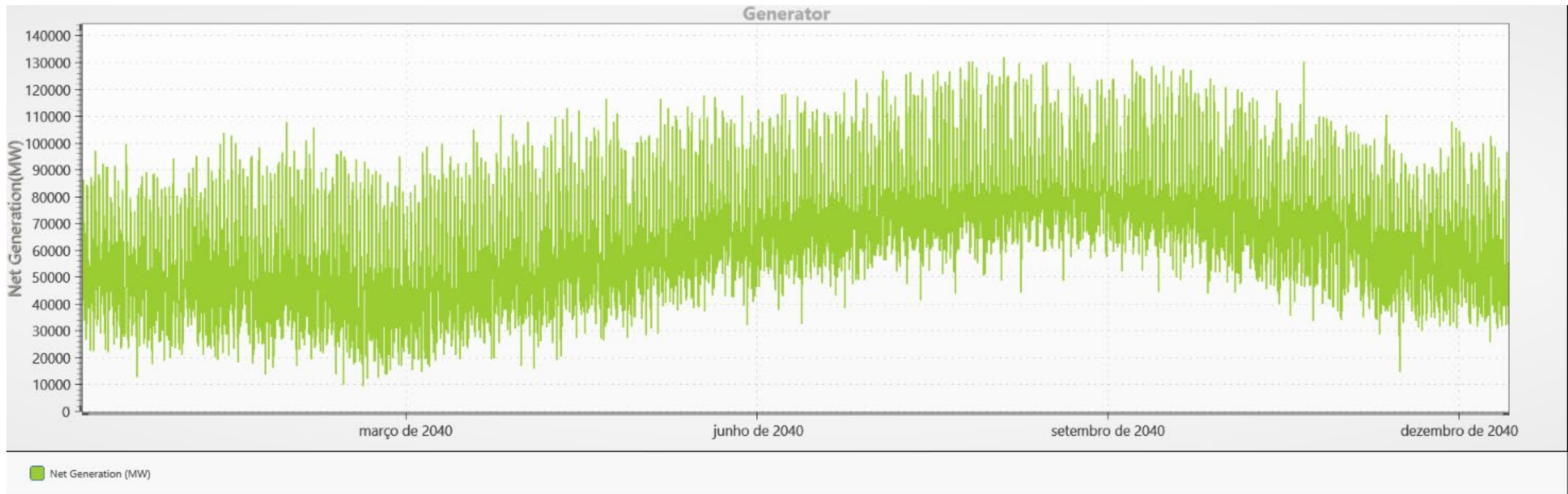
CMO SE 2040. Pior hidrologia.

		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	Dia	
Dia	sáb	521	423	349	302	297	288	226	121	58	51	45	45	46	55	101	301	461	610	629	638	642	628	642	592	336	
	dom	549	371	228	161	137	123	65	10	4	4	4	4	4	4	14	75	219	445	514	537	525	510	519	482	230	
	seg	376	300	285	283	273	260	279	254	229	185	169	165	153	194	336	536	616	629	617	640	622	628	638	606	386	
	ter	548	412	374	346	346	345	354	328	263	182	178	178	179	194	342	537	616	635	618	639	617	632	623	598	420	
	qua	522	420	368	354	344	340	335	308	233	191	164	177	176	198	296	540	613	624	633	651	628	632	654	602	417	
	qui	531	406	366	341	337	339	352	319	236	185	172	172	170	198	344	526	635	649	634	649	636	632	637	629	421	
	sex	519	430	369	357	353	353	351	325	253	207	180	186	201	219	343	528	603	609	604	610	624	607	598	571	417	
	Hora	509	395	334	306	298	292	280	237	182	143	130	132	132	151	253	434	537	600	607	623	613	609	616	583	375	

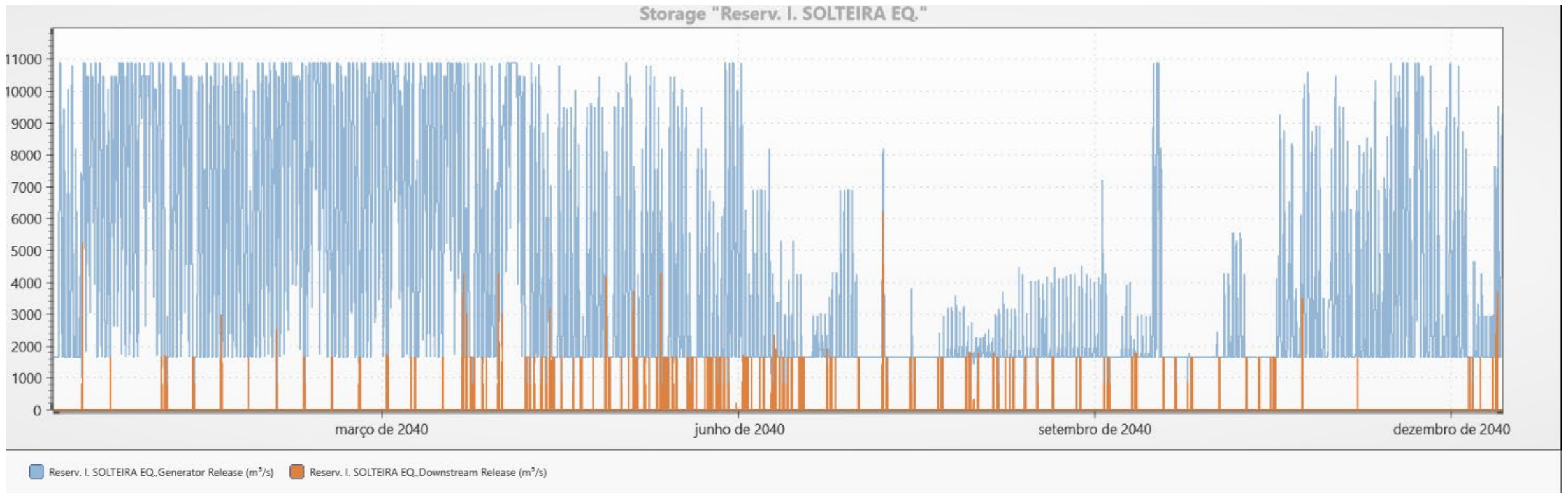
Geração renovável 2030 (BIO, EOL, SOL)



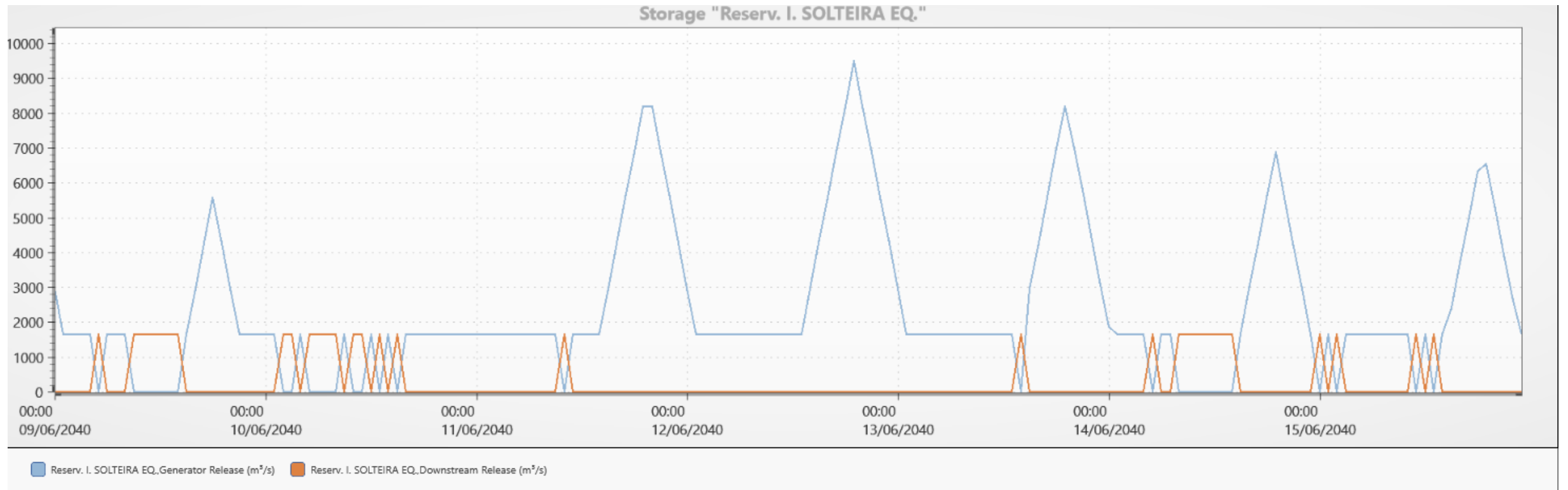
Geração renovável 2040 (BIO, EOL, SOL)



Vertimentos 2040. Hidrologia fraca



Vertimentos 2040. Hidrologia fraca



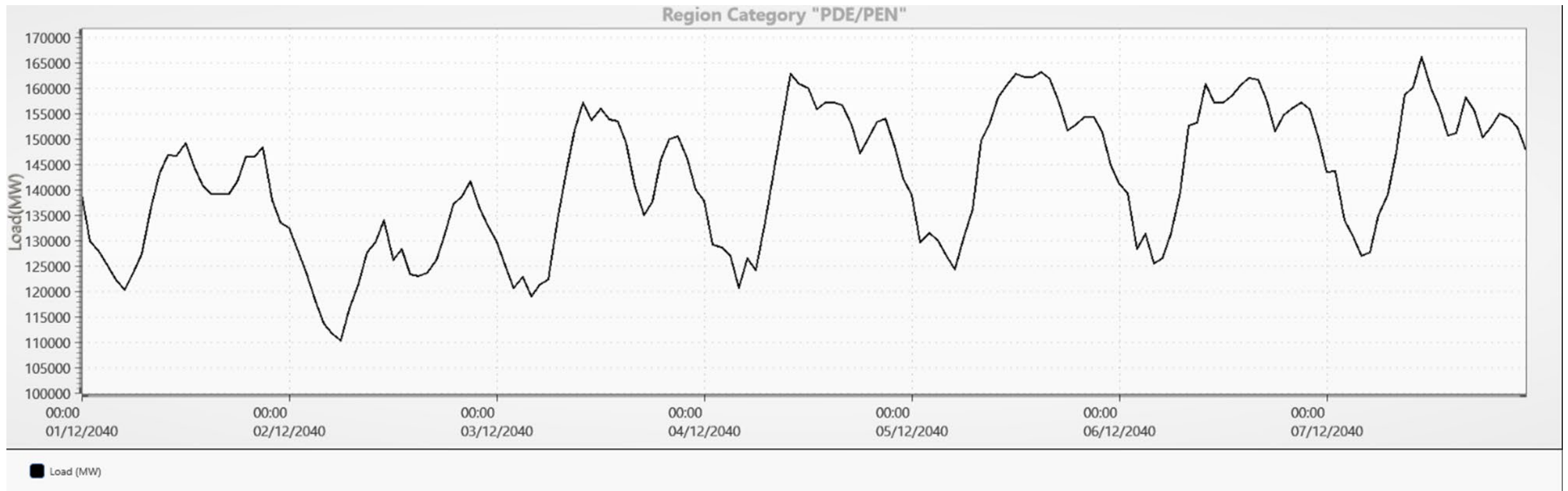
Curtailment e vertimentos 2030, em % da energia natural total mensal

Vertimentos + Curtailment em 2030 como proporção da energia natural do mês (em %)									
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Média
janeiro	40,5	7,2	11,4	26,8	18,0	14,5	6,7	9,1	18,6
fevereiro	51,5	11,4	16,7	35,2	13,9	14,9	11,1	11,5	24,5
março	55,8	24,0	22,6	23,4	19,8	19,1	17,9	16,7	28,1
abril	53,2	28,9	22,5	27,2	17,8	29,8	15,4	16,0	28,9
maio	55,2	31,8	20,7	23,1	9,6	31,0	11,6	12,3	28,5
junho	59,6	20,9	13,8	9,8	9,3	15,8	23,2	7,9	25,9
julho	63,6	5,0	16,8	8,9	10,2	8,8	7,0	5,5	24,6
agosto	39,9	7,2	5,4	6,8	9,4	15,0	7,1	6,4	14,8
setembro	46,7	9,7	14,6	7,4	8,0	42,2	5,6	7,5	22,9
outubro	51,7	5,1	41,4	10,7	16,2	48,7	5,1	3,6	30,1
novembro	48,6	11,0	21,9	18,3	27,4	43,2	6,2	2,3	27,0
dezembro	50,8	19,9	26,1	30,7	38,6	46,8	9,0	11,0	33,0
Média	52,3	16,8	20,9	21,3	18,3	30,5	11,2	10,2	26,1

Curtailment e vertimentos 2040, em % da energia natural total mensal

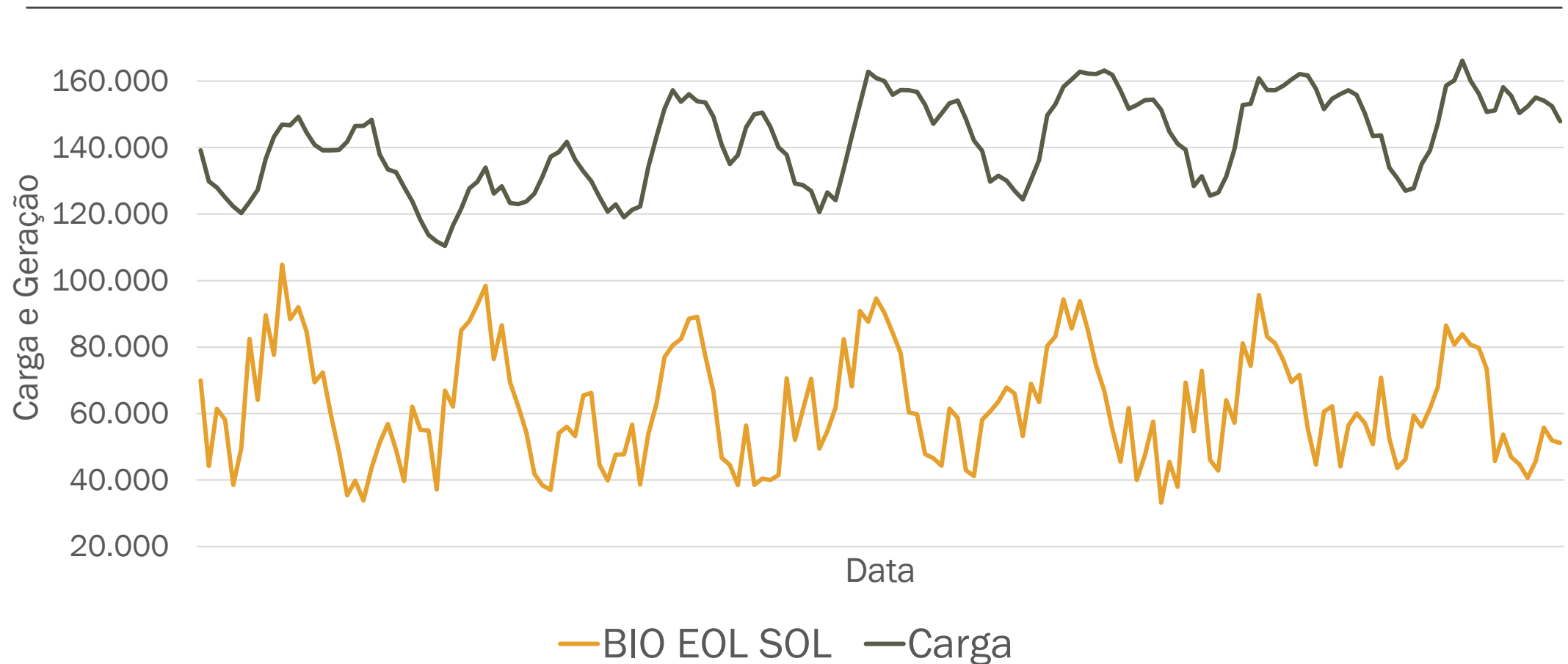
Vertimentos + Curtailment em 2040 como proporção da energia natural do mês (em %)									
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Média
janeiro	36,6	6,4	11,8	12,3	17,6	12,5	3,9	5,7	14,8
fevereiro	47,1	9,9	22,9	21,7	9,3	12,1	6,9	7,4	19,9
março	49,5	23,9	20,1	20,3	11,6	14,4	14,0	14,5	23,5
abril	51,5	21,6	10,6	21,2	13,9	20,5	12,3	11,6	23,5
maio	54,1	24,4	15,1	21,9	9,4	29,5	8,5	7,1	25,4
junho	60,6	14,6	9,5	13,6	9,5	15,4	22,9	6,1	25,7
julho	66,0	6,8	13,2	10,5	10,0	8,6	7,3	6,3	26,7
agosto	47,5	8,2	7,9	7,9	9,9	25,3	8,4	8,0	19,9
setembro	47,7	11,6	35,1	8,9	15,6	47,9	7,1	8,1	29,1
outubro	48,9	5,6	26,0	20,3	17,8	44,1	5,2	7,0	27,3
novembro	44,3	4,0	8,6	20,5	16,1	35,0	4,8	3,1	20,9
dezembro	44,6	13,1	22,2	23,9	28,6	40,3	4,6	8,8	26,5
Média	50,4	14,0	17,6	18,2	14,7	26,6	9,3	8,4	23,2

Carga do SIN 1º sem dez/2040.



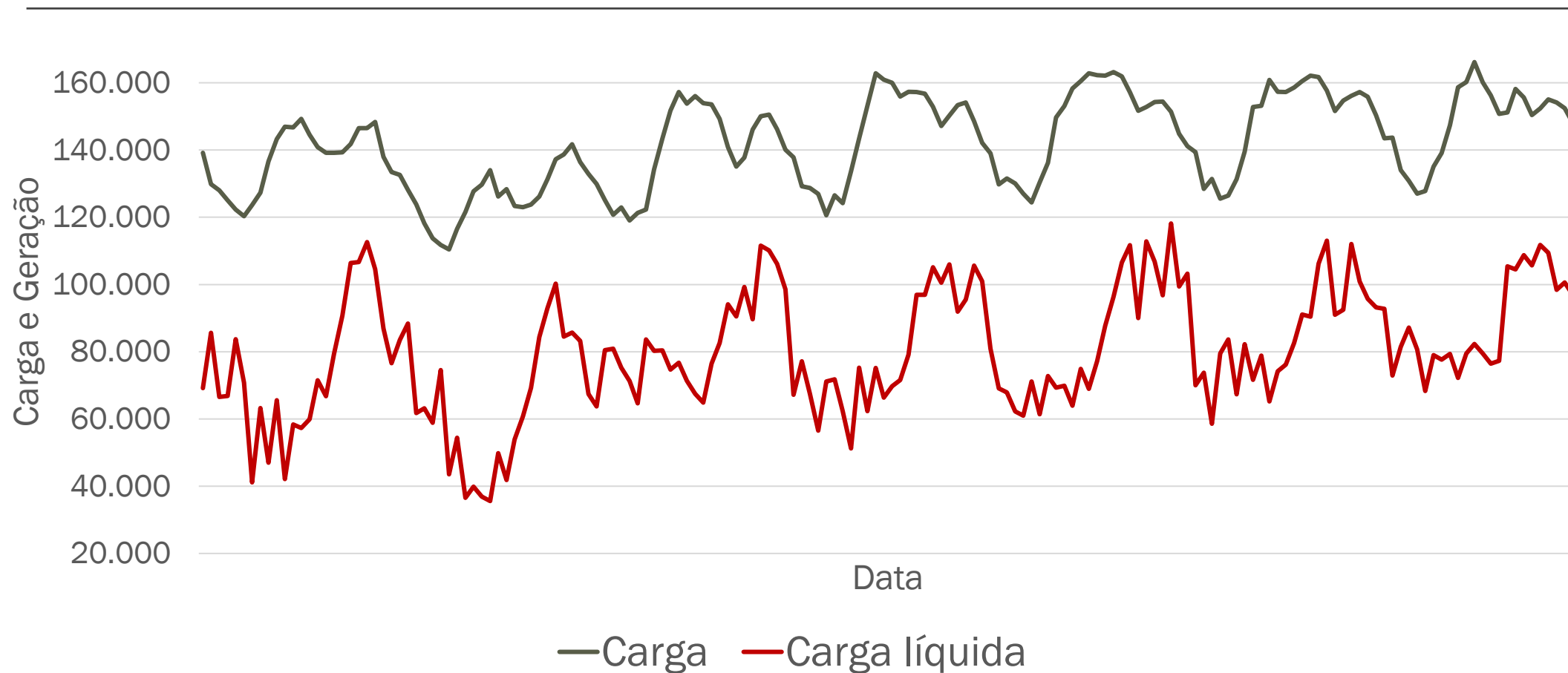
Carga e geração renovável

SIN 1º sem dez/2040 (em MW)



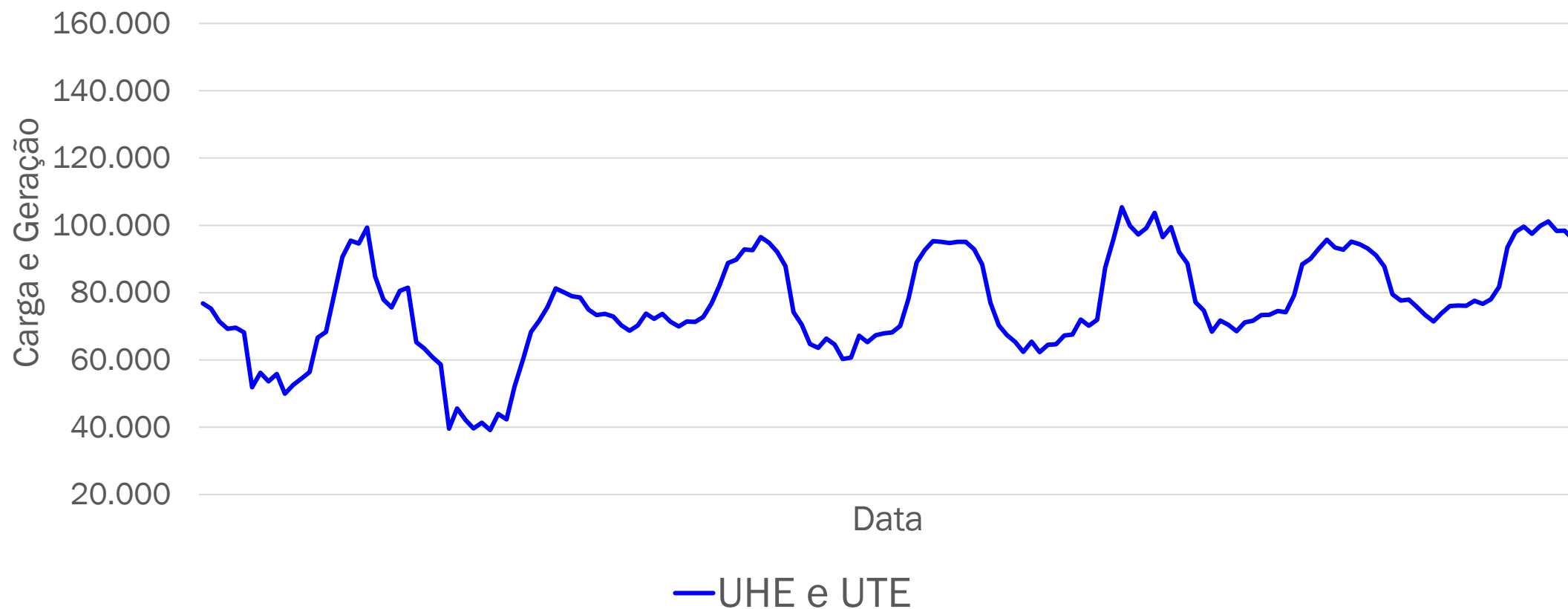
Carga e carga líquida

SIN 1º sem dez/2040 (em MW)



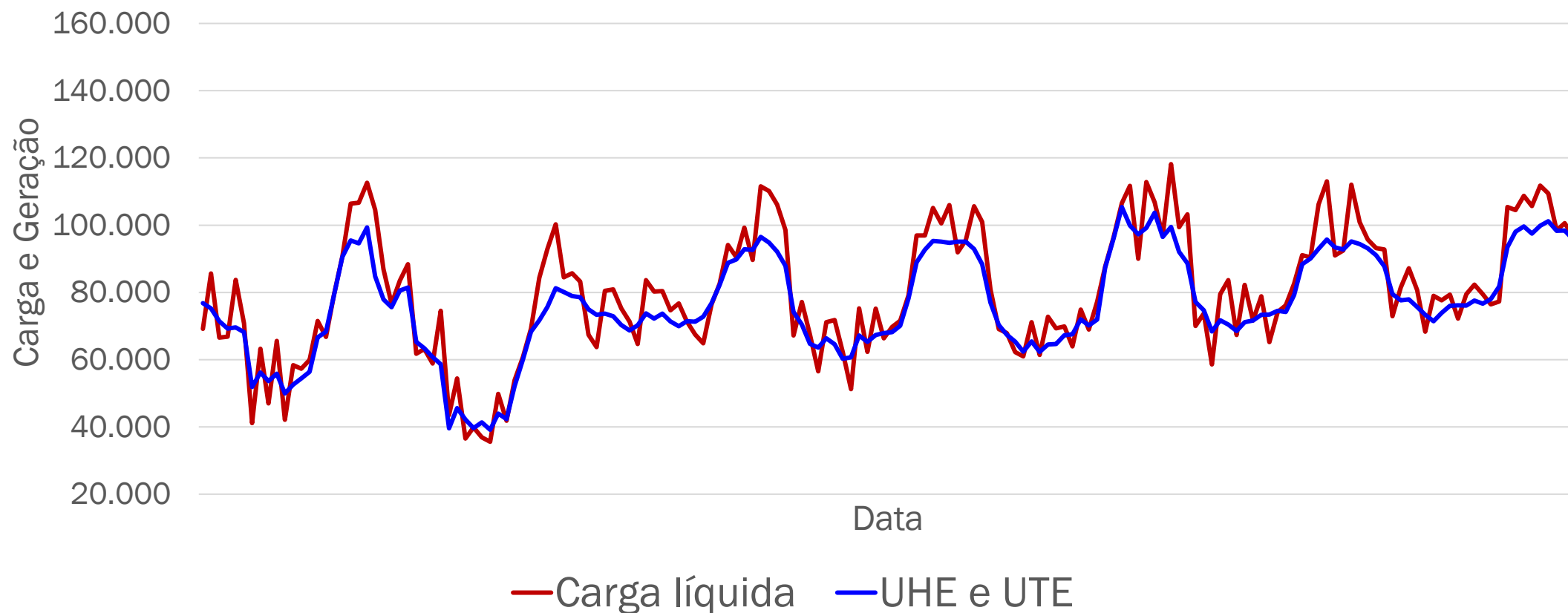
Geração controlável

SIN 1º sem dez/2040 (em MW)



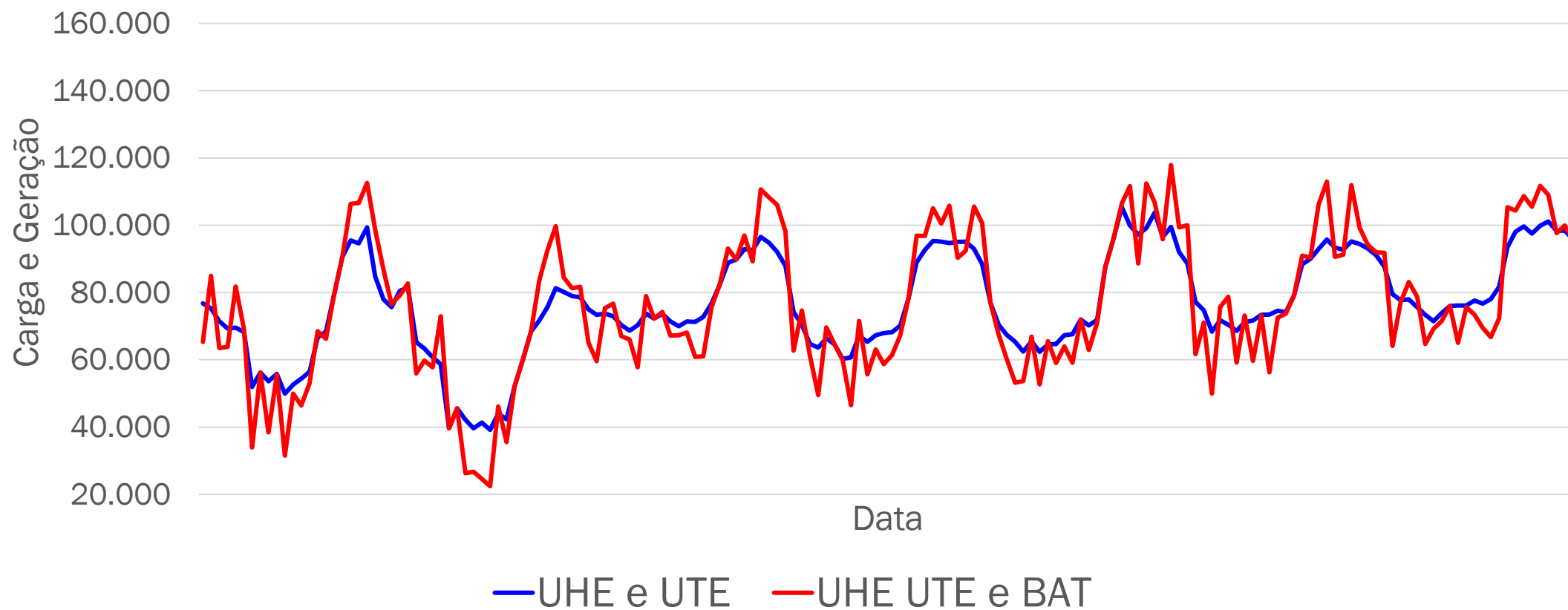
Carga líquida e geração controlável

SIN 1º sem dez/2040 (em MW)

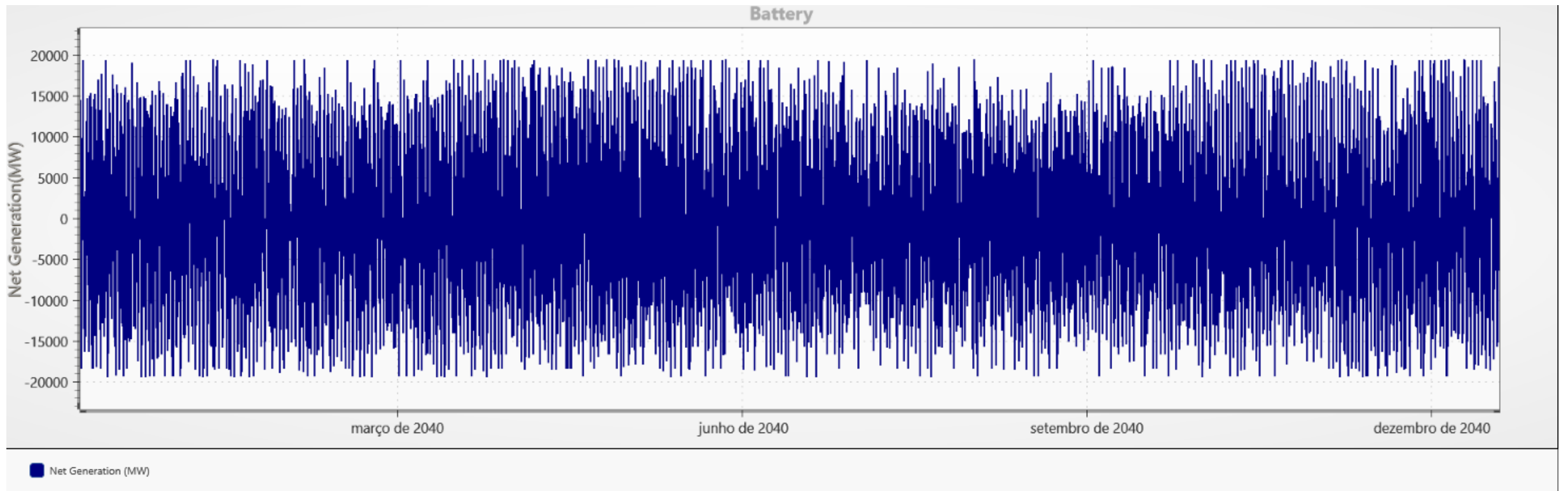


Carga líquida e geração controlável (c/ BAT)

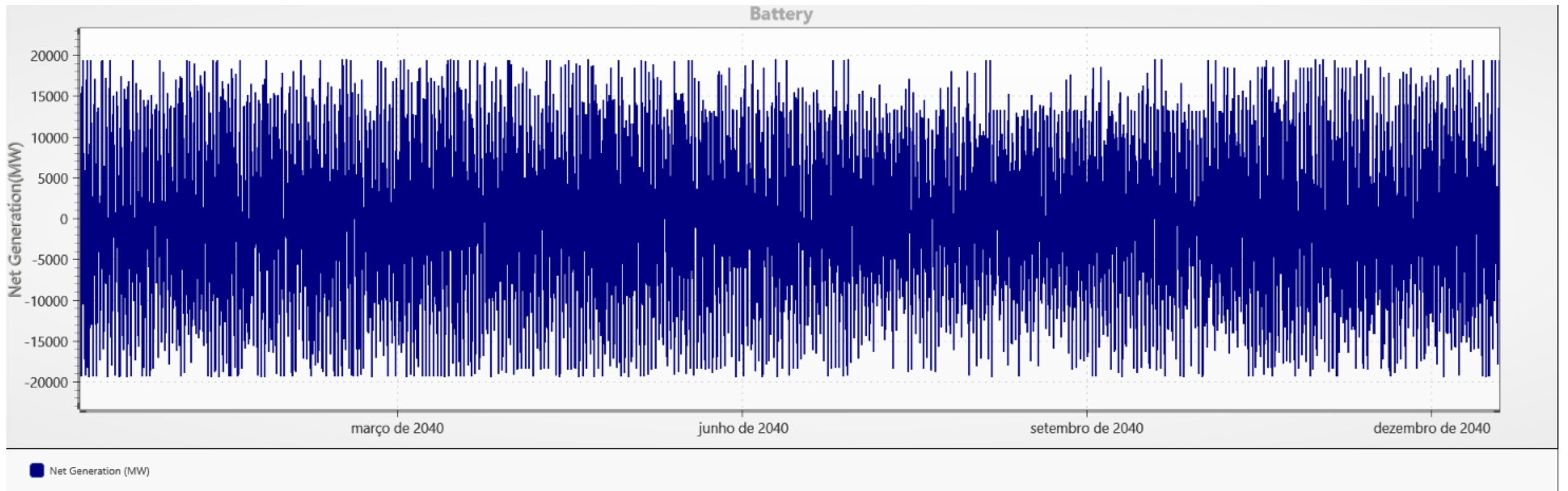
SIN 1º sem dez/2040 (em MW)



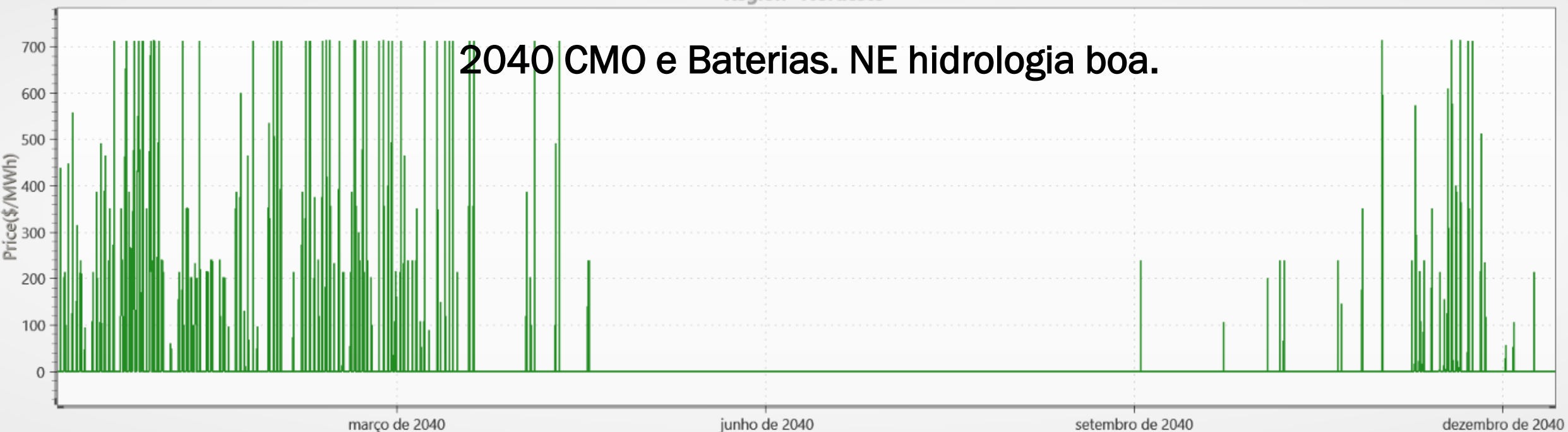
Baterias 2040. Hidrologia boa.



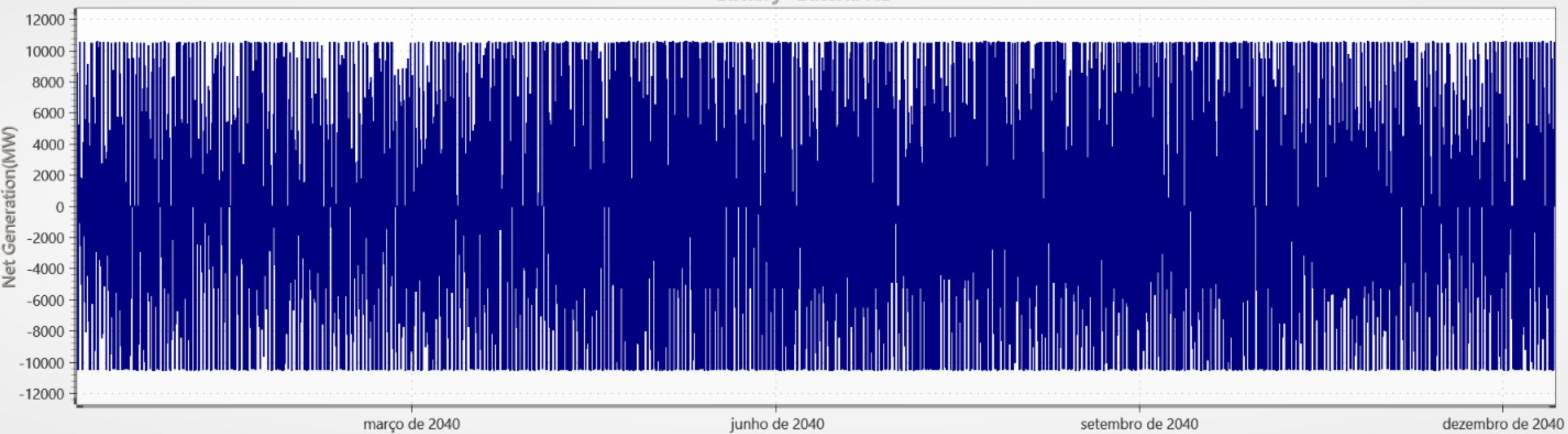
Baterias 2040. Pior hidrologia.



Region "Nordeste"



Battery "Bateria NE"



Conclusão

O futuro da operação do sistema

O ponto central para as simulações da operação do SIN no futuro é a flexibilidade. É importante:

- Estimar corretamente a variabilidade da carga e da geração renovável.
- Estimar corretamente a flexibilidade do parque térmico atual e futuro. Tornar mais flexíveis as termelétricas atuais para que possam operar como acompanhamento de carga.
- Mapear as restrições à flexibilidade das hidrelétricas, particularmente as rampas de defluência.
- As simulações realizadas mostraram uma mudança no padrão de uso do parque térmico com foco na flexibilidade e não mais como backup para hidrologias ruins.
- Armazenamento parece ser a tecnologia chave para atender aos requisitos crescentes de flexibilidade.

Conclusão

Impactos no modelo setorial

- Até 2027-28 o cenário é de um claro excesso de capacidade, fruto da corrida do ouro das renováveis e do boom da MMGD.
- Evolução no modelo setorial precisa levar em conta os desafios trazidos pela evolução do perfil da matriz de geração em um horizonte temporal maior:
 - Sinal econômico para que a expansão da geração seja eficiente;
 - Mudança de papel da geração hídrica e térmica;
 - Necessidade crescente de flexibilidade por parte do parque gerador;
 - Curtailment/vertimentos rotineiros, mesmo em hidrologias ruins.

Obrigado!

robertobrandao@gmail.com

GESEL - UFRJ

(21) 2051-5177 / 3577-3953