



Nota Técnica

# Metodologia de Cenarização da Carga Líquida Horária

Novembro/2025

MINISTÉRIO DE  
MINAS E ENERGIA



### Coordenação Geral

Reinaldo da Cruz Garcia

### Coordenação Executiva

Gustavo Pires da Ponte

Caio Monteiro Leocádio

### Coordenação Técnica

Renata de Azevedo M. da Silva

Pamella Elleng Rosa Sangy

### Equipe Técnica

André Makishi

Bernardo Folly de Aguiar

Charles Egberto Guedes Vonnegut Vieira de Mello

Davi José Marques Vieira

Diego Pinheiro de Almeida

Gianpiero Camargo Bedin

Glaysson de Mello Muller

Leandro Pereira de Andrade (até 2024)

Rafael Pinho Furtado

Rafael Rigamonti

Renato Haddad Simões Machado

Roney Nakano Vitorino

Saulo Ribeiro Silva



#### Ministro de Estado

Alexandre Silveira de Oliveira

#### Secretário-Executivo

Arthur Cerqueira Valerio

#### Secretário de Transição Energética e Planejamento

Gustavo Cerqueira Ataíde

#### Secretário de Energia Elétrica

João Daniel de Andrade Cascalho

<http://www.mme.gov.br/>



#### Presidente

Thiago Guilherme Ferreira Prado

#### Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais

Thiago Ivanoski Teixeira

#### Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Reinaldo da Cruz Garcia

#### Diretor de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Heloisa Borges Esteves

#### Diretor de Gestão Corporativa

Carlos Eduardo Cabral Carvalho

<http://www.epe.gov.br>

## IDENTIFICAÇÃO DO DOCUMENTO E REVISÕES



Área de Estudo

**ESTUDOS PARA A EXPANSÃO DA GERAÇÃO**

Estudo

**Metodologia de Cengarização da Carga Líquida Horária**

Macro – atividade

**Atendimento do Sistema**

Ref. Interna (se aplicável)

Revisões

Data de emissão

Descrição sucinta

r0

11/11/2025

Emissão original

## Sumário

|               |  |           |
|---------------|--|-----------|
| <b>1</b>      | <b><i>Apresentação</i></b> .....                                     | <b>2</b>  |
| <b>2</b>      | <b><i>Metodologia da Carga Líquida Horária</i></b> .....             | <b>3</b>  |
| <b>2.1</b>    | <b><i>Dados de entrada</i></b> .....                                 | <b>4</b>  |
| <b>2.2</b>    | <b><i>Construção das distribuições de carga líquida</i></b> .....    | <b>5</b>  |
| <b>2.3</b>    | <b><i>Principais usos</i></b> .....                                  | <b>8</b>  |
| <b>1.1.1.</b> | <b>Análise de cenários e perfis futuros de carga líquida</b> .....   | <b>9</b>  |
| <b>1.1.2.</b> | <b>Análise de cenários de rampas de carga (Flexibilidade)</b> .....  | <b>10</b> |
| <b>1.1.3.</b> | <b>Reconstrução da representação por patamares: Uso NEWAVE</b> ..... | <b>12</b> |
| <b>2.</b>     | <b><i>Aprimoramentos futuros</i></b> .....                           | <b>15</b> |
| <b>3.</b>     | <b><i>Considerações finais</i></b> .....                             | <b>17</b> |
| <b>4.</b>     | <b><i>Glossário</i></b> .....  | <b>18</b> |
| <b>5.</b>     | <b><i>Referências Bibliográficas</i></b> .....                       | <b>20</b> |

# 1 Apresentação

Com a evolução da participação de fontes não despacháveis na matriz elétrica brasileira, principalmente referente ao crescimento das renováveis variáveis, além da micro e minigeração distribuída (MMGD), aumenta a necessidade de aprimoramento da sua representação nas metodologias e modelos de planejamento da operação e da expansão.

Diferente de outras fontes não despachadas centralizadamente, como pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e termelétricas à biomassa, as renováveis variáveis apresentam perfis de geração fortemente condicionados à disponibilidade dos recursos primários (como sol e vento). Esses perfis são caracterizados por elevados fatores de capacidade em determinados períodos do dia, alternados com momentos de baixa ou nenhuma geração. Essa variabilidade acentuada exige abordagens mais refinadas para representação dessas fontes nos estudos de planejamento.

Nesse contexto, a metodologia convencional de representação da carga e dessas fontes nos modelos matemáticos passou a apresentar limitações importantes que poderiam ser melhor representadas. Para mitigar essas limitações, a EPE introduziu o conceito de carga líquida, definida como a carga bruta horária subtraída da geração estimada das fontes não controláveis. Através de um pré-processamento, é possível capturar, de forma mais precisa, a demanda efetivamente a ser atendida pelos recursos despacháveis, aprimorando significativamente os estudos energéticos, além de trazer refinamentos fundamentais para estudos de potência e flexibilidade.

Adicionalmente, a consideração dos efeitos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade e a variabilidade dos recursos de geração renovável é cada vez mais relevante para o planejamento. A alteração de padrões históricos de vento e irradiância e a maior frequência de ondas de calor tendem a modificar, ao longo do tempo, os perfis de geração das fontes renováveis variáveis e da demanda. A utilização da carga líquida permite, inclusive, incorporar cenários futuros que reflitam essas mudanças, conferindo maior aderência entre o planejamento e a nova realidade climática.

A adoção das distribuições horárias de carga líquida nos estudos da EPE teve início no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2029, onde foi apresentada uma primeira avaliação de atendimento de flexibilidade do sistema. Desde então, com avanços relevantes na metodologia de projeção de carga global horária para todo horizonte decenal, esse uso foi sendo aprimorado. Atualmente, as distribuições de carga líquida elaboradas pela EPE são utilizadas em avaliações de patamares de carga, como insumo dos modelos de planejamento e estudos de flexibilidade e atendimento de potência do Sistema Interligado Nacional (SIN).

---

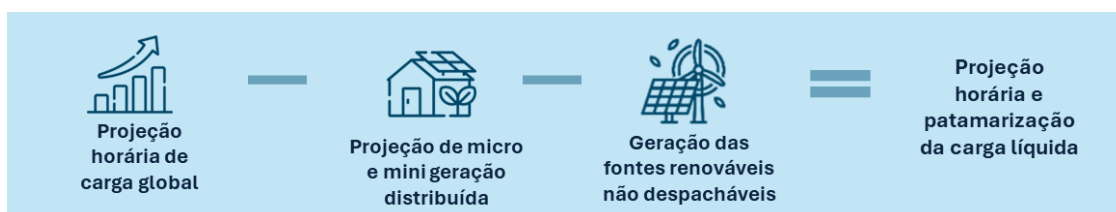
Esse trabalho visa descrever a metodologia de carga líquida horária e apresentar suas principais aplicações nos estudos da EPE. Pretende-se, ainda, incentivar o aprimoramento contínuo dessa abordagem, por meio da transparência dos dados e ferramentas utilizadas para construção de uma participação ativa dos demais agentes e instituições do setor elétrico.

---

## 2 Metodologia da Carga Líquida Horária

A carga líquida é um conceito importante para os estudos de planejamento da operação e da expansão de sistemas elétricos de potência. De forma simplificada, a carga líquida refere-se à carga residual para ser atendida através dos recursos despacháveis<sup>1</sup>, após descontada a geração das fontes não controláveis. Portanto, conforme mostrado na Figura 1, para construção da carga líquida<sup>2</sup>, subtrai-se da carga global estimada (consumo e perdas totais) toda a expectativa de geração não despachável, como renováveis variáveis e pequenas usinas de menor gestão pelo operador, conectados tanto à rede básica quanto à rede de distribuição. Essa abordagem permite representar com maior precisão a demanda que de fato exige o acionamento de usinas despacháveis, como hidrelétricas, termelétricas e outras fontes controláveis.

**Figura 1 Metodologia simplificada de utilização dos parâmetros para cálculo da carga líquida**



Fonte: Elaboração EPE

A carga líquida pode ser avaliada em diferentes resoluções espaciais e temporais. Considerando a disponibilidade dos dados necessários e as especificidades dos modelos utilizados, atualmente a metodologia é construída com resolução horária e para cada subsistema<sup>3</sup> do SIN. Nas seções a seguir serão detalhados os dados de entrada e a metodologia de construção dos cenários de carga líquida horária para o SIN.

A utilização da metodologia de carga líquida representa um avanço para o dimensionamento da geração controlável, especialmente em sistemas com forte participação de geração renovável não controlável, como as fontes eólica e solar, contribuindo para diagnósticos mais robustos dos requisitos sistêmicos de potência e flexibilidade operativa.

<sup>1</sup> Recursos despacháveis são aqueles que podem ter sua capacidade de geração elevada ou diminuída conforme comandos de despacho do operador. Em uma interpretação mais ampla, utiliza-se esse termo para ativos de geração de maior escala de fontes convencionais, como termelétricas e hidrelétricas de maior porte (acima de 50 MW de capacidade instalada).

<sup>2</sup> Apesar de não ser a abordagem adotada na metodologia a ser apresentada em virtude dos modelos utilizados para o planejamento, as parcelas inflexíveis ou de geração compulsória dos recursos despacháveis também podem ser subtraídas para construção da carga líquida, nesse caso, a carga a ser atendida apenas pelos recursos despacháveis flexíveis.

<sup>3</sup> Conforme adotado pela metodologia do PDE (3 subsistemas fictícios, 11 subsistemas não fictícios, sendo 7 com carga), ao invés dos tradicionais 4 utilizados no Programa Mensal da Operação (PMO) pelo ONS e na formação de preços pela CCEE.

## 2.1 Dados de entrada

A construção da carga líquida horária baseia-se em um conjunto de informações que combinam dados horários de projeção da carga global e de expectativa de geração eólica, fotovoltaica centralizada, PCH, biomassa (PCTs) e MMDG.

Os **dados horários de projeção da carga global** são elaborados para o horizonte de simulação do PDE (10 anos do estudo e 5 anos de pós horizonte, totalizando 15 anos) conforme metodologia descrita no documento NT/EPE/DEA-005/2020<sup>4</sup>, com aprimoramentos que buscam maior aderência às características reais de operação do SIN. Esses dados retratam a expectativa horária da carga global futura, com preservação da média mensal e carga instantânea máxima mensal consideradas na metodologia tradicional de projeção de carga, descrita no documento NT/EPE/DEA-003/2019<sup>5</sup>. Os dados de carga global horária dos subsistemas Acre/Rondônia, Manaus/Boa Vista/Roraima, são estimados, com o devido abatimento, a partir dos dados projetados para os subsistemas Sudeste/Centro-Oeste e Norte. Além disso, para a projeção de carga da ANDE (Paraguai), a ser atendida pela Itaipu Binacional, é considerado o perfil de carga do subsistema Sudeste/Centro-Oeste, com a manutenção das considerações de carga média e instantânea máxima adotadas para a metodologia tradicional de projeção da carga mensal.

As **expectativas de geração horária eólica e fotovoltaica centralizada** são elaboradas por meio de simulações de longo prazo, conforme descrito no documento NT/EPE/DEE/011/2021-R1<sup>6</sup>. Para esses dados, além dos perfis horários dos dias de cada mês, são considerados diferentes cenários de variabilidade anual, baseado em dados históricos. Por fim, os valores horários de fator de capacidade destas tecnologias são normalizados em relação à média mensal (em p.u.), sendo posteriormente reescalados pela projeção mensal de geração para garantir consistência com os demais modelos que operam em granularidades temporais menos detalhadas que a mensal.

A **geração horária de usinas não despacháveis** (que não são simuladas no sistema), como pequenas hidrelétricas (CGH/PCH) e usinas de biomassa (PCTs), é assumida como constante em todas as horas do mês, utilizando a média mensal projetada como base única para o cálculo. Trata-se de uma simplificação, em função de que historicamente a geração dessas usinas possui fatores de contribuição nos patamares próximos à 1, o que significa que a contribuição em todos os patamares é próxima da média mensal de geração considerada para o horizonte. Cabe ressaltar que

<sup>4</sup> Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-476/NT%20Metodologia%20Proje%C3%A7%C3%A3o%20Carga%20Hor%C3%A1ria\\_EPE-NT-EPE-DEA-005-2020.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-476/NT%20Metodologia%20Proje%C3%A7%C3%A3o%20Carga%20Hor%C3%A1ria_EPE-NT-EPE-DEA-005-2020.pdf).

<sup>5</sup> Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-374/NT%20Metodologia\\_Novo%20Modelo%20de%20Eletricidade%20\(MDE\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-374/NT%20Metodologia_Novo%20Modelo%20de%20Eletricidade%20(MDE).pdf)

<sup>6</sup> Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-593/Dados%20de%20entrada%20para%20modelos\\_.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-593/Dados%20de%20entrada%20para%20modelos_.pdf).

essa consideração é diferente das fontes fotovoltaica e eólica, que possuem geração mais correlacionada com a variação intradiária dos recursos primários.

A **expectativa horária de micro e mini geração distribuída** (MMGD), em sua absoluta maioria fotovoltaica, segue as seguintes considerações: para a MMGD eólica, termelétrica ou hidrelétrica é considerada a média mensal para a geração de todas as horas (por simplificação, em virtude do baixo montante); para a MMGD fotovoltaica são considerados os perfis horários (em p.u. da média) obtidos a partir de dados simulados, conforme descrito no documento IT-EPE-DEA-SEE-001-2021<sup>7</sup>, multiplicados pelas médias mensais de MMGD fotovoltaica projetadas pelo modelo 4MD<sup>8</sup>, garantindo a representação adequada da variação intradiária típica da geração solar distribuída.

Embora a implementação atual utilize séries históricas de irradiância e vento para construção dos cenários horários de geração renovável, a metodologia proposta foi estruturada para acomodar, inclusive, séries alternativas derivadas de modelos climáticos ou de reanálises ajustadas a diferentes cenários de mudança do clima. Essa possibilidade abre caminho para que, em estudos futuros, sejam avaliadas hipóteses de alteração da disponibilidade média dos recursos e da frequência de eventos críticos, permitindo testar a robustez do sistema e das soluções de expansão frente a diferentes condições climáticas.

## 2.2 Construção das distribuições de carga líquida

Em posse dos dados descritos no item 2.1, a etapa seguinte consiste na combinação de cenários e construção das distribuições de carga líquida coincidente para o SIN e subsistemas considerados.

---

O primeiro passo é organizar os dados disponíveis e preservar as coincidências horárias entre as séries simuladas de geração eólica, solar fotovoltaica centralizada e MMGD fotovoltaica do intervalo de dados trabalhados.

---

A metodologia permite a utilização de dados históricos de irradiância e vento ou séries sintéticas associadas a projeções climáticas. Por exemplo, ao utilizar dados que compõem o período entre janeiro de 2006 e dezembro de 2017, esse período fornece, para cada mês típico do ano, entre 336 (fevereiros) e 372 (meses com 31 dias) dias simulados, com perfis horários completos de geração<sup>9</sup>. Ou seja, para um mês com 31 dias, são obtidas até 8.928 (meses com 31 dias) combinações horárias

---

<sup>7</sup> Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-573/IT-EPE-DEA-SEE-001-2021%20-%20Metodologia%20para%20cria%C3%A7%C3%A3o%20de%20s%C3%A9ries%20hor%C3%A1rias%20de%20gera%C3%A7%C3%A3o%20distribu%C3%ADa%20fotovoltaica%20por%20subsistema.pdf>.

<sup>8</sup> Disponível em: <https://github.com/EPE-GOV-BR/epe4md>.

<sup>9</sup> Adota-se a premissa que de geração horária coincidente pode ocorrer naquela hora típica em qualquer dia do mês. Por exemplo, a geração coincidente da hora 1 do dia 1 do mês de janeiro pode ocorrer também em qualquer outro dia do mês de janeiro no mesmo horário.

distintas (24 horas  $\times$  31 dias  $\times$  12 anos) de geração renovável. Esses cenários, em p.u. da média de geração, são multiplicados pelas respectivas médias mensais consideradas tradicionalmente nos estudos de planejamento<sup>10</sup>, para se obter o valor nominal de geração horária para cada fonte, cenário e período do horizonte de simulação.

O segundo passo é combinar os cenários horários coincidentes de geração variável com a carga global horária e com a geração de pequenas usinas consideradas com modulação flat para obtenção dos cenários de carga líquida para cada período e subsistema, conforme a seguinte fórmula:

$$\begin{aligned} \text{Carga líquida}_{s,p,h,x,y} &= \text{Carga global}_{s,p,h,x} - \text{Ger}_{EOLs,p,h,y} - \text{Ger}_{UFV}_{s,p,h,y} - \text{Ger}_{MMGDfv}_{s,p,h,y} \\ &\quad - \text{Ger}_{MMGDoutras}_{s,p} - \text{Ger}_{PCH}_{s,p} - \text{Ger}_{BIO}_{s,p} \end{aligned}$$

Onde:

- $\text{Carga líquida}_{s,p,h,x,y}$  é o cenário de carga líquida obtido para o subsistema  $s$  para o período  $p$  do horizonte de simulação<sup>11</sup>, para hora típica diária  $h$  (da hora 1h à hora 24h), do cenário de carga global  $x$  (a depender do número de dias do mês em questão, do dia 1º ao dia 28, do dia 1º ao dia 30 ou do dia 1º ao dia 31) e para o cenário de geração renovável variável  $y$  (conforme o número de dias do mês em questão, do cenário 1 ao cenário 336, do cenário 1 ao cenário 360 ou do cenário 1 ao cenário 372). Para cada mês do horizonte de estudo, formam-se distribuições de 225.792 a 276.768 cenários, a depender do número de dias do mês;
- $\text{Carga global}_{s,p,h,x}$  é o cenário de carga global para o subsistema  $s$ , para o período  $p$ , para hora típica diária  $h$  e cenário  $x$ ;
- $\text{Ger}_{EOLs,p,h,y}$  é o cenário de geração eólica para o subsistema  $s$ , para o período  $p$ , para hora típica diária  $h$  e cenário  $y$ ;
- $\text{Ger}_{UFV}_{s,p,h,y}$  é o cenário de geração fotovoltaica centralizada para o subsistema  $s$ , para o período  $p$ , para hora típica diária  $h$  e cenário  $y$ ;
- $\text{Ger}_{MMGDfv}_{s,p,h,y}$  é o cenário de micro e minigeração distribuída fotovoltaica para o subsistema  $s$ , para o período  $p$ , para hora típica diária  $h$  e cenário  $y$ ;
- $\text{Ger}_{MMGDoutras}_{s,p}$  é o cenário de micro e minigeração distribuída de outras fontes para o subsistema  $s$  e para o período  $p$ . Essa parcela é considerada *flat* (uniforme) entre as horas do período  $p$ , com valor nominal igual a média considerada na modelagem de referência;
- $\text{Ger}_{PCH}_{s,p}$  é o cenário de geração de pequenas centrais hidrelétricas para o subsistema  $s$  e para o período  $p$ . Essa parcela é considerada *flat* (uniforme) entre as horas do período  $p$ , com valor nominal igual a média considerada na modelagem de referência;

<sup>10</sup> Informação disponível no arquivo sistema.dat do caso base Newave.

<sup>11</sup> No caso típico do PDE, do período 1 ao 180, representando cada um dos 12 meses de uma simulação de 15 anos.

- $-Ger_{BIO_{s,p}}$  é o cenário de geração de pequenas termelétricas, especialmente biomassa, de custo variável unitário (CVU) nulo para o subsistema  $s$  e para o período  $p$ . Essa parcela é considerada *flat* (uniforme) entre as horas do período  $p$ , com valor nominal igual a média considerada na modelagem de referência.

Por fim, obtêm-se os cenários de carga líquida para o SIN, somando, de forma coincidente, os resultados de carga líquida por subsistema para cada cenário, conforme a fórmula a seguir:

$$Carga\ líquida\ SIN_{p,h,x,y} = \sum_{i=1}^S Carga\ líquida_{s,p,h,x,y}$$

Onde:

- $Carga\ líquida\ SIN_{p,h,x,y}$  é o cenário de carga líquida para o SIN resultante da soma da parcela de cada subsistema de forma coincidente, para cada cenário<sup>12</sup>.

Um diagrama da representação probabilística das fontes renováveis e criação da projeção horária e patamarização da carga líquida é apresentado na Figura 2, na qual é apresentada a criação dos cenários de geração renovável para cada hora de cada dia típico. A partir da convolução destes dados, são consideradas todas as horas de um ano. Deste modo, os dados de carga líquida guardam a sincronidade de carga e geração renovável variável (eólica e solar).

Pode-se tomar como exemplo o mês de janeiro de 2025, que possui 31 dias típicos de carga global. As 24 horas de carga global do dia 1º de janeiro de 2025 são combinadas com as 24 horas de geração renovável do dia 1º de janeiro de 2006. As mesmas 24 horas de carga global do dia 1º de janeiro de 2025 são combinadas com as 24 horas de geração renovável do dia 2 de janeiro de 2006, e esse processo se repete para os demais dias ao longo de janeiro de 2006. Finalizado todos os dias de janeiro de 2006, repete-se o mesmo procedimento para o mês de janeiro de 2007 e assim sucessivamente até janeiro de 2017 (último ano do cenário de geração renovável). Neste exemplo, as 24 horas de carga global de 1º de janeiro de 2025 gerou uma amostra de: 1 (dia) x 24 (horas) x 31 (dias) x 12 (anos) = 8.928 valores de carga líquida. Ao realizar o mesmo procedimento para todos os dias de janeiro de 2025 será produzida uma amostra de: 31 (dias) x 24 (horas) x 31 (dias) x 12 (anos) = 276.768 valores de carga líquida.

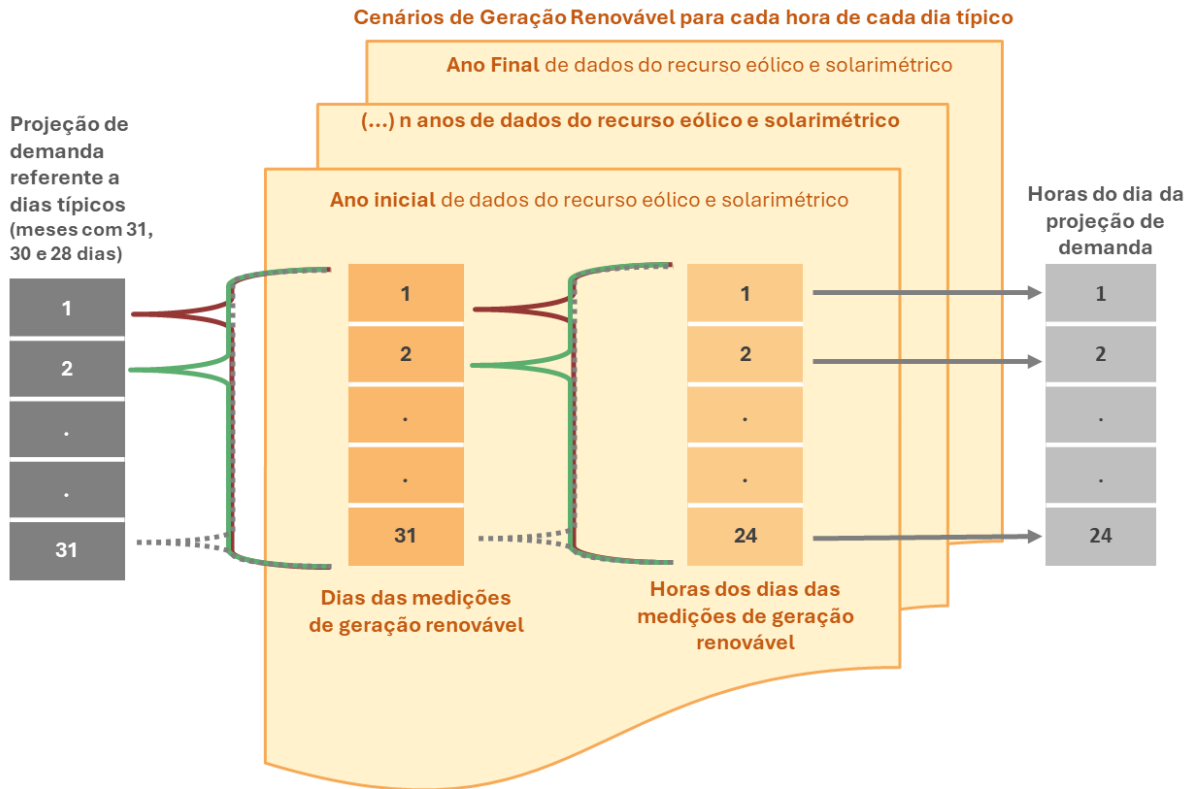
---

No contexto de mudanças climáticas, essa estrutura de cenarização permite, adicionalmente, substituir ou complementar as séries históricas por séries sintéticas associadas a projeções climáticas, preservando a lógica de convolução entre carga global e geração renovável. Isso viabiliza a avaliação de distribuições de carga líquida compatíveis com cenários futuros de maior frequência de ondas de calor, alterações de regimes de vento ou mudanças na sazonalidade, ampliando a capacidade de o planejamento antecipar situações de estresse sistêmico.

---

<sup>12</sup> Para exemplificação, no PDE, para cada mês do horizonte de estudo, formam-se distribuições de 225.792 a 259.200 cenários, a depender do número de dias do mês.

**Figura 2 Diagrama resumido da convolução de dados para elaboração de cenários de carga líquida**



Fonte: Elaboração EPE

As distribuições de cenários horários coincidentes de carga líquida por subsistema e para o SIN resultantes do procedimento descrito são importantes para diversas aplicações no planejamento da operação e da expansão. Algumas dessas possibilidades e seus respectivos métodos são descritos na seção seguinte.

## 2.3 Principais usos

As distribuições horárias de carga líquida permitem não apenas substituir alguns usos tradicionais da carga global nos modelos de planejamento, como também abrir novas frentes de análise mais aderentes à realidade atual do SIN, marcada pela crescente penetração de fontes renováveis variáveis.

A interação de informações eólicas e solarimétricas, ainda que fundamentadas em dados históricos, com a projeção de demanda possibilita a identificação de pontos críticos de carga líquida. Inclusive, essa abordagem traz aderência dos estudos ao contexto de mudanças climáticas, uma vez que, pode captar a incerteza da disponibilidade do recurso primário e do comportamento da demanda no

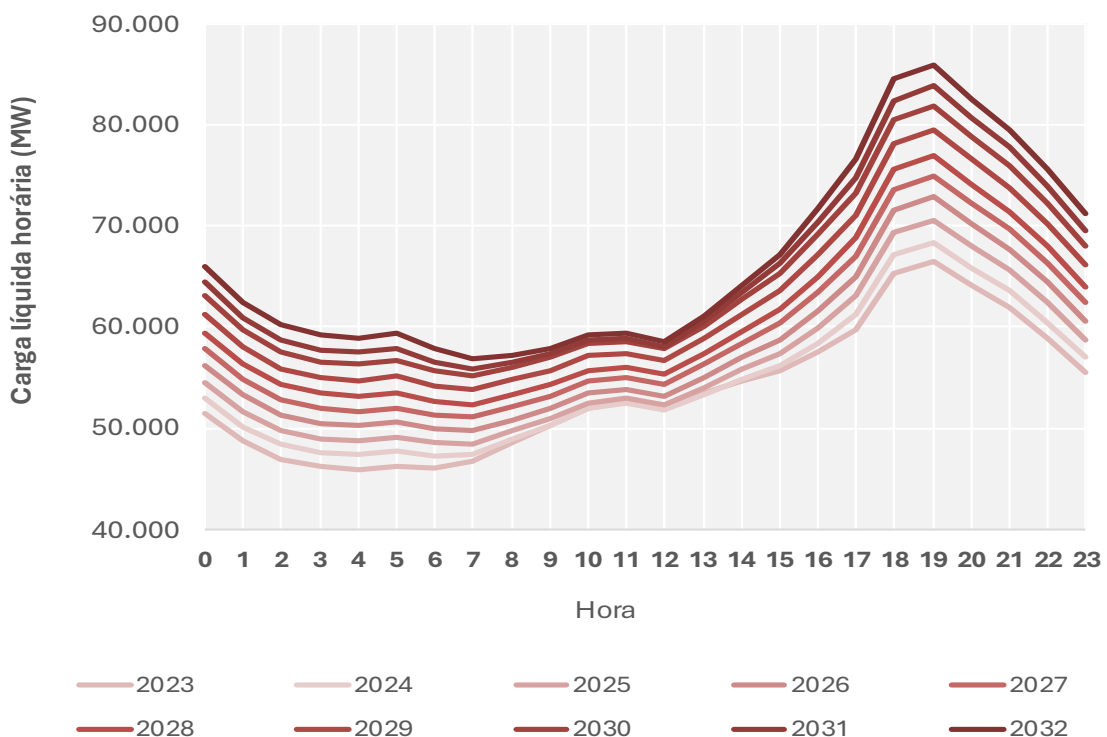
futuro. Nessa perspectiva, a metodologia de carga líquida é um instrumento capaz de mensurar o desafio da alocação dos recursos despacháveis em condições extremas de operação do sistema.

### 1.1.1. Análise de cenários e perfis futuros de carga líquida

As distribuições de carga líquida permitem uma avaliação probabilística detalhada da evolução dos perfis horários de demanda líquida, tanto em nível de subsistema quanto para o SIN como um todo, inclusive com a aplicação e diferentes métricas. Considerando o tamanho da base de dados gerada, a elaboração de curvas de permanências, com a amostragem de percentis estatísticos dessas distribuições (como P5, P50, P95), pode facilitar esse tipo de análise para todos os períodos do horizonte de planejamento.

Essas avaliações permitem identificar a evolução do perfil típico da carga líquida horária no horizonte de planejamento, como o aumento da inclinação das rampas de demanda, causado pelo aumento expressivo da participação da geração fotovoltaica no SIN e o deslocamento dos horários de pico. Por exemplo, mesmo que a carga global acentue seu perfil de picos diurnos, a incidência da geração fotovoltaica tende a deslocar os horários de maior carga líquida para o período noturno. A Figura 3 ilustra esse efeito ao mostrar a carga líquida horária média anual do SIN em p.u., destacando o impacto da energia solar sobre o perfil da carga líquida. Esse tipo de avaliação e a análise da probabilidade da ocorrência de cargas líquidas elevadas diurnas ou noturnas podem ser realizadas com a amostragem dos percentis das distribuições de carga líquida.

**Figura 3 Carga líquida horária média anual do SIN em PU**



Fonte: NT EPE/DEE/076/2024-R0.

Além disso, quando associadas a séries de geração renovável que incorporem possíveis efeitos das mudanças climáticas, essas análises probabilísticas passam a fornecer não apenas uma visão da evolução da demanda líquida sob a ótica da matriz projetada, mas também uma leitura mais abrangente da exposição do sistema a cenários climáticos adversos. Isso permite identificar, por exemplo, períodos do ano e faixas horárias em que a combinação de altas temperaturas, alterações de padrões de vento e elevada penetração fotovoltaica pode intensificar a ocorrência de picos de carga líquida ou modificar o horário de sua ocorrência.

---

A abordagem proposta permite maior precisão na definição dos requisitos de suprimento da geração despachável, auxiliando o planejamento da expansão e o dimensionamento de recursos com maior sensibilidade às variações horárias da demanda.

---

### 1.1.2. Análise de cenários de rampas de carga (Flexibilidade)

As distribuições horárias de carga líquida também viabilizam a construção de cenários de rampas líquidas, onde é possível analisar os requisitos de flexibilidade do sistema. A partir da cronologia horária preservada nas distribuições, é possível subtrair os valores de horários em sequência para obtenção dos cenários de rampas líquidas positivas e negativas horárias e multi-horárias.

---

Assim como os cenários de carga líquida, esses cenários de rampas líquidas são importantes para avaliar os requisitos de flexibilidade que devem ser supridos pelos recursos despacháveis do sistema, sejam de geração ou de demanda (resposta da demanda, por exemplo).

---

Em novembro de 2023, a EPE disponibilizou um estudo mais abrangente de flexibilidade com dados de rampas gerados a partir da metodologia de cenários de carga líquida. Trata-se da nota técnica EPE/DEE/076/2024-R0<sup>13</sup>, onde, para os requisitos de flexibilidade, foram avaliadas diferentes características das distribuições de rampas simuladas do sistema. Como exemplo, a Figura 4 ilustra a comparação da distribuição acumulada das rampas de carga bruta e líquida para os meses de janeiro, julho e outubro de 2032. Nessas curvas, os marcadores de P95<sup>14</sup> e P99 indicam os valores de rampa horária superados em apenas 5% e 1% dos cenários, respectivamente, fornecendo insumos quantitativos para dimensionamento da capacidade de resposta rápida do sistema. Percebe-se que o mês de julho é o que apresenta as maiores intensidades de rampas, vistas na curva de carga líquida. Neste mês, a curva de distribuição das rampas de carga líquida fica igual ou acima à

---

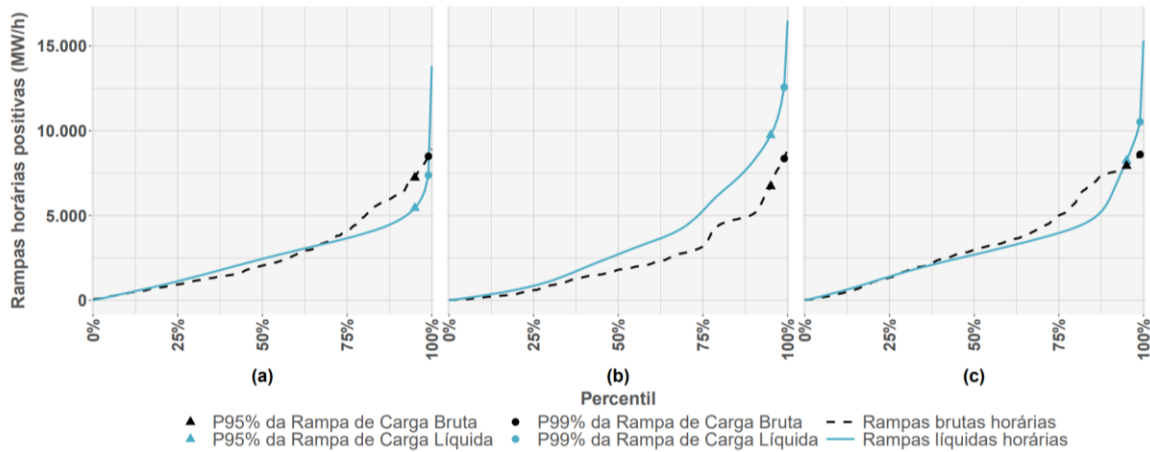
<sup>13</sup> Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-775/NT-EPE-DEE-076-2023\\_Flexibilidade.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-775/NT-EPE-DEE-076-2023_Flexibilidade.pdf)

<sup>14</sup> O P95 (95º percentil) é uma medida estatística que indica o valor abaixo do qual 95% dos dados de um conjunto se encontram, enquanto os 5% restantes o superam. Essa métrica está diretamente associada ao nível de risco de 5%, que representa a probabilidade de ocorrência de valores extremos acima do limite definido pelo P95.

de carga bruta em todos os momentos, o que indica que a geração das fontes renováveis tem um efeito de aumentar a intensidade das rampas.

A partir da carga líquida, podem ser realizadas análises mais detalhadas e que são apresentadas na Nota Técnica acima mencionada.

**Figura 4 Permanência de rampas horárias positivas (a) janeiro, (b) julho e (c) outubro de 2022.**



Fonte: NT EPE/DEE/076/2024-R0.

Mesmo com a abundante oferta de flexibilidade oriunda das grandes usinas hidrelétricas, a maior participação das fontes renováveis variáveis no sistema brasileiro torna indispensável o monitoramento contínuo dos requisitos de flexibilidade, que pode ser viabilizado com o aprimoramento e uso das distribuições de cenários de carga líquida.

Destaca-se ainda que a possibilidade de construir cenários de rampas líquidas a partir de séries associadas a diferentes cenários climáticos futuros amplia o escopo dessas análises, permitindo avaliar como a intensificação de eventos extremos, como ondas de calor ou variações repentinas de irradiância e vento, pode afetar a magnitude e a frequência das rampas a serem atendidas pelos recursos despacháveis. Com isso, a metodologia de carga líquida se consolida como um instrumento relevante para a identificação de necessidades adicionais de flexibilidade em um ambiente de maior incerteza climática.

### 1.1.3. Reconstrução da representação por patamares: Uso NEWAVE

#### Patamarização convencional (PDE até o PDE 2031 e PMO)

O Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro, caracterizado por grandes hidrelétricas em cascata e uma extensa rede de transmissão, utiliza modelos de otimização para o planejamento da operação e expansão do setor elétrico. Historicamente, o foco tem sido na representação das incertezas das hidrelétricas, enquanto a carga global e as pequenas usinas são tratadas de forma determinística. O modelo atual do Planejamento Mensal de Operação (PMO) representa a demanda através de três patamares de carga (Leve, Média e Pesada), com agrupamentos baseados nas distribuições históricas mensais.

Para pequenas usinas, a metodologia "hora-bloco" é empregada, onde as horas típicas de carga são classificadas e utilizadas para avaliar a geração horária. Profundidades em p.u. são calculadas com base nas médias de geração horária agrupadas por patamar. O modelo utilizado pelo PDE também inclui um quarto patamar, destinado a melhor representar a carga de ponta, com profundidades específicas para diferentes fontes de energia.

---

Com o aumento da participação das fontes renováveis, como eólica e fotovoltaica, surgem desafios nas simplificações existentes, que podem comprometer a precisão do modelo. Diferenças significativas na geração dessas fontes dentro do mesmo patamar podem levar a resultados imprecisos na carga líquida processada. Portanto, é proposta uma abordagem mais granular, com dados horários projetados, para uma avaliação mais precisa da carga líquida antes da inclusão no modelo, buscando assim uma representação mais realista das contribuições renováveis no sistema.

---

#### Patamarização pela carga líquida

A aplicação da metodologia de carga líquida marca uma mudança conceitual: o objeto a ser patamarizado deixa de ser uma distribuição histórica de carga global e passa a ser uma distribuição de projeção de carga líquida horária. Ou seja, conhecida a configuração do sistema, deixa de ser necessária a etapa de patamarização da geração das pequenas usinas conforme a classificação "hora-bloco" baseada nas distribuições de carga global.

Dessa forma, a patamarização da distribuição de projeção da carga líquida horária aprimora a classificação dos patamares em relação à intensidade (profundidade) nos modelos de otimização. A operacionalização da patamarização da distribuição de carga líquida é semelhante à patamarização da carga global na metodologia convencional. Para cada período do horizonte, ordenam-se os cenários horários de carga líquida em ordem crescente de intensidade. Em seguida, realiza-se os agrupamentos para patamarização desses cenários.

**Patamarização com referência às durações do Planejamento Mensal de Operação (PMO)**

**de referência:** Uma forma mais simples de realizar esses agrupamentos é considerando as durações já definidas pela metodologia convencional.

**Patamarização com novos agrupamentos (kmeans):** Outra forma, mais elaborada, é proceder uma nova análise de agrupamento, usualmente com algum algoritmo de clusterização, como o *kmeans*. Nessa forma, define-se o número de agrupamentos desejados (três, sendo eles: leve, média e pesada) e aplica-se o algoritmo de clusterização. Assim serão calculadas novas durações (probabilidades) para cada agrupamento, mais adequadas para representação do perfil da distribuição da carga líquida, conforme mostrado na Figura 5. Atualmente, essa é a abordagem para cálculo de durações adotada na metodologia do PDE.

---

Diferente do que ocorre na patamarização convencional, a utilização das distribuições mensais de carga líquida horária permite uma análise mais detalhada. Com essa abordagem, é possível identificar o valor de carga coincidente de cada subsistema no instante em que ocorre a carga líquida máxima do SIN. Esse valor é utilizado no cálculo da profundidade do patamar de ponta de cada subsistema. Essa característica permite uma avaliação no Balanço de Potência<sup>15</sup> da máxima carga líquida horária projetada para o mês em questão.

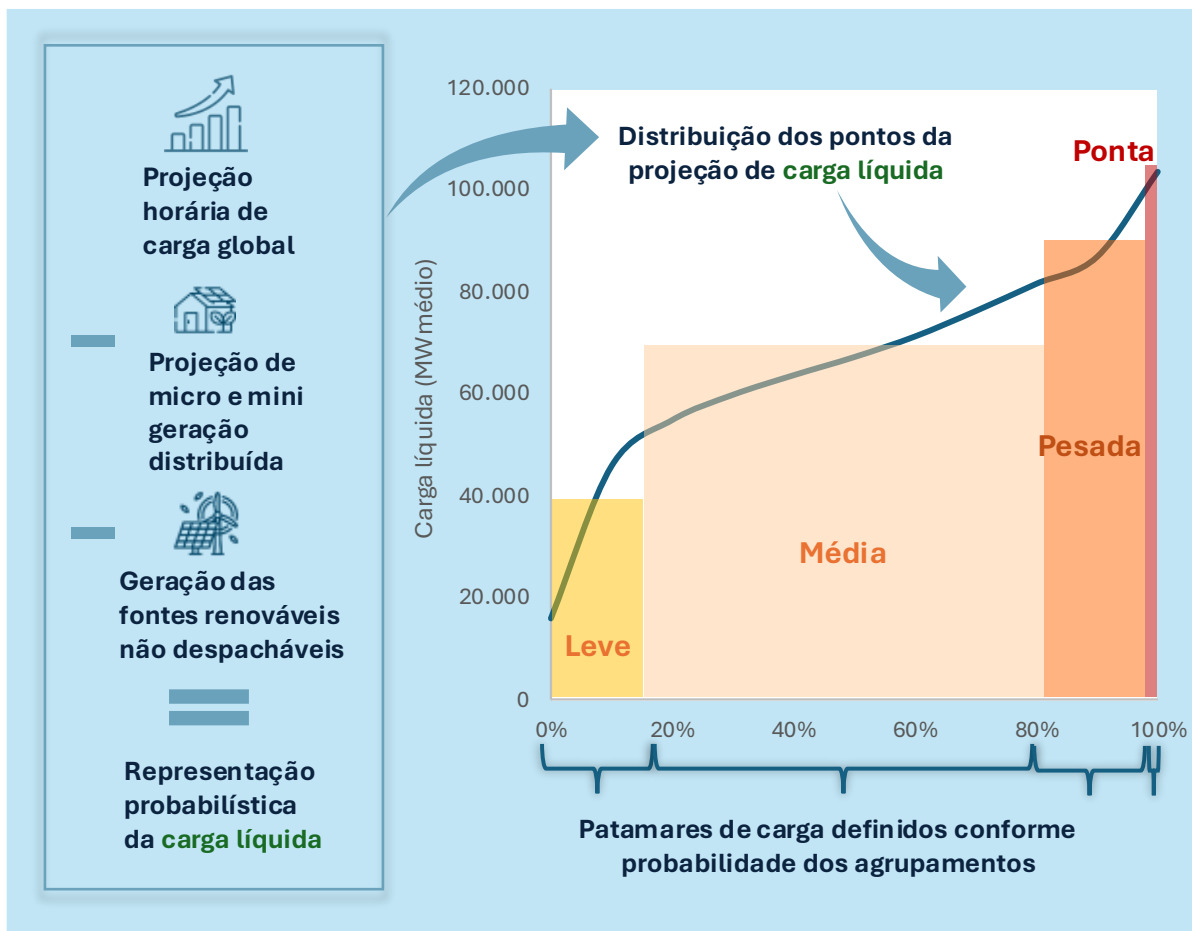
---

As profundidades em p.u., são calculadas dividindo o valor obtido no subsistema para a métrica estatística optada, máxima, percentil ou CVaR, pela média mensal de carga líquida do subsistema. Apesar da implementação da opção de outra métrica estatística para os usuários da metodologia, atualmente, para o PDE, adota-se a carga líquida máxima como parâmetro para o patamar de ponta.

---

<sup>15</sup> O Balanço de Potência é uma ferramenta disponibilizada pela EPE que tem como objetivo avaliar os montantes de potência necessários nos momentos em que o sistema apresenta demanda máxima instantânea, com o objetivo de verificar as condições de seu atendimento. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/ferramenta-de-balanco-de-potencia>

**Figura 5 Patamarização dos dados de carga líquida conforme probabilidade dos agrupamentos de pontos semelhantes através da metodologia kmeans**



Fonte: Elaboração EPE

Um desafio relevante dessa nova abordagem é a ocorrência de valores negativos de carga líquida, especialmente no subsistema Nordeste, onde a alta penetração de eólica e solar já resulta em excedentes frequentes de geração em determinados períodos do dia. Como a versão atual do modelo Newave não permite valores negativos como entrada de dados de carga, torna-se necessário alguns ajustes para a correta representação da carga líquida nesses casos.

A solução adotada envolve as seguintes etapas:

1. Separa-se a distribuição de valores negativos de carga líquida da distribuição de valores positivos, com a consideração de valores nulos para os valores positivos na distribuição de valores negativos e vice-versa para a distribuição de valores positivos.
2. Em seguida, inverte-se o sinal dos valores observados na distribuição negativa. Após obter as duas distribuições separadas, sem valores negativos, soma-se um valor elevado (atualmente adota-se 15 GW), de forma uniforme (flat), em ambas as distribuições.

3. Por fim, patamariza-se as duas distribuições para representação da que era originalmente apenas a parte positiva na seção de carga dos arquivos sistema.dat e patamar.dat, enquanto a que era originalmente negativa é representada no bloco de geração de usinas não simuladas, com um bloco de nome "excedente da carga líquida".

---

Essa abordagem garante que o modelo irá interpretar corretamente os períodos de carga líquida negativa, refletindo adequadamente os momentos de **superávit renovável** e auxiliando na definição da política operativa das tecnologias despacháveis.

---

A patamarização da carga líquida horária reflete diretamente sobre diversos modelos de planejamento utilizados pela EPE, como o MDI e a ferramenta de Balanço de Ponta. Ao refletir com maior realismo a dinâmica intradiária da carga líquida, a metodologia oferece subsídios mais robustos para decisões de expansão e operação, contribuindo para um planejamento energético mais aderente às transformações em curso no setor elétrico brasileiro. Para detalhes adicionais, recomenda-se a consulta aos manuais de utilização dos respectivos modelos.

A adoção da carga líquida como base para a patamarização também abre espaço para que, em etapas futuras, sejam testadas configurações de patamares associadas a cenários climáticos alternativos, em que a frequência relativa de horas críticas ou de excedentes renováveis possa se alterar em função de novos padrões de disponibilidade dos recursos. Essa flexibilidade metodológica é fundamental para que os modelos de médio prazo consigam refletir, de forma consistente, as incertezas adicionais trazidas pelas mudanças climáticas sobre a operação do SIN.

## 2. Aprimoramentos futuros

Desde que passou a ser utilizada, a metodologia de cenarização de carga líquida horária vem sendo aperfeiçoada, refletindo a evolução das necessidades analíticas do planejamento da expansão da geração. No entanto, à medida que se amplia a complexidade da modelagem — com mais cenários, granularidade espacial e temporal —, surgem oportunidades relevantes de desenvolvimento.

A geração das distribuições horárias de carga líquida envolve a combinação de um volume elevado de cenários de carga global e geração renovável. Esse processo, embora robusto, apresenta elevado consumo de memória e capacidade computacional. Para viabilizar um eventual aumento de cenários renováveis combinados, além de maior detalhamento espacial e temporal, é importante que sejam avaliadas formas de reduzir o consumo de memória sem prejudicar a qualidade da cenarização. Dessa forma, avalia-se o desenvolvimento de técnicas de amostragem estatística que mantenham a representatividade da distribuição original, mas com menor custo computacional.

Com a efficientização do algoritmo, abre-se espaço para expandir a aplicação da carga líquida em outros processos estratégicos do planejamento da geração. Por exemplo, seria interessante avaliar

a internalização do algoritmo de carga líquida no MDI, visando, a cada rodada de convergência, gerar os dados de entrada para o modelo de operação em carga líquida.

Outro exemplo seria avaliar o uso da carga líquida no processo de cálculo, recálculo e revisão de garantias físicas de energia de usinas despacháveis. Caso o processo de geração de carga líquida seja mais eficiente, pode ser avaliado seu uso durante a convergência da carga crítica do sistema. Esse uso, em casos estáticos, possibilitaria até mesmo a consideração de carga líquida nas avaliações técnicas de necessidade de contratação de energia de reserva.

Como etapas a serem aprimoradas, uma metodologia para projeção de carga global específica para os subsistemas Acre/Rondônia, Manaus/Boa Vista/Roraima e Itaipu está sendo desenvolvida para melhor representação do sistema elétrico brasileiro. Esses aprimoramentos visam garantir maior aderência à realidade do perfil de demanda desses sistemas, hoje representados com aproximações derivadas de subsistemas vizinhos.

A internalização crescente das dimensões climáticas na metodologia também é coerente com a agenda de planejamento de longo prazo conduzida pela EPE, em particular com os estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia e do Plano Nacional de Energia. Ao possibilitar que os mesmos conceitos de carga líquida e de flexibilidade sejam avaliados sob diferentes hipóteses climáticas, a abordagem favorece uma visão integrada entre segurança de suprimento, transição energética e adaptação às mudanças climáticas, mantendo o planejamento atento às transformações em curso nos regimes hidrológicos e nas condições meteorológicas que afetam a geração renovável.

Por fim, considerando outras instituições além da EPE, a metodologia da carga líquida horária poderia ter sua aplicação avaliada nos estudos e processos relacionados à operação e à formação de preços do mercado de curto prazo brasileiro. Eventualmente, seu uso pode fornecer uma melhor função de custo futuro para os modelos seguintes, mais detalhados, da cadeia de simulação.

---

Com a publicação desta nota técnica, espera-se que novos aprimoramentos no tema da carga líquida surjam a partir das interações com os agentes do setor elétrico. A troca de conhecimentos, percepções e sugestões poderá gerar insights valiosos, levando à identificação de novas abordagens e soluções que otimizem a representação da carga líquida. Essa colaboração é essencial para que o sistema se adapte às realidades em constante mudança do setor de energia, garantindo maior eficiência e robustez ao SIN.

---

### 3. Considerações finais

Com o avanço das fontes não despacháveis no Sistema Interligado Nacional (SIN), especialmente no contexto da crescente participação de fontes renováveis intermitentes e da expansão em larga escala da geração distribuída, torna-se crucial a aplicação da metodologia de carga líquida nos processos de planejamento e expansão conduzidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), mais aderentes à realidade operativa e às transformações estruturais do setor. Essas transformações incluem, de forma destacada, os efeitos já observados e projetados das mudanças climáticas sobre os perfis de carga e de geração renovável, demandando que os instrumentos de planejamento sejam capazes de avaliar não apenas o desempenho médio do sistema, mas também sua capacidade de resposta diante de condições extremas ou não usuais.

A metodologia descrita neste documento se apresenta como uma abordagem robusta, sustentada por princípios técnicos consistentes, consolidando-se como uma ferramenta estratégica para o planejamento energético. Sua adoção proporciona uma modelagem mais precisa da carga líquida, refletindo de maneira mais fiel às complexidades e dinâmicas do mercado de energia atual. Incluindo o incerto contexto de mudanças climáticas, que pode acentuar situações extremas na observadas na interação entre disponibilidade de recurso e demanda. Esse aprimoramento permite que as empresas do setor adotem um planejamento mais assertivo, contribuindo para a otimização dos recursos e a melhoria da eficiência operacional.

Além disso, a adoção desta metodologia pode fomentar a colaboração entre diferentes agentes do setor, possibilitando o compartilhamento de experiências e a identificação de melhores práticas. Espera-se que, a partir da sua implementação, surjam novos aprimoramentos e inovações que possam enriquecer ainda mais os estudos de planejamento. Essa evolução contínua não apenas fortalecerá a capacidade de resposta do sistema às demandas contemporâneas, mas também promoverá um ambiente mais sustentável, principalmente em um momento com cada vez maior introdução de fontes não controláveis, podendo ter sua aplicação avaliada nos estudos e processos relacionados à operação e à formação de preços do mercado de curto prazo brasileiro.

## 4. Glossário

**Capacidade:** relaciona-se à existência de recursos que promovam o atendimento instantâneo a todos os níveis da demanda previstos para o mercado, com grau de risco determinado pelos critérios de suprimento de potência. Utiliza-se a unidade megawatt (MW).

**Carga Global:** a carga bruta, ou carga global, é a quantidade total de energia consumida em um sistema elétrico. Ela inclui a geração de usinas supervisionadas e não supervisionadas, bem como a micro e minigeração distribuída. A carga global é essencial para avaliar a capacidade do sistema elétrico de fornecer energia quando necessário.

**Carga Líquida horária:** a carga líquida construída a partir de **dados horários** de carga bruta, deduzindo-se a geração não-controlável **horária**, respeitando-se a correlação temporal dos eventos.

**Carga Líquida:** a carga líquida é construída a partir da carga bruta, deduzindo-se a geração não-controlável, respeitando-se a correlação temporal dos eventos.

**Convulsão:** operação linear a partir de duas funções dadas, e que resulta em uma terceira função que é o somatório do produto entre duas funções, ao longo da região em que elas se sobrepõem. No caso da carga líquida existem as funções de projeção de carga global e a geração de renováveis não controláveis. A carga líquida será a combinação da subtração da carga global com a geração não controlável para cada um dos horários correspondentes.

**Fatores de Capacidade:** o fator de capacidade mede a eficiência operacional de uma usina de geração de energia, comparando a produção real com o potencial máximo teórico (se operasse 100% do tempo).

**Flexibilidade:** relaciona-se à existência de recursos que promovam o atendimento às variações de carga do sistema entre dois instantes de tempo. É um conceito amplo e pode abranger diversas escalas temporais como variações sazonais, mensais e sub-horárias. Neste trabalho, são considerados dados em escala horária. Utiliza-se a unidade megawatt por hora (MW/h).

**Kmeans:** metodologia utilizada para agrupamento de dados semelhantes em torno de um centroide. Esta metodologia de agrupamento particiona um conjunto de dados em  $k$  grupos, minimizando a soma das distâncias quadráticas entre os pontos e o centroide de cada grupo.

**Patamares de carga:** os patamares de carga são uma classificação do consumo de energia elétrica utilizada para simplificar a gestão e operação do sistema elétrico brasileiro. Os patamares de carga

podem ser entendidos como os níveis de demanda dentro de cada mês simulado. Atualmente o PDE utiliza quatro patamares de carga: ponta, pesada, média e leve.

**Por unidade (p. u.):** é uma forma de normalizar grandezas elétricas — como tensão, corrente, potência e impedância — dividindo cada uma delas por um valor de base previamente estabelecido.

**Recursos Despacháveis:** recursos despacháveis são aqueles que podem ter sua capacidade de geração elevada ou diminuída conforme comandos de despacho do operador. Em uma interpretação mais ampla, utiliza-se esse termo para ativos de geração de maior escala de fontes convencionais, como termelétricas e hidrelétricas

## 5. Referências Bibliográficas

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] (2020), EPE-DEA-NT-005/2020 – **Metodologia: Projeção de Curva de Carga Horária**. Nota Técnica. Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] (2021), EPE-DEA-NT-003/2019-r0 - **Metodologia: Projeção da demanda de eletricidade**. Nota Técnica. Rio de Janeiro. 2019. Disponível em: [Microsoft Word - NT Metodologia Novo Modelo de Eletricidade \(MDE\) VPublicação.docx](#) .

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] (2019), EPE-DEE-NT-037/2021-r0 - **Metodologia de Análise para o Atendimento à Demanda Máxima de Potência e Requisito de Capacidade**. Nota Técnica. Rio de Janeiro. 2021. Disponível em: [Consultas Públicas - Ministério de Minas e Energia \(mme.gov.br\)](#) .

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] (2018), EPE-DEE-NT-067/2018-r0 - **Flexibilidade e Capacidade: Conceitos para a incorporação de atributos ao planejamento**. Nota Técnica. Rio de Janeiro. 2018. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-316/NT\\_EPE\\_DEE-NT-067\\_2018-r0.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-316/NT_EPE_DEE-NT-067_2018-r0.pdf).

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] (2020), EPE/DEE/011/2021-R1 - **Dados de entrada para modelos elétricos e energéticos: metodologias e premissas**. Nota Técnica. Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: [Dados de entrada para modelos elétricos e energéticos: metodologias e premissas](#).

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] (2021), IT-EPE-DEA-SEE-001-2021 - **Dados de entrada para modelos elétricos e energéticos: metodologias e premissas**. Informe Técnico. Rio de Janeiro. 2021. Disponível em: [\(Microsoft Word - EPE-DEA-IT-XXX - GD Hor\341ria.docx\)](#).

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] (2023), EPE-DEE-NT-026/2023-R0 - **Caderno de Tecnologias de Geração 2023**. Nota Técnica. Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-745/Caderno%20de%20Tecnologias%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%202023.pdf>.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] (2023), EPE/DEE/076/2023-R0 - **Metodologia de Estimativa de Requisitos e Recursos de Flexibilidade no SIN**. Nota Técnica. Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: [Flexibilidade: Estimativa de requisitos e recursos](#).

Ministério de Minas e Energia - MME, Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2025). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>