

GRUPO DE ESTUDO GPL

REPRESENTAÇÃO DA CURVA DE CARGA EFEITO SOBRE O PLANEJAMENTO

**Pedro David* Felipe Gonçalves Guilherme Viana Pamella Sangy Simone Brandão
Empresa de Pesquisa Energética (EPE)**

**Alessandro Soares Filipy César Luiz Carlos da Costa Jr. Ricardo Perez
PSR Consultoria**

RESUMO

A representação fiel da curva de carga é fundamental para a qualidade do planejamento energético. Atualmente, nos estudos de PMO, Preço e PDE a curva de carga é discretizada em três blocos de carga não cronológicos, agregados pelo valor da carga horária. Esta representação é considerada adequada para sistemas com predominância de geração hidrelétrica e pouca participação renovável intermitente, quando o valor horário do custo marginal da demanda e o valor da água permanecem praticamente constantes durante longos períodos. Contudo, a geração renovável (eólica e solar), requer uma representação mais adequada da curva de carga pela variabilidade na escala horária.

Este artigo estuda a representação da curva de carga em blocos (patamares) e em dias típicos (blocos cronológicos) comparando o seu efeito com uma análise horária cronológica.

PALAVRAS-CHAVE

representação da curva de carga, patamares de carga, planejamento energético

1.0 INTRODUÇÃO

Atualmente, o planejamento da operação utiliza a curva de carga horária discretizada em três blocos (patamares) não cronológicos. Contudo, a entrada na matriz energética das renováveis com grande variabilidade horária correlacionada com a curva de carga, requer a evolução desta representação para se adequar à nova realidade da operação do sistema.

A curva de carga horária pode ser discretizada de diferentes modos, listados a seguir em ordem crescente de detalhamento:

- Representação não cronológica da curva de carga agregada em blocos de forma assíncrona (curva de duração de carga)
- Representação não cronológica com a carga horária agregada em blocos síncronos (mapeamento hora-bloco)
- Representação cronológica com a carga horária discretizada em blocos horários consecutivos, agregados em dias típicos (não analisado neste artigo)
- Representação cronológica da carga horária por completo

As variáveis de decisão do modelo de planejamento (geração, intercâmbio etc.) são definidas para cada bloco ou hora e, portanto, um maior número de blocos melhora a fidelidade da representação da curva de carga e da produção das renováveis e a representação cronológica permite estabelecer as restrições de flexibilidade da geração.

Neste estudo analisamos a representação em 4 e 12 blocos síncronos não cronológicos, comparando os resultados da operação contra os resultados de uma simulação horária (todas as horas) cronológica, para o ano de 2025, tendo como base o PDE 2031, sem expansão.

1.1 Representação em Blocos da Curva de Carga

Os blocos de carga são definidos pela duração e profundidade. A duração é dada pela fração da duração do dia e a profundidade pela razão em relação à carga média mensal, de modo que a área total dos blocos seja igual à área sob a curva de carga horária.

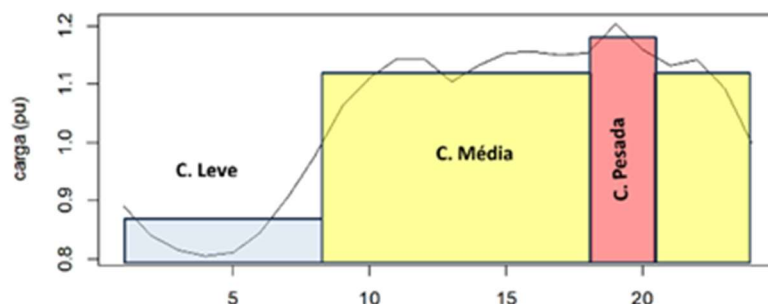


Figura 1 – Curva de Carga Discretizada em 3 Blocos

1.2 Agregação Síncrona e Assíncrona

A agregação das cargas é usualmente feita de forma assíncrona no qual os dados da carga normalizada são ordenados formando a “curva de duração de carga”.

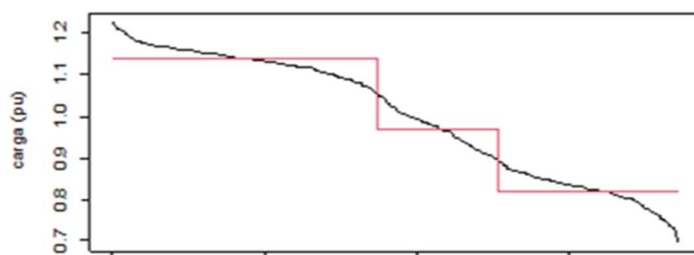


Figura 2 – Agregação Assíncrona da Carga em 3 Blocos

A figura acima mostra que a ordenação resulta na perda da cronologia. Contudo, operacionalmente os conjuntos de 3 blocos de carga são sincronizados com as horas ao longo de cada dia como ilustrado na figura 1, em mapas hora-bloco para cada mês e dias típico (dia útil e demais dias), conforme Procedimento de Rede (ONS) – Módulo 5.6

Quadro 1 – Intervalos horários de patamares de carga diária de energia⁶

Patamar de carga	Maio a Agosto		Abril, Setembro e Outubro		Novembro a Março	
	2ª a 6ª feira	Sábado, domingo e feriado	2ª a 6ª feira	Sábado, domingo e feriado	2ª a 6ª feira	Sábado, domingo e feriado
Leve	01ª h à 7ª h	1ª h à 18ª h 23ª h à 24ª h	1ª h à 8ª h	1ª h à 18ª h 23ª h à 24ª h	1ª h à 8ª h	1ª h à 20ª h 24ª h
Média	8ª h à 10ª h 23ª h à 24ª h	19ª h à 22ª h	09ª h à 10ª h 21ª h à 24ª h	19ª h à 22ª h	09ª h à 10ª h 19ª h à 24ª h	21ª h à 23ª h
Pesada	11ª h à 22ª h	-	11ª h à 20ª h	-	11ª h à 18ª h	-

Figura 3 – Mara-hora-Bloco – Procedimentos de Rede - Módulo 5.6

A EPE utiliza a discretização assíncrona em 4 blocos, incluindo um bloco adicional de 10 horas mensais para dar um destaque maior para as horas de maior carga (pico) mensal, como ilustrado na figura 4.

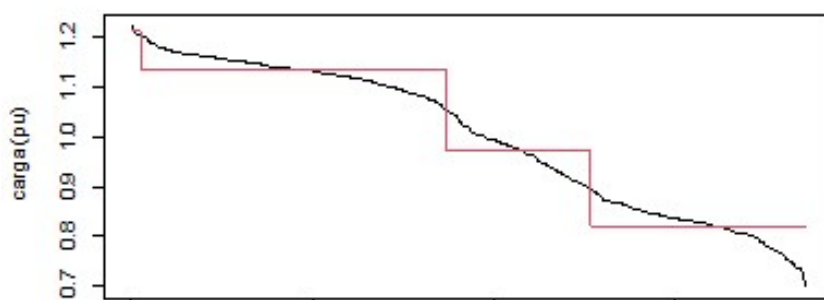


Figura 4 – Agregação Assíncrona da Carga em 3 Blocos com o Bloco de Ponta

Evidentemente quanto maior o número de blocos, maior a fidelidade da representação da curva de carga, como ilustrado na figura 5 que mostra a curva de carga discretizada em 12 blocos sincronizados com a curva horária.

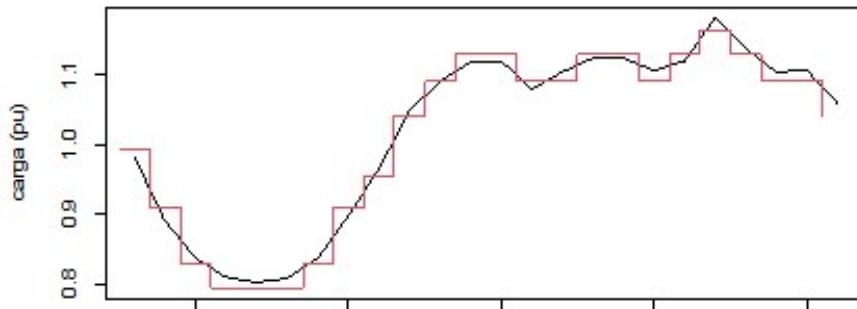


Figura 5 – Agregação Síncrona da Carga em 12 Blocos

Contudo, a maior fidelidade da representação da curva de carga implica na multiplicação do número de restrições, não apenas da demanda, mas de todas as outras em que a geração em cada bloco seja uma variável de decisão, implicando em um aumento do custo computacional.

1.3 Influência das Renováveis - Carga Líquida

A produção das renováveis (eólica e solar) apresenta uma variação horária cíclica. Ao discretizar a curva de carga, implicitamente discretizamos também a produção da geração renovável. Para manter uma boa representação conjunta da curva de carga e da produção renovável temos três possíveis estratégias:

- 1) No caso da discretização assíncrona da curva de carga, ou seja, quando esta é representada pela curva de duração de carga, podemos discretizar a curva de carga líquida, isto é, abater a produção renovável média da carga bruta
- 2) No caso da discretização síncrona, podemos
 - a) aumentar o número de blocos (adotada neste estudo), ou
 - b) Fazer a agregação conjunta das curvas de carga e de produção renovável

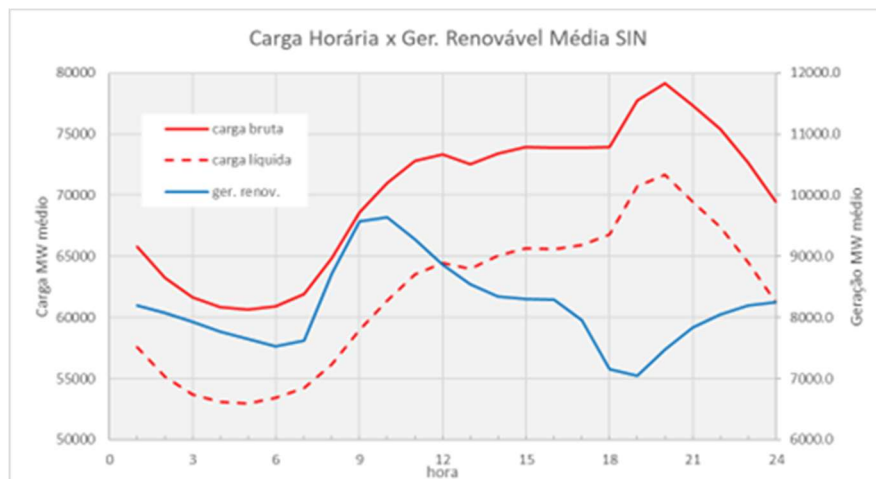


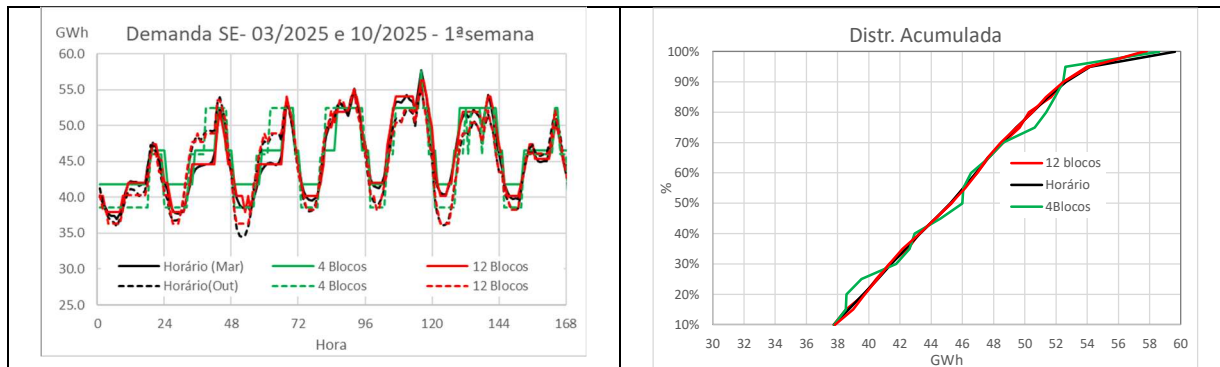
Figura 6 – Carga Horária x Geração Renovável

2.. ESTUDO DE CASO

Para avaliar a qualidade da representação da curva de carga fizemos um estudo tendo como o caso base o PDE 2031 para o ano de 2025 (sem expansão indicativa, contemplando apenas a expansão já contratada), com as renováveis representadas de forma estocástica, utilizando o SDDP (PSR) na versão 17.3.11. Cabe mencionar que foram simulados 300 cenários.

Dada esta simulação, foram avaliados os resultados de Custo Marginal de Demanda (CMO) do Sudeste, da Geração Hidrelétrica, Geração Termelétrica e Renovável (Eólica + Solar) e Energia Armazenada do Sistema Integrado (SIN) dos casos da discretização síncrona da curva de carga em 4 e 12 blocos.

2.1 Demanda

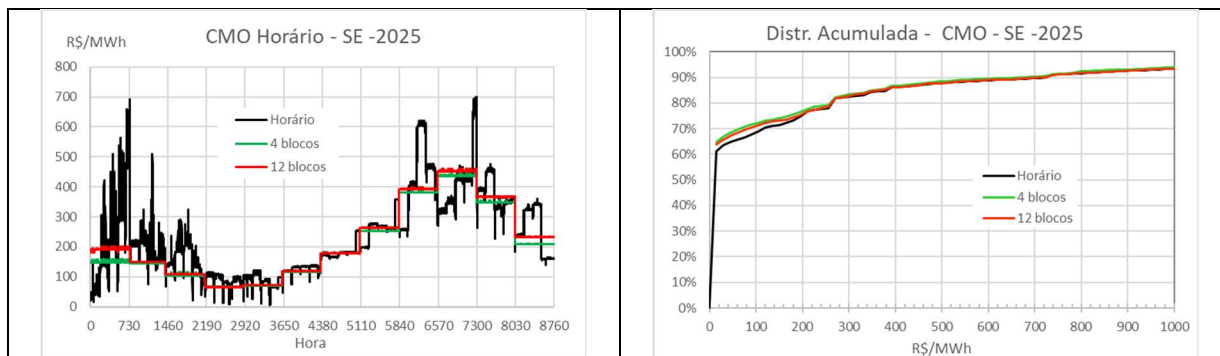


Figuras 7a e 7b – Demanda Sudeste 2025

A figura 7a mostra a variação horária da curva de carga horária do subsistema Sudeste para a 1ª semana de março e de outubro de 2025 e as curvas da carga discretizada em 4 e em 12 blocos, onde podemos observar como a discretização com 4 blocos descola da curva de carga horária.

A figura 7b mostra o efeito da discretização sobre a distribuição de probabilidade acumulada e novamente se pode observar que a a discretização em 12 blocos é aderentes à curva horária, enquanto que a distribuição com a discretização em 4 blocos, oscila em torno da horária.

2.2 Custo Marginal de Operação (CMO)

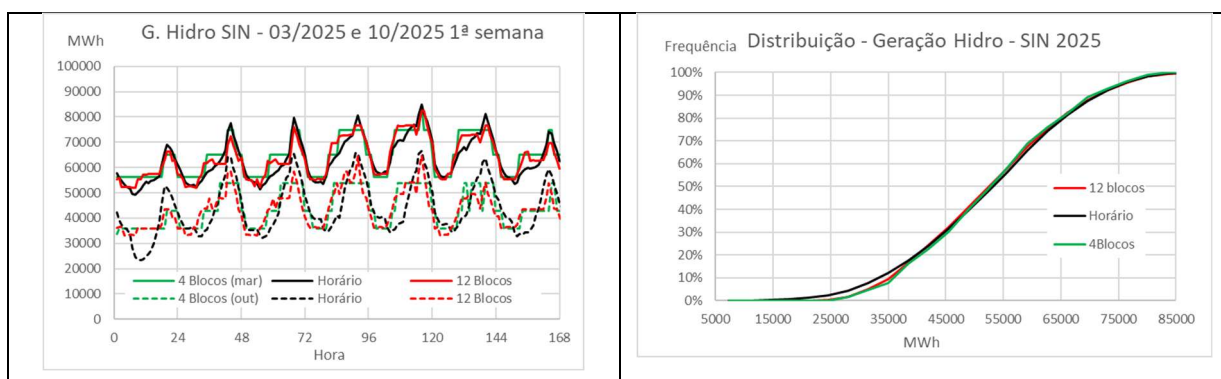


Figuras 8a e 8b – CMO Sudeste 2025

A figura 8a mostra a curva anual do CMO horário e discretizado em 4 e em 12 blocos. É notável como a variação horária não é acompanhada nem mesmo no caso em que a curva de carga é discretizada em 12 blocos. Também se nota que as curvas de CMO para 4 e 12 blocos são próximas entre si em quase todos os meses, com exceção de janeiro, quando a maior variação da carga horária é mais bem capturada em termos médios pela simulação com a curva de carga discretizada em 12 blocos.

A figura 8b mostra que a distribuição é pouco afetada pela discretização, exceto pelos valores inferiores a 200 R\$/MWh que ocorrem mais frequentemente em janeiro.

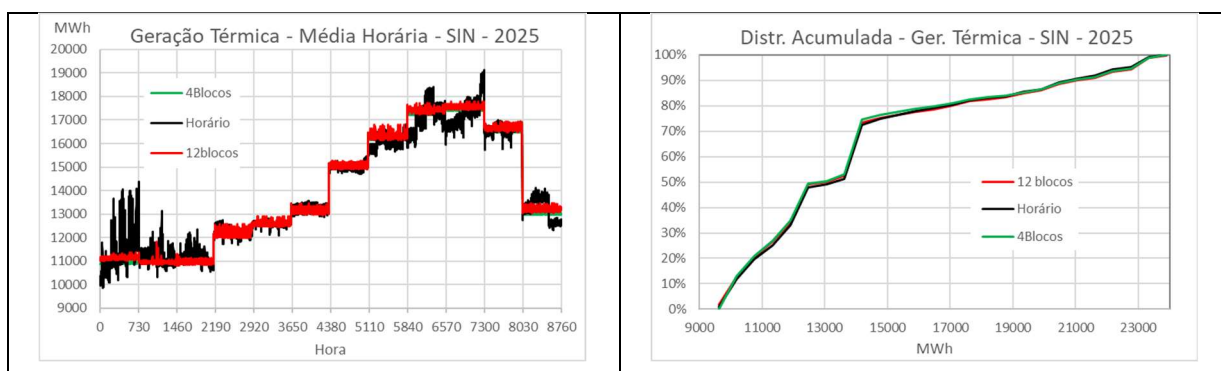
2.3 Geração Hidro



Figuras 9a e 9b – Geração Hidrelétrica – SIN 2025

A figura 9a mostra as curvas de geração hidro do Sudeste na 1ª semana de março e de outubro de 2025. Observamos que nos dias iniciais, correspondentes aos finais de semana, os resultados com a curva de carga discretizada tendem a ser maiores do que com a curva de carga horária. Nos demais dias a curva com 12 blocos é mais aderente à horária, como esperado. A figura 9b reflete estas observações.

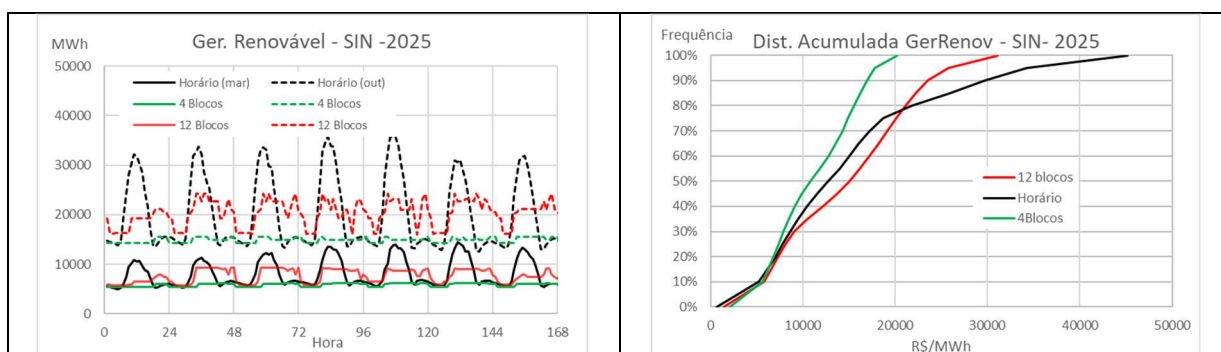
2.4 Geração Térmica



Figuras 10a e 10b – Geração Termelétrica – SIN 2025

A figura 10a destaca que a geração térmica resultante da simulação com as curvas de carga discretizadas não acompanham os resultados obtidos com a simulação horária. Este é um resultado importante quando se quer verificar o atendimento da demanda de ponta e do requisito de flexibilidade.

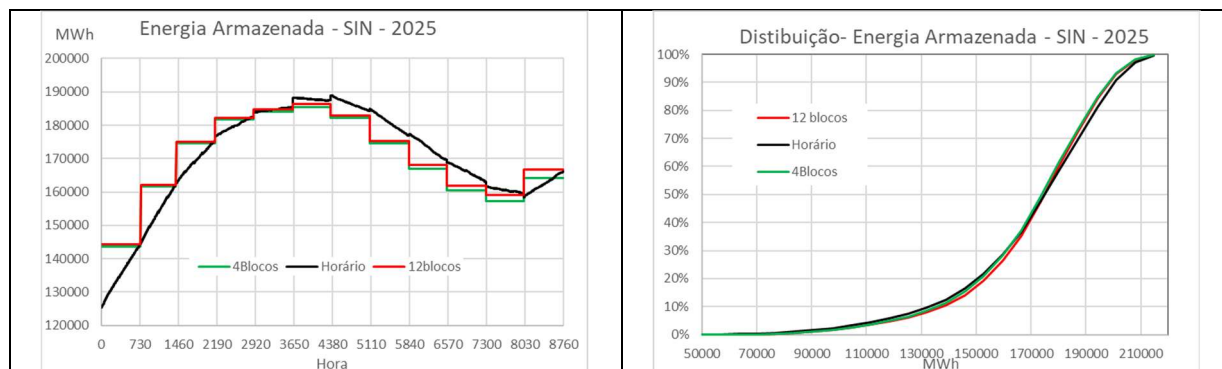
2.5 Geração Renovável (Eólica + Solar)



Figuras 11a e 11b – Geração Renovável – SIN 2025

A figura 11a mostra como a geração renovável não é bem representada nem mesmo com a discretização em 12 blocos. O descolamento em relação ao resultado com a representação horária parece ser a principal causa da distorção no CMO. Talvez o agrupamento conjunto da curva de carga e da geração renovável ou até mesmo da carga líquida resultem numa representação mais fiel, pelo menos para o caso com 12 blocos.

2.6 Energia Armazenada



Figuras 12a e 12b – Energia Armazenada SIN 2025

A figura 12a mostra que no 1º semestre (período de menor produção renovável intermitente) os resultados com a curva de carga discretizada são mais otimistas (maior estoque de água) do que com a curva de carga horária e mais pessimista no 2º semestre (período de maior produção renovável), por não capturar bem a produção das eólicas e solares, como já apontado anteriormente.

3.0 CONCLUSÕES

Este breve estudo tentou mostrar a importância da discretização da curva de carga e seu impacto nos estudos de planejamento. Destacamos a observação de que mesmo a discretização da curva de carga em 12 blocos não foi suficiente para capturar a variabilidade da geração renovável, impactando todos os resultados. Também chamou a nossa atenção a grande variabilidade do CMO a despeito da relativa estabilidade da energia armazenada, refletindo a mudança estrutural da matriz eletroenergética brasileira. Finalmente, entendemos que é necessário melhorar a representação da curva de carga, talvez com a representação da carga líquida ou com o agrupamento conjunto da curva de carga e da geração renovável.

4.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] PSR – MANUAL DE METODOLOGIA DO SDDP
- [2] CEPEL – MANUAL DE REFERÊNCIA DO NEWAVE
- [3] ONS – MÓDULO 5.6 DOS PROCEDIMENTOS DE REDE (2018)

DADOS BIOGRÁFICOS



PEDRO A. M-S. DAVID gradou-se em Eng. Elétrica pela UFRJ em 1974, obteve os títulos de mestre e doutor também em Eng. Elétrica pela PUC-Rio em 1995 e 2004. Trabalha na Empresa de Pesquisa Energética (EPE) desde 2006 na área de Planejamento Energético. Leciona desde 2002 sobre Mercado de Energia Elétrica e Planejamento Energético em diversas instituições.

FELIPE MOREIRA GONÇALVES graduou-se em Eng. Cartográfica e de Agrimensura pela UFPR em 2012. Trabalha na Empresa de Pesquisa Energética (EPE) desde 2014 na área de Planejamento Energético.

GUILHERME BRITO VIANA cursa Engenharia Elétrica na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), desde 2027 e faz estágio na Empresa de Pesquisa Energética (EPE) desde 12/2024 na área de Planejamento Energético.

PAMELLA ELLENG SANGY graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em 2011 e obteve o título de mestre em Eng. Elétrica pela UFRJ em 2016. Iniciou sua carreira em 2011 no Centro de Pesquisas da Eletrobrás (CEPEL) e desde 2015 trabalha na Empresa de Pesquisa Energética (EPE) na área de Planejamento Energético.

SIMONE QUARESMA BRANDÃO graduou-se em Matemática pela Universidade Castelo Branco – UCB em 2002, mestranda em Engenharia de Produção na Universidade de São Paulo – USP. Trabalha na Empresa de Pesquisa Energética (EPE) desde 2009 na área de Planejamento Energético.

ALESSANDRO SOARES graduou-se em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio em 2017 e obteve o título de mestre em Eng. Elétrica e otimização também pela PUC-Rio em 2019. Iniciou sua carreira em 2017 na PSR e atua como Head em Ferramentas Analíticas.

FILIPY CÉSAR graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFRJ em 2023 e está atualmente cursando o mestrado em Eng. Elétrica pela PUC-Rio. Iniciou sua carreira na PSR em 2022 e atua como Analista em Ferramentas Analíticas.

LUIZ CARLOS DA COSTA JR. gradou-se em Eng. Elétrica pela UFRJ em 2004, obteve os títulos de mestre e doutor também em Eng. Elétrica pela UFRJ em 2008 e 2013. Iniciou sua carreira na PSR em 2009 e atua como Diretor Técnico em Ferramentas Analíticas.

RICARDO PEREZ graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 2008 e obteve o título de mestre em Eng. Elétrica pela UFRJ em 2014. Iniciou sua carreira na PSR em 2009 e atua como Head em Ferramentas Analíticas.