

GRUPO DE ESTUDO GCR

Estratégia Ótima de Oferta do Consumidor no Mecanismo de Resposta da Demanda Estrutural e Equilíbrio de Mercado

**Gabriel Miguez Longhi, Bruno Fanzeres e Pedro Bittencourt e Silva
PUC-Rio - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro**

RESUMO

A partir da Resolução Normativa (REN) ANEEL nº 1040/2022, uma nova iniciativa para prover flexibilidade operativa ao Sistema Interligado Nacional (SIN) foi estabelecida com a criação do Programa Estrutural de Resposta da Demanda (RD). De maneira geral, a chamada RD pode ser entendida como a capacidade do consumidor em “responder” de forma voluntária a sinais e condições de mercado e do sistema, em geral com atuação e impacto no curto prazo. Com os recentes avanços da RD no Brasil, vemos que um mecanismo adequado de atuação dos consumidores tem grande potencial, mesmo em comparação com as melhores práticas internacionais. A fim de prover suporte às discussões de avaliação, evolução e implementação de mecanismos de RD no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB), neste trabalho será estudado de forma holística o Programa Estrutural de RD, estruturado em três vertentes: (i) apresentação do estado atual dos programas de RD no Brasil, desde o Programa Piloto da REN ANEEL nº 792/2017, destacando o potencial dos consumidores como recurso alternativo ao despacho termelétrico fora da ordem de mérito; (ii) o desenvolvimento de uma metodologia baseada em otimização bi-nível para caracterizar a oferta ótima dos consumidores, considerando o processo produtivo de um consumidor e a otimização dos recursos para a operação do sistema realizado pelo ONS; e (iii) a construção de um arcabouço para identificar pontos de equilíbrio do programa, utilizando o conceito de Equilíbrio de Nash, refletindo o comportamento racional dos agentes participantes. Por fim, como contribuição empírica deste trabalho, serão apresentados experimentos numéricos baseados em dados reais do SEB, considerando processos produtivos típicos de consumidores candidatos a participarem do Programa Estrutural de RD.

PALAVRAS-CHAVE

Resposta da demanda; Otimização bi-nível; Equilíbrio de Nash; Equilíbrio de mercado.

1.0 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, o Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) tem sido gerido por uma estrutura bipartite, onde a operação do sistema é administrada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) e a administração do mercado e precificação da energia é realizada pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Neste contexto, diversas iniciativas foram conduzidas por estas duas instituições, em conjunto com outros atores de relevância como Ministério de Minas e Energia (MME), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE), para aperfeiçoar a operação do SEB e induzir eficiência e modicidade tarifária ao consumidor final. Em particular, a partir da Resolução Normativa (REN) ANEEL nº 1040/2022, uma nova iniciativa nesta direção foi estabelecida com a criação do Programa Estrutural de Resposta da Demanda (RD), baseado no uso de oferta de redução de demanda de consumidores como recurso adicional para a operação do Sistema Interligado Nacional (SIN). Por um lado, sob uma ótica sistêmica, esta atuação permite ao ONS aprimorar a segurança da operação e a qualidade de fornecimento, alavancando tanto eficiência econômica quanto operacional, a partir de uma maior flexibilidade e otimização do uso dos recursos disponíveis para atendimento à carga elétrica. Por outro lado, sob a ótica do consumidor, a gestão adequada do seu consumo por energia em resposta aos sinais e condições de mercado permite potencial redução significativa dos custos com energia elétrica.

A fim de prover suporte às discussões de avaliação, evolução e implementação de mecanismos de RD no SEB, neste trabalho será estudado de forma holística o Programa Estrutural de RD. O enfoque será em três vertentes. Na primeira, será conduzida uma análise e percepção geral do estado atual dos programas de RD no Brasil. Examinaremos o ambiente regulatório, o desenho do mercado e os esforços recentes para aumentar o envolvimento dos consumidores nas iniciativas de RD. Em constante evolução desde o Programa Piloto, compreender este contexto é essencial para identificar as barreiras e oportunidades para um maior desenvolvimento do mecanismo.

A segunda vertente buscará desenvolver uma metodologia para caracterizar o processo decisório de oferta ótima de consumidores no ambiente do Programa Estrutural de RD. A metodologia será fundamentada em otimização bi-nível, considerando um desenho de mercado-operação similar ao contexto regulatório brasileiro atual [5]. O foco da metodologia será em maximizar os benefícios dos consumidores ao participar do mecanismo de RD, determinando os parâmetros ótimos da oferta semanal, considerando o custo de oportunidade de reduzir o consumo por energia na sua cadeia produtiva e o despacho da oferta sob a otimização da operação. Será considerado o programa de RD sem impacto ao preço da energia elétrica de curto prazo, como realizado atualmente, e um processo de especificação do ponto operativo para o dia seguinte, dado por uma representação simplificada do sistema, levando em consideração a ação do ONS na definição do despacho ou não da oferta de RD do consumidor.

De posse desta metodologia, a terceira vertente deste trabalho será desenvolver um arcabouço para identificar e avaliar pontos de equilíbrio do Programa Estrutural de RD a partir do conceito de Equilíbrio de Nash [6][9]. Este arcabouço permite emular a dinâmica de mercado, refletindo o comportamento racional de diversos consumidores, considerando a natureza e estrutura particular de cada um dos agentes participantes. Desta forma, reguladores e operadores de mercado e do sistema podem utilizar este arcabouço para inferir estados econômicos de equilíbrio do mecanismo, permitindo ajustes regulatórios e monitoramento das atividades dos agentes.

Por fim, como contribuição empírica deste trabalho, serão apresentados experimentos numéricos baseados no SEB considerando classes típicas de consumidores candidatos a participarem do Programa Estrutural de RD. Nossa análise buscará ilustrar os possíveis pontos de equilíbrio reais do mecanismo, avaliando sua eficácia tanto na melhoria da operação, com a provisão ao operador de maior flexibilidade operativa, e redução do custo total para atendimento à carga do sistema, como os benefícios para os consumidores participantes, ao contrabalancear a oferta para participação no mecanismo com a atividade-fim do consumidor.

2.0 PROGRAMAS DE RESPOSTA DA DEMANDA NO BRASIL

2.1 Histórico

No contexto do sistema e mercado de energia brasileiro, as iniciativas de gerenciamento pelo lado da demanda ainda estão em estágios iniciais. Os consumidores não tinham participação ativa na operação do sistema até a criação do Programa Piloto instituído pela REN ANEEL nº 792/2017 [1][2]. A partir deste marco, consumidores industriais dos submercados Norte e Nordeste poderiam realizar ofertas de redução de consumo ao ONS (quantidade e preço), a serem utilizado na operação do SIN como recurso alternativo ao despacho termelétrico fora da ordem de mérito. As ofertas seriam feitas pelo consumidor livre autorepresentado ou por agregadores de carga, para a semana operativa seguinte. Após a avaliação e despacho da oferta para o dia seguinte, o consumidor efetuaria a redução de carga, sendo apurado e remunerado pela CCEE. Ao longo da sua existência, melhorias pontuais foram implementadas. No entanto, o programa foi oficialmente extinto em 2022, sem ter obtido participação efetiva dos consumidores.

Por outro lado, nos anos de 2020-2021, o Brasil enfrentou condições hidrológicas severas, que motivou a criação do programa emergencial de RD, chamado Redução Voluntária da Demanda (RVD) [1][2]. Este programa foi baseado no Programa Piloto, com importantes simplificações e melhorias, como a isenção de assinatura de contrato específico com o operador do sistema para a participação e aperfeiçoamento na figura do agregador. A iniciativa foi avaliada com bem-sucedida, incentivando o estabelecimento do Programa Estrutural de RD, que será detalhado na seção a seguir.

2.1 Programa Estrutural de RD

O Programa Estrutural de RD foi estabelecido através da REN ANEEL nº 1.040/2022, permitindo a utilização das ofertas de redução de carga de consumidores livres como recurso adicional à operação do SIN [1][2]. Abrangendo todos os submercados do SIN e sem necessidade de recursos de supervisão e controle com o ONS, os consumidores autorepresentados ou agregadores submetem a oferta de redução na quinta-feira para a semana operativa seguinte, conforme os produtos disponibilizados mensalmente pelo ONS. Então, no dia anterior ao dia da oferta, os ofertantes confirmam sua disponibilidade e o ONS pode ou não os despachar. O programa aplica-se a dias úteis e sábados, excluindo os domingos, sendo os possíveis produtos de 4 a 17 horas de redução. Atenta-se para a regra que uma oferta não pode ter horas coincidentes com outra na qual o mesmo consumidor faz parte. A apuração pela CCEE é feita observando o valor ofertado e redução efetiva em comparação a uma linha base, definida pela média do consumo histórico em um determinado período conforme as regras estabelecidas pela CCEE [3].

Para auxiliar o entendimento do funcionamento do programa, para um conjunto de j dias da semana operativa $\mathcal{J}$, define-se o conjunto de horas em cada dia como $h \in \mathcal{H}(j)$. Considerando os $\mathcal{P}$ produtos de RD disponibilizados pelo ONS no âmbito do Programa Estrutural, pode-se definir $\overline{\mathcal{H}}_p(j)$ como o conjunto de horas em que o produto $p \in \mathcal{P}$ pode ser despachado, no para um dia $j \in \mathcal{J}$. Definimos também um conjunto de consumidores participantes $i \in \mathcal{X}$, que fazem ofertas para um determinado produto e dia da semana. Cada consumidor $i \in \mathcal{X}$ tem sua demanda de energia horária $d_{i,j,h}$ e sua linha base de referência calculada previamente, com valores horários $L_{i,h}$.

Como regra do programa, um consumidor pode ofertar em diversos produtos no mesmo dia desde que não haja horas coincidentes entre as ofertas para uma mesma carga. Considerando uma variável binária $u_{i,p,j,h} \in \{0,1\}$ que representa se houve despacho para redução de demanda de um agente $i \in \mathcal{X}$, no produto $p \in \mathcal{P}$, dia $j \in \mathcal{J}$ e hora $h \in \overline{\mathcal{H}}_p(j)$, a equação a seguir representa esta regra:

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} u_{i,j,h,p} \leq 1 \quad (1)$$

O montante horário considerado para a apuração de remuneração da oferta de RD é dado pela diferença horária entre a linha base e consumo efetivo, quando este for positivo. Assim, pode-se escrever que a redução efetiva considerada para a remuneração como:

$$B_{i,p,j,h}(d_{i,j,h}) = \max\{L_{i,h} - d_{i,j,h}, 0\} \quad (2)$$

Além disso, o montante a ser considerado para a remuneração da oferta de RD também deve estar limitado à quantidade da oferta feita e despachada pelo ONS. Chamando $q_{i,p,j}$ a quantidade despachada pelo ONS pela oferta de um agente $i \in \mathcal{X}$, no produto $p \in \mathcal{P}$, dia $j \in \mathcal{J}$, temos:

$$Q_{i,p,j,h}(d_{i,j,h}, q_{i,p,j}) = \min\{B_{i,p,j,h}(d_{i,j,h}), q_{i,p,j}\} \quad (3)$$

No entanto, caso o consumidor eleve seu consumo acima de um percentual $\gamma \in [0,1]$, definido como 10% atualmente, da linha base em momentos do dia não permitido pelo Operador, haverá um desconto neste montante horário, resultando no montante final considerado pela remuneração:

$$\rho_{i,p,j,h}(d_{i,j,h}, q_{i,p,j}, \bar{M}_{i,j}) = \max\{Q_{i,p,j,h}(d_{i,j,h}, q_{i,p,j}) - \bar{M}_{i,j}, 0\} \quad (4)$$

O valor de desconto $\bar{M}_{i,j}$ será calculado pela soma do montante horário excedido em cada hora nos horários proibidos $M_{i,j,h}$, dividido pelo total de horas em que houve redução de consumo despachado do consumidor. Para isso, utiliza-se a variável binária $u_{i,p,j,h}$ que representa se houve redução de demanda despachada e atendida de um agente i , no produto p , dia j e hora h :

$$M_{i,j,h}(d_{i,j,h}) = \max\{d_{i,j,h} - L_{i,h}(1 + \gamma), 0\} \quad (5)$$

$$\bar{M}_{i,j}(d_{i,j,h}, u_{i,j,h}) = \frac{\sum_{h \in \cup_p(\bar{\mathcal{H}}_p(j))} M_{i,j,h}(d_{i,j,h})}{\sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{h \in \bar{\mathcal{H}}_p(j)} u_{i,j,h,p}} \quad (6)$$

Para valorar a receita do participante, a regra do Programa Estrutural diz que o preço considerado será calculado, hora a hora, pela diferença entre o preço da oferta do consumidor e do Preço de Liquidação das Diferenças (PLD), se este valor for positivo. Caso contrário, a redução de consumo será contabilizada apenas na liquidação pelo PLD, sem receita adicional. Assim, chamam-se $\lambda_{i,p,j}$ como o preço, em R\$/MWh, da oferta e $\pi_{j,h}$ o PLD do submercado em que se encontra o consumidor, resultando na expressão do preço considerado:

$$\Lambda_{i,p,j,h}(\lambda_{i,p,j}) = \max\{\lambda_{i,p,j} - \pi_{j,h}, 0\} \quad (7)$$

Por fim, encontra-se a receita do participante como o produto dos montantes e preço considerado, para cada agente $i \in \mathcal{X}$, no produto $p \in \mathcal{P}$, dia $j \in \mathcal{J}$, hora $h \in \bar{\mathcal{H}}_p(j)$:

$$R_{i,p,j,h}(d_{i,j,h}, q_{i,p,j}, \lambda_{i,p,j}, \bar{M}_{i,j}) = \rho_{i,p,j,h}(d_{i,j,h}, q_{i,p,j}, \bar{M}_{i,j}) \Lambda_{i,p,j,h}(\lambda_{i,p,j}) \quad (8)$$

Importante destacar que há uma avaliação horária de atendimento mínimo ao produto despacho, quando o valor da redução de carga é inferior ao ofertado e aceito pelo ONS. Este valor mínimo é um percentual do tamanho da oferta despachada, Γ , considerado como 80% no Programa Estrutural. Caso o participante atinja um determinado número de não atendimentos, ele poderá ser excluído do programa e não poderá mais realizar ofertas indefinitivamente. Considerando que o participante não tem intenção de ser excluído do programa, é necessário atender à seguinte restrição:

$$B_{i,p,j,h}(d_{i,j,h}) \geq q_{i,p,j} \Gamma, \quad \forall p \in \mathcal{P}, h \in \bar{\mathcal{H}}_p(j) \quad (9)$$

3.0 PROBLEMA DA OFERTA ÓTIMA NO PROGRAMA ESTRUTURAL DE RD

3.1 Processo produtivo do consumidor

Para representação do custo de oportunidade do consumidor industrial com potencial de flexibilidade operativa, propõe-se um modelo geral das decisões do consumidor que seja parametrizável.

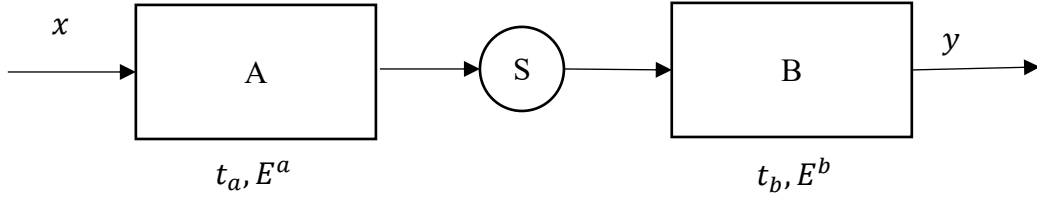


Fig. 1 – Diagrama esquemático do modelo do consumidor com flexibilidade.

O consumidor possui dois processos, A e B, conforme mostrado na Fig. 1. O processo A consome insumos de entrada x e produz P^a que pode ser armazenado em S para uso no processo B. Cada processo tem um tempo de processamento t , t_a e t_b , além de um consumo energético unitário E^a e E^b . As variáveis de controle u^a e u^b representam a decisão de intensidade de uso de cada processo, respectivamente. O modelo maximiza o retorno do ponto de vista do consumidor levando em conta o valor unitário do produto V_y , custo do insumo C_x e o custo com energia calculado pelo preço *spot* (PLD) $\pi_{j,t}$ pelo consumo d . Dessa forma, a decisão na produção deste tipo de consumidor consiste em controlar os processos A e B através das variáveis u^a e u^b , considerando a receita obtida pelo produto e os custos do insumo e do consumo de energia elétrica. As equações abaixo descrevem o problema de otimização deste processo produtivo.

$$\max_{x_{i,j,h}, y_{i,j,h}, d_{i,j,h}, u_{i,j,h}^a, u_{i,j,h}^b, S_{i,j,h}} \sum_{h \in \mathcal{H}(j)} (V_y y_{i,j,h} - C_x x_{i,j,h} - \pi_{j,t} d_{i,j,h}) \quad (10)$$

Sujeito a:

$$y_{i,j,h} = u_{i,j,(h-t_b)}^b K^b \quad \forall h \in \mathcal{H}(j) \setminus (\forall h \leq t_b) \quad (11)$$

$$P_{i,j,h}^a = x_{i,j,h} K^{a_1} \quad \forall h \in \mathcal{H}(j) \quad (12)$$

$$x_{i,j,h} = u_{i,j,(h-t_a)}^a K^{a_2} \quad \forall h \in \mathcal{H}(j) \setminus (\forall h \leq t_a) \quad (13)$$

$$S_{i,j,h} = S_{i,j,(h-1)} + P_{i,j,h}^a - y_{i,j,h} \quad \forall h \in \mathcal{H}(j) \setminus (\forall h \leq t_a) \quad (14)$$

$$d_{i,j,h} = E^a u_{i,j,h}^a + E^b u_{i,j,h}^b \quad \forall h \in \mathcal{H}(j) \quad (15)$$

$$0 \leq u_{i,j,h}^a, u_{i,j,h}^b \leq 1 \quad \forall h \in \mathcal{H}(j) \quad (16)$$

3.2 Otimização dos parâmetros da oferta

Utilizando a receita obtida com a RD, descrito em (7), adicionada à função objetivo do processo produtivo do consumidor, descrito em (9), encontra-se o resultado financeiro da operação do consumidor considerando a participação no Programa Estrutural de RD. Dessa forma, uma redução da demanda ao ter sua oferta despachada resultará no recebimento de uma receita adicional, conforme descrito em (2)-(7), mas também limitará a sua receita de produção e venda, restringindo pelas equações (11)-(16). Busca-se, portanto, encontrar os parâmetros de oferta e ponto de operação da produção do consumidor

equilibrando a receita adicional da RD e o custo de oportunidade do consumidor. Neste equilíbrio, ainda há outro *trade-off* que deve ser considerado, entre o preço ofertado e o custo marginal de operação do sistema elétrico para atender à demanda $\widehat{D}_h$ do sistema em cada hora. Quanto maior o preço ofertado, maior deve ser a receita pela RD, mas aumenta o risco da oferta simplesmente não ser aceita e despachada pelo Operador do sistema.

Assim, para obter os parâmetros ótimos da oferta, a escolha ótima de qual produto de RD a ofertar, bem como a demanda horária ótima do consumidor, formula-se o problema de otimização para um determinado dia j e de um determinado consumidor i como:

$$\max_{\substack{d_{i,j,h}, q_{i,p,j}, u_{i,j,h} \\ \lambda_{i,p,j}, V_{i,p,j} \\ x_{i,j,h}, y_{i,j,h} \\ u_{i,j,h}^a, u_{i,j,h}^b, s_{i,j,h}}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{h \in \mathcal{H}_p(j)} R_{i,p,j,h}(d_{i,j,h}, q_{i,p,j}, \lambda_{i,p,j}, \overline{M}_{i,j}) + \sum_{h \in \mathcal{H}(j)} (V_y y_t - C_x x_t - \pi_{j,t} d_{i,j,h}) \quad (17)$$

Sujeito a:

Equações descritas em (1)-(9) e (11)-(16); e

$$(\lambda_{i,p,j} \times V_{i,p,j}) \in \mathbb{R}_+ \times [\underline{V}_i, \overline{V}_i] \quad \forall i \in \mathcal{X}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (18)$$

$$q_{i,p,j} \in \arg \min_{g,q} \sum_{h \in \mathcal{H}} \sum_{k \in \mathcal{K}} c_{k,j,h} g_{k,j,h} + \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{h \in \overline{\mathcal{H}}_p(j)} \sum_{i \in \mathcal{X}} \lambda_{i,p,j} q_{i,p,j} \quad (19)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} g_{k,j,h} + \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{i \in \mathcal{X}} q_{i,p,j} = \widehat{D}_h \quad \forall p \in \mathcal{P}, h \in \overline{\mathcal{H}}_p(j) \quad (20)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} g_{k,j,h} = \widehat{D}_h \quad \forall p \in \mathcal{P}, h \in \mathcal{H}(j) \setminus \overline{\mathcal{H}}_p(j) \quad (21)$$

$$0 \leq g_{k,j,h} \leq G_{k,j} \quad \forall k \in \mathcal{K}, h \in \mathcal{H}(j) \quad (22)$$

$$0 \leq q_{i,p,j} \leq V_{i,p,j} \quad \forall i \in \mathcal{X}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (23)$$

O termo $V_{i,p,j}$ representa o tamanho das ofertas de RD para um determinado consumidor, produto e dia. Os termos $g_{k,j,h}$ e $G_{k,j}$ representam, respectivamente, a geração horária de uma usina como resultado da programação da operação e o valor máximo de potência, para uma usina $k \in \mathcal{K}$. Dessa forma, o problema composto pela função objetivo (17), e equações (1)-(9), (11)-(16) e (18)-(23) forma um problema de otimização bi-nível, no qual o montante de redução de carga aceito pelo ONS depende do problema minimização de custos da operação, representado de forma simplificada em (19)-(23). Destaca-se que, no Programa Estrutural de RD, a programação dessas ofertas não afeta o preço de curto prazo da energia, ocorrendo em uma etapa posterior à execução do programa DESSEM [4]. Desta forma, neste trabalho, o PLD ($\pi_{j,t}$) é considerado uma variável exógena. Este problema, formulado de tal maneira, pode ser resolvido através de estratégias conhecidas de *Mathematical Programming with Equilibrium Constraints* (MPEC) como em [5][6][7][8].

4.0 EQUILÍBRIO DE MERCADO

Através do conceito de Equilíbrio de Nash [9], apresenta-se uma metodologia para estimar o equilíbrio de mercado no Programa Estrutural de RD, explorando a interação entre os consumidores em ambiente competitivo. Neste trabalho, utiliza-se um algoritmo de ponto fixo [10] através de iterações sucessivas para identificar um melhor ponto de equilíbrio, até que nenhum participante possa melhorar sua oferta.

Define-se $\phi_{i,j}(\lambda_{i,j}, V_{i,j})$ o valor da função objetivo caracterizada em (17), sendo $\lambda_{i,j}$ e $V_{i,j}$ vetores de tamanho igual ao número de produtos disponíveis. Então, um processo iterativo é realizado no qual o problema apresentado na seção 3.2 é resolvido sucessivamente para cada consumidor participante do programa de RD e os parâmetros das ofertas são atualizados, até o ponto de equilíbrio ser encontrado. A seguir, é resumido o algoritmo utilizado:

- Inicialização: $\phi_{i,pj}(\lambda_{i,j}^* = 0, V_{i,j}^* = 0)$, para cada consumidor i , iniciando o algoritmo com a receita da produção do consumidor sem ofertas de RD.
- Enquanto $\phi_{i,j}(\lambda_{i,j}^*, V_{i,j}^*) < \phi_{i,j}(\hat{\lambda}_{i,j}, \hat{V}_{i,j})$ para todos os consumidores $i \in \mathcal{X}$:
 - Atualiza valores ótimos da oferta: $\{(\lambda_{i,j}^*, V_{i,j}^*)\}_{i \in \mathcal{X}} \leftarrow \{(\hat{\lambda}_{i,j}, \hat{V}_{i,j})\}_{i \in \mathcal{X}}$
 - Para cada consumidor i :
 - Resolver problema composto pela função objetivo (17), e equações (1)-(9), (11)-(16) e (18)-(23), para obter $(\hat{\lambda}_{i,j}, \hat{V}_{i,j})$
- Quando atingido o critério de parada, obtém-se o ponto de equilíbrio das ofertas de RD em um dia j para cada consumidor i até o último consumidor n : $((\lambda_{1,j}^*, V_{1,j}^*), \dots, (\lambda_{n,j}^*, V_{n,j}^*))$

5.0 RESULTADOS

5.1 Estudo de caso

É apresentado um estudo de caso baseado em dados reais do sistema brasileiro, especificamente do dia 12 de novembro de 2024 [11], no qual ocorreu o maior despacho acumulado de RD no país. A necessidade de atendimento de potência neste dia, evidenciado pelo recorde do uso do recurso de RD, é um caso crítico para as análises apresentadas. São três produtos disponibilizados pelo Operador, caracterizados pela grade horária de cada dia j : $\overline{\mathcal{H}}_1(j) = \{19, 20, 21, 22\}$, $\overline{\mathcal{H}}_2(j) = \{17, 18, \dots, 21, 22\}$ e $\overline{\mathcal{H}}_3(j) = \{16, 17, \dots, 22, 23\}$. A curva de geração disponível, apresentada na Fig. 2(a), considera as usinas despachadas na programação diária da operação neste dia. A Fig. 2(b) apresenta as curvas do custo marginal de operação deste caso, sem considerar as ofertas de RD e com essas ofertas despachadas, bem como o PLD do dia 12/11/2024 e a demanda líquida considerada, composta pela demanda total do sistema descontada a geração renovável. Nota-se a redução dos custos marginais de operação causado pela RD principalmente no horário de pico de carga, coincidente com o pico do PLD.

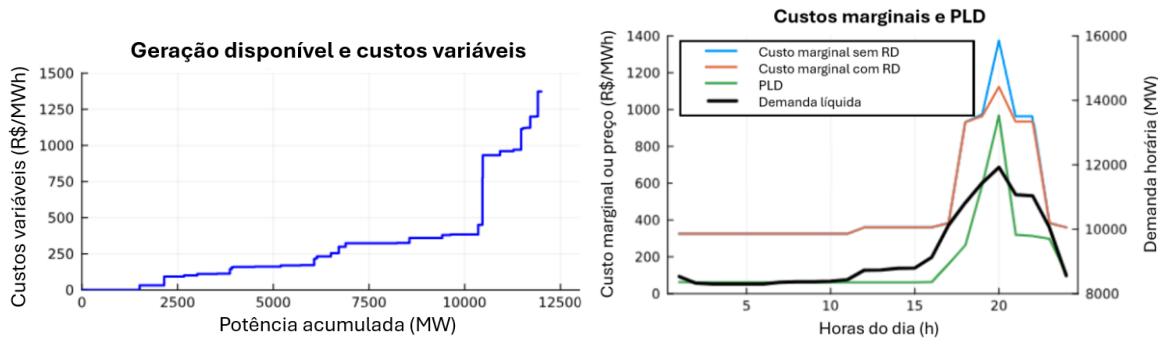


Fig. 2 – (a) Curva de geração disponível e custos variáveis no caso de estudo, (b) Custos marginais, PLD e demanda líquida considerada para o estudo de caso.

No entanto, para a aplicação da metodologia apresenta neste trabalho, retiramos as ofertas de RD originais e representamos 20 consumidores participantes no Programa Estrutural de RD, de acordo com o modelo apresentado na seção 3.1. Para gerar esses consumidores, são criados quatro *clusters* com cinco consumidores cada, variando aleatoriamente os parâmetros de consumo de energia do processo A (E^a) e do preço de vendo o seu produto (V_y), mantendo demais parâmetros iguais. A Fig. 3 representa os grupos de consumidores geradores, de acordo com esses parâmetros, com indicação da dimensão da

sua receita através do valor da função objetivo para um dia típico com PLD *flat*. A Tabela 1 detalha esses parâmetros utilizados.

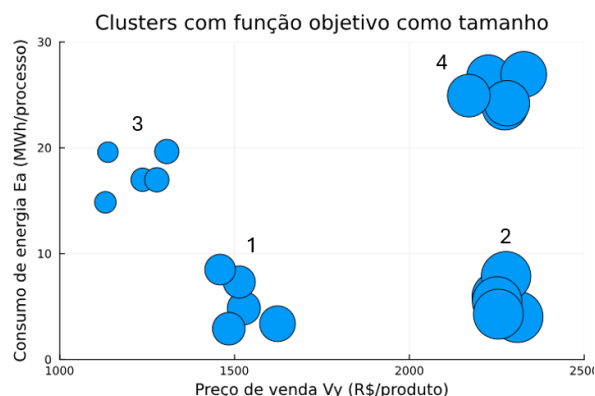


Fig. 3 – Cluster de consumidores considerados no estudo de caso

Tabela 1 – Parâmetros dos consumidores no estudo de caso.

# Cluster	1					2				
# Consum.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vy	1526,57	1622,85	1513,38	1458,70	1483,54	2309,11	2249,87	2276,60	2251,01	2254,61
Ea	4,86	3,39	7,33	8,50	2,91	4,04	5,96	7,87	5,49	4,29
Vy/Ea	314,19	479,24	206,47	171,61	509,02	572,20	377,41	289,30	410,19	525,17

# Cluster	3					4				
# Consum.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Vy	1137,74	1236,90	1277,63	1306,10	1130,49	2226,14	2327,32	2273,39	2279,22	2170,08
Ea	19,60	16,99	16,99	19,65	14,85	26,73	26,94	23,83	24,22	24,94
Vy/Ea	58,06	72,80	75,22	66,45	76,11	83,27	86,38	95,39	94,12	87,02

Considerando esses consumidores, são geradas as linhas base para a apuração das ofertas de cada consumidor, observando a produção desses consumidores sob o PLD histórico conforme o problema definido nas equações (10)-(16). Destes valores, observa-se que consumidores do *cluster 3* já vinham reduzindo seu consumo devido ao alto PLD histórico, o que influenciará nas suas capacidades de participar do programa. A Fig. 4 apresenta as linhas base obtidas.

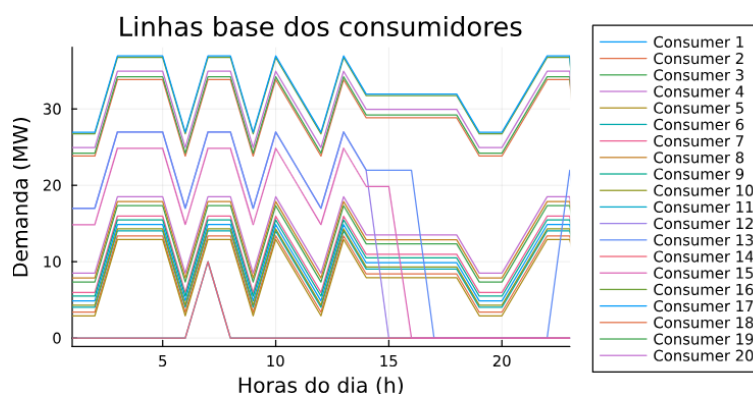


Fig. 4 – Linhas base dos consumidores para o estudo de caso.

5.2 Ofertas ótimas individuais

São avaliadas as ofertas ótimas destes consumidores no caso de estudo individualmente, ou seja, sem que estes consumidores considerem a participação de outros no Programa Estrutural de RD. Para fins ilustrativos, não é considerado o limite mínimo de 5 MW. A Tabela 2 apresenta os parâmetros ótimos das ofertas obtidos.

Tabela 2 – Ofertas ótimas individuais dos consumidores no estudo de caso.

# Consum.	1	2	3	4	5	6	7	8	9,...,15	16	17	18	19	20
Produto (#)	1	1	2	2	2	-	1	1	-	3	3	3	3	3
Tamanho (MW)	6,07	4,23	9,16	10,62	1,90	-	7,45	9,84	-	33,42	33,68	29,79	30,27	31,17
Preço (R\$/MWh)	1066,87	1066,87	930,05	930,05	930,05	-	1066,87	1066,87	-	769,13	769,13	769,13	769,13	769,13

Todos os consumidores do primeiro *cluster* ofertam no programa, divididos pelos produtos 1 e 2, que são produtos mais curtos e nos quais a redução de carga ocorre nos períodos de PLD mais elevado. Nota-se que os preços ofertados por produto são os mesmos, indicando que o participante busca ofertar o maior preço possível que seja despachado pelo Operador para maximizar o lucro da sua produção. Neste caso, os valores de 1066,87 R\$/MWh e 930,05 R\$/MWh coincidem com a média dos custos marginais de operação (representada nas equações (19)-(23)) nos horários de cada produto. Enquanto isso, pode-se relacionar o tamanho das ofertas realizadas com os parâmetros e E^a dos consumidores, apresentando valores inferiores quando comparados.

No segundo *cluster*, apenas dois consumidores realizam ofertas, somente no produto 1. O preço ofertado é o mesmo observado para o produto 1 no *cluster* 1. No tamanho da oferta, as reduções ofertadas são ainda superiores ao consumo do processo A para todos os consumidores.

No terceiro *cluster* não há participação na RD. Com alto consumo de energia e baixo valor de venda do produto, seria intuitivo afirmar que esses consumidores se beneficiariam de programas de RD, no entanto, a sua alta sensibilidade ao PLD afetou seu consumo histórico de energia elétrico e, consequentemente, reduziu a sua linha base. Assim, não é possível entregar uma redução de consumo em relação à linha base e impossibilita a sua participação no programa de forma efetiva.

Para o quarto *cluster*, todos os consumidores ofertam no produto 3, com a duração mais extensa, como resultado de um alto custo com energia no seu processo produtivo e baixo valor de venda do seu produto. Como foi observado nos outros *clusters*, o preço ofertado é o mesmo para todas as ofertas nesse produto, buscando o custo marginal de operação no período do despacho. Nestes, apontam-se também altos valores no tamanho da oferta, superando os consumos do processo A.

5.3 Ofertas ótimas em equilíbrio de mercado

Executando o algoritmo na seção 4.0, obtém-se os parâmetros ótimos esperados das ofertas em equilíbrio de mercado. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3 – Ofertas ótimas em equilíbrio de mercado dos consumidores no estudo de caso.

# Consum.	1	2	3	4	5	6	7	8	9,...,15	16	17	18	19	20
Produto (#)	1	-	2	2	-	-	-	1	-	3	3	3	3	3
Tamanho (MW)	6,07	-	9,16	10,62	-	-	-	9,84	-	33,42	33,68	29,79	30,27	31,17
Preço (R\$/MWh)	1023,46	-	901,56	901,56	-	-	-	1023,46	-	769,13	769,13	769,13	769,13	769,13

Comparando com os resultados das ofertas individuais, vemos que os consumidores 2, 5 e 7 deixam de ofertar no ambiente competitivo. Para os consumidores que se mantêm ofertando, os produtos escolhidos e tamanho da oferta são os mesmos, mas o preço ofertado é reduzido para os produtos 1 e 2, indo ao encontro da média do novo custo marginal da operação nas suas respectivas grades horárias. Essa redução do preço ótimo a ser ofertado por produto inviabiliza a participação dos consumidores 2, 5 e 7, não sendo mais vantajosa para esses consumidores. Porém, para o produto 3, devido à longa extensão do produto, a oferta é pouco afetada e se mantém iguais no equilíbrio de mercado.

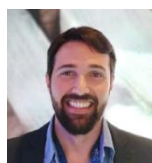
6.0 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma análise do Programa Estrutural de RD através da formulação das regras do programa e, junto a um modelo genérico de produção parametrizável, apresenta-se uma metodologia para estimar a oferta ótima dos consumidores participantes, bem como o equilíbrio de mercado. Assim, os consumidores utilizam a flexibilidade do seu processo produtivo para maximizar sua receita e, ainda, contribuir para a operação do sistema, reduzindo os custos de operação. No estudo de caso, é observado como diferentes tipos de consumidores interagem com o Programa Estrutural de RD, representados através de diferentes parâmetros de consumo de energia e valor de produto. Consumidores com alto consumo específico e valor de produto são mais propensos a participar e se beneficiar do programa, inclusive em equilíbrio, considerando competição com outros participantes no mercado. No entanto, é importante apontar que a modulação do seu consumo no passado pode inviabilizar a sua participação.

7.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] Neves, E. et al. Implantação do programa estrutural de resposta da demanda no setor elétrico brasileiro e oportunidades de aprimoramento. (Cigré - XIX ERIAC, 2023).
- [2] Bessa, R. et al. Operacionalização do Programa Estrutural de Resposta da Demanda pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). (Cigré - XVIII EDAO, 2024).
- [3] CCEE. Regras de Comercialização – Resposta da Demanda, (2025).
- [4] Santos, T. N., et al. "Hourly pricing and day-ahead dispatch setting in Brazil: The dessem model." *Electric Power Systems Research* 189 (2020): 106709.
- [5] B. Fanzeres, S. Ahmed, and A. Street, "Robust Strategic Bidding in Auction Based Markets," *European Journal of Operational Research*, vol. 272, no. 3, pp. 1158–1172, Feb. 2019.
- [6] B. Fanzeres, A. Street, and D. Pozo, "A Column-and-Constraint Generation Algorithm to Find Nash Equilibrium in Pool-Based Electricity Markets," *Electric Power Systems Research*, vol. 189, p. 106806, December 2020.
- [7] S. J. Kazempour, A. J. Conejo, and C. Ruiz, "Strategic Bidding for a Large Consumer," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 2, pp. 848–856, March 2015.
- [8] C. Ruiz and A. J. Conejo, "Pool Strategy of a Producer with Endogenous Formation of Locational Marginal Prices," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 1855–1866, Nov. 2009.
- [9] J. Nash, "Non-Cooperative Games," *Annals of Mathematics*, vol. 54, no. 2, pp. 286–295, September 1951.
- [10] L. Glicksberg, "A Further Generalization of the Kakutani Fixed Point Theorem, with Application to Nash Equilibrium Points," *American Mathematical Society*, vol. 3, no. 1, pp. 170–174, February 1952.
- [11] ONS. Relatório Executivo da Programação Diária da Operação, de 12 de novembro de 2024.

DADOS BIOGRÁFICOS



Gabriel Miguez Longhi - Engenheiro eletricista (UFRJ) com formação em finanças (COPPEAD), mestrado em engenharia elétrica na área de sistemas de energia elétrica (COPPE/UFRJ) e doutorando em engenharia de produção (PUC-Rio) na área de pesquisa operacional em algoritmo e otimização. Atua profissionalmente em assuntos regulatórios e Procedimentos de Rede no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) desde 2018.

Bruno Fânzeres dos Santos - Possui graduação em Engenharia Elétrica e Industrial, e Mestrado e Doutorado em Pesquisa Operacional, todos pela PUC-Rio. Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio e pesquisador do *Laboratory of Applied Mathematical Programming and Statistics* (LAMPS).

Pedro Bittencourt e Silva - Engenheiro de controle e automação (PUC-Rio 2009), mestre em engenharia mecânica (PUC-Rio 2012), doutorando em engenharia elétrica (PUC-Rio). É fundador e CEO da empresa *GreenAnt* e coordenador de projetos P&D ANEEL.