

# Modelo de Otimização para o Despacho Econômico de Sistemas Híbridos de Geração de Energia

Émilly G. O. Silva\*. Geize N. D. Silva\*\*. Gustavo C. Silva\*\*\*.  
Thaís F. Araújo\*\*\*\*. Jáder F. D. Breda\*\*\*\*\*

\*Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri-UFVJM, Janaúba, MG,  
Brasil (Tel: +55 -38-3532-6808; e-mail: emilly.gabriele@ufvjm.edu.br)

\*\*Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri-UFVJM, Janaúba, MG,  
Brasil (Tel: +55 -38-3532-6808; e-mail: geize.nayara@ufvjm.edu.br)

\*\*\*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Vitória da Conquista, BA,  
Brasil (Tel: +55 -77-3426-4210; e-mail: 202321130040@ifba.edu.br)

\*\*\*\*Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri-UFVJM, Janaúba, MG,  
Brasil (Tel: +55 -38-3532-6808; e-mail: thais.araujo@ufvjm.edu.br)

\*\*\*\*\*Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri-UFVJM, Janaúba, MG,  
Brasil (Tel: +55 -38-3532-6808; e-mail: jader.breda@ufvjm.edu.br)

---

**Abstract:** This work presents a dispatch model for integrated renewable power generation system. It is assumed that the power system operator, located in the northern region of Minas Gerais, manages a system with dispatchable generating units, one hydroelectric plant and three thermal plants; and with non-dispatchable units, one wind farm and one photovoltaic plant. The results of the simulation of the economic dispatch model, using the interior point optimization technique, show the importance of non-dispatchable generating units, which allow hydroelectric plants to function as stored units of energy for the system and ensured cost reduction of the integrated system in unfavorable hydrological scenarios.

**Resumo:** Este trabalho apresenta um modelo de despacho para sistemas integrados de geração de energia. Assume-se que o operador do sistema de energia, localizado na região norte de Minas Gerais gerencia um sistema com unidades geradoras despacháveis, uma usina hidrelétrica e três usinas térmicas, e com unidades não despacháveis, um parque eólico e um fotovoltaico. Os resultados das simulações do modelo de despacho econômico, com a utilização da técnica de pontos interiores, dão conta da importância das unidades geradoras não despacháveis, que permitem que as usinas hidrelétricas funcionem como unidades armazenadoras de energia para o sistema que garantem a diminuição de custos do sistema integrado em cenários hidrológicos não favoráveis.

**Keywords:** Photovoltaic Solar Energy; Hydroelectric Plants; Wind Farms, Economic Dispatch; Integrated Systems Management.

**Palavras-chaves:** Energia Solar Fotovoltaica; Centrais Hidrelétricas; Parques Eólicos, Despacho Econômico; Gerenciamento de Sistemas Integrados.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energia para diversificar a matriz energética tem sido o foco de vários países no atual cenário mundial. Neste contexto, a visão de investimento se volta para as fontes de energias renováveis com melhor custo-benefício e de menor impacto ao meio ambiente, o que pode garantir uma economia de baixo carbono. Seguindo essa visão, o Brasil se destaca globalmente, isso porque nos últimos anos atingiu o patamar de 40% do consumo total de energia provenientes de fontes renováveis e segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), esse é um valor superior aos de outros países da organização (Portal Solar, 2022).

Atualmente, a fonte de energia elétrica renovável predominante no Brasil são as hidrelétricas, que apesar de

possibilitar a geração de eletricidade em grande quantidade, é uma fonte de energia que depende de níveis de chuvas e da construção de grandes represas para a formação dos reservatórios, no que resulta impactos ambientais significativos (EPE, 2023). Esse fato coloca o país em um estado de atenção quando se tem uma crise hídrica, uma vez que a diminuição nos níveis dos reservatórios, como exemplo a que foi vivida no ano de 2021, traz diversas consequências, dentre elas, acionamento da bandeira tarifária vermelha. Nesses casos, as usinas termelétricas conseguem garantir que se tenha energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), evitando assim, um possível apagão, sendo consideradas usinas de base para o sistema (Solar, 2022).

Visto o potencial nacional eólico e solar, o Brasil criou mecanismos de incentivos à promoção dessas fontes energéticas. Diante disso, a energia fotovoltaica tem se

encontrado em maior evidência nos últimos anos, devido uma melhor acessibilidade aos equipamentos, por ser uma forma de produção de energia viável para instalações em domicílios, indústrias, e ainda, no formato de parques conectados ao sistema interligado, gerando benefícios econômicos e ambientais para o país. Também se destaca a energia eólica, cuja maioria dos parques do Brasil estão localizados no litoral possibilitando o melhor aproveitamento das correntes de ventos. Ademais, a expansão desses parques também ocorre em locais com capacidade de geração de energia solar fotovoltaica (Brito et al. 2019).

Sendo assim, a geração de energia elétrica através de recursos renováveis promove novos desafios no gerenciamento e operação desses sistemas. Tendo em vista que a geração de energia elétrica fotovoltaica e eólica é oriunda de recursos com características intermitentes, a radiação solar e o vento, elas são consideradas não despacháveis.

Uma das formas de gerenciar o impacto da presença de fontes intermitentes no sistema elétrico é representar essas características na modelagem do despacho econômico. De acordo com Gomez (2018), o despacho econômico é um tema clássico de estudos realizados desde meados da década de 1920 e tem sido muito discutido atualmente devido ao crescimento dos sistemas elétricos. Sua principal característica é minimizar os custos no processo de geração de energia elétrica, bem como da operação das unidades geradoras, buscando atender a demanda total da carga, correspondendo às restrições do sistema. Estes custos estão associados às unidades geradoras de diferentes fontes de energia primárias, dentre as quais se destacam: hidráulica, combustível nuclear, combustível fóssil, eólico e solar.

O despacho econômico é considerado uma das ferramentas mais importantes na operação do sistema de potência e envolve um método matemático com diversas aplicações, dando a partir disso, a liberdade de otimizar qualquer função, seja ela linear ou não linear, mas por outro lado, como pode ser aplicado a muitos sistemas, apresenta diferentes soluções (Luzzato, 2022).

Neste contexto, propõe-se neste trabalho a modelagem matemática do despacho econômico para um sistema integrado de geração de energia elétrica, uma usina híbrida que além da geração através de hidrelétricas e termelétricas, represente as características intermitentes de um parque fotovoltaico e um eólico.

## 2. DESPACHO DE SISTEMAS INTEGRADOS - MODELO MATEMÁTICO

O planejamento da operação energética deve-se basear em modelos matemáticos que considerem as características intermitentes das fontes de geração fotovoltaica e eólica, para a posterior determinação do despacho de geração para as hidrelétricas e termelétricas de forma a atender a demanda de energia elétrica e atender às restrições de operação das usinas.

O modelo proposto neste trabalho considera o despacho de uma usina híbrida de geração de energia elétrica que, além de hidrelétricas e termelétricas, possui também geração de

energia solar fotovoltaica e eólica. O modelo de otimização tem como objetivo minimizar os custos de geração dessas unidades de geração, considerando que a geração fotovoltaica e eólica são não despacháveis. O problema é formulado considerando as restrições operacionais de produção de cada tipo de geração, desconsiderando as restrições do sistema elétrico, enfatizando as características intermitentes da radiação solar e do vento.

### 2.1 Modelo Matemático para uma Usina Térmica

O modelo matemático da termelétrica foi desenvolvido tendo como base o trabalho de Libraiz Junior (2022). A função de custo de produção  $C_T$  de cada gerador térmico  $i$ , que é apresentada em (1), onde  $P_T$  é a potência nominal do gerador térmico,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são os coeficientes de custo da unidade geradora  $i$ .

$$C_{Ti} = a \times P_{Ti}^2 + b \times P_T + c \quad (1)$$

Por sua vez, as restrições operacionais são representadas através de uma equação de desigualdade, que determina os limites operacionais de geração de energia, como em (2), onde  $P_{Tmin}$  e  $P_{Tmax}$  são os limites operacionais de produção mínimo e máximo, respectivamente.

$$P_{Tmin} < P_T < P_{Tmax} \quad (2)$$

### 2.2 Modelo Matemático da Usina Hidrelétrica

Uma usina hidrelétrica é um sistema complexo de engenharia que converte a energia potencial da água em energia elétrica utilizável. O modelo matemático de uma usina hidrelétrica depende de muitos fatores, incluindo a topografia do local, a vazão da água e a eficiência da turbina. No entanto, existem algumas equações básicas que descrevem o funcionamento geral da usina, como apresentado em Araújo et al. (2013). A função de produção da usina é uma função do volume turbinado  $q_h$ , em (m<sup>3</sup>/s), e do volume armazenado no reservatório  $V_h$ , em (m<sup>3</sup>), como demonstrado em (3). Os coeficientes  $c_{1h}$ ,  $c_{2h}$ ,  $c_{3h}$ ,  $c_{4h}$ ,  $c_{5h}$  e  $c_{6h}$  dependem das características construtivas da hidrelétrica.

$$P_h = c_{1h} \cdot V_h^2 + c_{2h} \cdot q_h^2 + c_{3h} \cdot V_h \cdot q_h + c_{4h} \cdot V_h + c_{5h} \cdot q_h + c_{6h} \quad (3)$$

Além da função de produção, devem ser observados os limites inferior ( $\underline{V}_h$ ) e superior ( $\overline{V}_h$ ) de volume do reservatório bem como, os limites operacionais referentes ao volume que pode ser turbinado ( $\underline{q}_h$  e  $\overline{q}_h$ ), apresentados em (4) e (5), respectivamente.

$$\underline{V}_h \leq V_h \leq \overline{V}_h \quad (4)$$

$$\underline{q}_h \leq q_h \leq \overline{q}_h \quad (5)$$

Além dessas restrições, deve-se considerar que a equação de continuidade da hidrelétrica define que o volume do reservatório da hidrelétrica é o somatório do volume inicial,  $V_{h,(t-1)}$ , e das afluições,  $A_h$ , menos o volume turbinado,  $q_h$ , e o volume vertido  $s_h$ , como apresentado em (6).

$$V_h = V_{h,(t-1)} + A_h - q_h - s_h + \sum_{j=1}^{nhm} (q_{h,(t-1)} + s_{h(t-1)}) \quad (6)$$

O modelo matemático para a geração através de hidrelétricas considera as principais variáveis que influenciam na produção desta unidade. No entanto, o modelo completo deve levar em conta muitos outros fatores, como a vazão de água, a geometria da turbina, a eficiência do gerador elétrico e a dinâmica do reservatório de água (Araujo et al, 2013).

Considera-se que a função de custo da usina hidrelétrica,  $C_H$ , é linear, na qual  $b$  é o coeficiente linear e  $c$  a constante, que representa o custo fixo da planta, como apresentado em (7).

$$C_H = b \times P_T + c \quad (7)$$

### 2.3 Modelo Matemático para uma Usina Eólica

Considera-se neste trabalho que a equação de produção de uma usina eólica, depende diretamente da velocidade do vento, como apresentado na Fig. 1. Observa-se no gráfico a variação da potência gerada pela planta em relação à variação da velocidade do vento (Libraiz Junior, 2022). Tal comportamento é representado matematicamente em (8), onde  $V$  é a velocidade do vento na localidade,  $V_i$  é a velocidade inicial para movimentação das pás da turbina;  $V_n$  é a velocidade nominal;  $V_c$  é a velocidade de corte de movimentação das pás;  $P_{En}$  é a potência nominal da turbina eólica e  $P_e$  a potência produzida pelo aerogerador conforme condições.

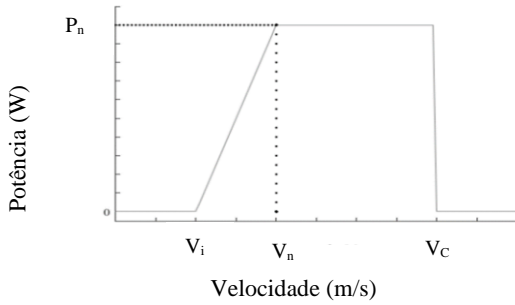


Fig. 1: Variação da Potência produzida por um aerogerador em função da velocidade do vento.

$$0, \text{ para } V < V_i \text{ e } V > V_c$$

$$P_E = P_{En} \cdot \frac{(V - V_i)}{(V_n - V_i)}, \text{ para } V_i \leq V \leq V_n \quad (8)$$

$$P_{En}, \text{ para } V_n \leq V \leq V_c$$

A função de custo ( $C_{Ej}$ ) de cada aerogerador  $j$  que compõem o parque eólico é linear, e depende do coeficiente de custo de operação do gerador  $d$  e da potência gerada  $P_{Ej}$ , como apresentado em (9) (Libraiz Junior, 2022).

$$C_{Ej} = d \times P_{Ej} \quad (9)$$

Os limites operacionais de produção dos aerogeradores são apresentados em (10), onde  $P_{Ejmin}$  corresponde ao limite inferior e  $P_{Ejmax}$  ao limite superior.

$$P_{Ejmin} < P_{Ej} < P_{Ejmax} \quad (10)$$

Nesse modelo a velocidade do vento é descrita através de uma função densidade de probabilidade de Weibull (Silva et al, 2020). A distribuição de Weibull é uma das funções que melhor se ajustam a dados de velocidade do vento. Essa função tem suporte no conjunto dos reais positivos, assumindo formas assimétricas, com assimetria à direita e à esquerda. Na função densidade de probabilidade apresentada em (11), a variável  $Y$  é a velocidade do vento, com parâmetros  $\delta > 0$  e  $\beta > 0$ .  $\delta$  é chamado de fator de escala, com as dimensões de velocidade, e  $\beta$  de fator de forma, sem dimensões.

$$f(Y) = \frac{\beta}{\delta} \left(\frac{Y}{\delta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{Y}{\delta}\right)^\beta} \quad (11)$$

### 2.4 Modelo Matemático para Usina Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é gerada a partir de módulos fotovoltaicos através do efeito fotovoltaico. Nessa modelagem, considera-se que a produção ocorre em um parque solar fotovoltaico, com  $n$  módulos instalados. Para cada módulo fotovoltaico, conforme apresentado em Oliveira (2020), considera-se que a função de custo ( $C_{Fl}$ ), apresentada em (12), é linear e que  $f$  é o coeficiente linear de custo e  $P_{Fl}$  o valor da potência produzida.

$$C_{Fl} = f \times P_{Fl} \quad (12)$$

As restrições operacionais são definidas pelos limites de geração de cada módulo fotovoltaico, como representado em (13). Em (13),  $P_{Flmin}$  refere-se ao limite inferior e  $P_{Flmax}$  ao limite superior.

$$P_{Flmin} < P_{Fl} < P_{Flmax} \quad (13)$$

Neste modelo, a radiação solar  $\tau$ , variável utilizada como referência para determinação da produção de cada módulo fotovoltaico, é representada por uma função densidade de probabilidade normal, como em (14). Em (14),  $\tau$  é a variável aleatória contínua com distribuição normal que representa a radiação solar;  $m$  refere-se à média da radiação solar e  $\sigma$  ao seu desvio padrão que descreve seu grau de dispersão.

Por sua vez, a equação de produção de cada módulo é mostrada em (15). Nesta equação,  $\tau_n$  é a radiação nominal para geração de potência nominal,  $P_{Fn}$  potência ativa nominal do módulo solar fotovoltaico e  $P_f$  potência gerada em função da irradiação solar  $\tau$ .

$$f(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\tau-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (14)$$

$$P_f = \begin{cases} P_{Fn} \frac{\tau}{\tau_n}, & \text{para } 0 \leq \tau \leq \tau_n \\ P_{Fn}, & \text{para } \tau_n \leq \tau \end{cases} \quad (15)$$

## 3. FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO

Neste trabalho, foi utilizado o algoritmo de Pontos Interiores como ferramenta de otimização para obter uma solução factível do despacho econômico com fontes renováveis para cada simulação realizada.

O método de Pontos Interiores é uma técnica de Programação Não Linear, utilizada para resolver problemas de otimização cuja função objetivo e restrições possuam pelo menos uma função não linear, como é o caso do modelo matemático do despacho de energia de fontes renováveis.

Outros métodos de otimização, incluindo até algoritmos evolucionários como em Araujo et al. (2013), podem ser utilizados para solucionar o problema do despacho econômico. Contudo, a vantagem da técnica é que a solução ótima é devolvida desde que cumpra as condições de otimalidade.

De forma breve, o método de Pontos Interiores realiza a busca da solução ótima dentro da região factível e não em suas fronteiras. Além disso, sua vantagem está na velocidade de convergência, pois o número de iterações do método é proporcional à raiz quadrada do número de variáveis e ao número de equações de restrições, conforme apresentado por Lesaja (2009).

Neste trabalho, utilizou-se a função “*fmincon*” da versão on-line do *Matlab*, disponibilizada pela *MathWorks*, que encontra o mínimo global de funções de várias variáveis de acordo com as restrições do modelo de otimização.

#### 4. ESTUDO DE CASO

Neste trabalho apresenta-se a modelagem matemática de um sistema integrado de geração de energia que possui três geradores térmicos, uma hidrelétrica, um parque eólico e um parque de geração fotovoltaica. No estudo de caso considera-se que as unidades geradoras fazem parte de um complexo que contempla uma das mais importantes hidrelétricas da Companhia Energética de Minas Gerais - Cemig, a usina de Irapé, também conhecida como Usina Presidente Juscelino Kubitschek, localizada no rio Jequitinhonha, região nordeste do estado de Minas Gerais, entre os municípios de Berilo e Grão Mogol. Sua potência instalada é de 399 MW. (CEMIG, 2023).

A usina se encontra em uma das regiões mais promissoras em relação a investimentos na geração de energia solar fotovoltaica concentrada. Assim, considera-se que além da usina hidrelétrica (H1), o complexo de geração híbrido de energia também possui três termelétricas a biomassa (G1, G2, G3). Os limites operacionais dessas termelétricas, apresentados na Tabela 1, foram definidos para que essas tenham capacidade de atender a toda demanda do sistema.

Os custos das unidades geradores despacháveis são modelados através de funções de segundo grau. Os coeficientes de custo desses geradores são listados na Tabela 2, a seguir. Os valores desses parâmetros foram definidos com base o trabalho de Araujo et al. (2013).

Ainda para o gerador hidrelétrico, considerou-se limites operacionais específicos, relacionados a sua operação: ao volume mínimo e máximo do reservatório ( $V_{\min}$ ,  $V_{\max}$ ), os limites operacionais da turbina ( $q_{\min}$  e  $q_{\max}$ ) e o volume inicial

do reservatório ( $V_{\text{ini}}$ ). Esses dados são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 1 - Limites operacionais de geração de energia elétrica das usinas despacháveis.**

Geradores	Inferior (MW)	Superior (MW)
G1	75	300
G2	60	250
G3	100	400
H1	0	399

**Tabela 2 - Coeficientes de custo dos geradores térmicos e do gerador hidrelétrico.**

Geradores	Coefficiente quadrático (a)	Coefficiente Linear (b)	Constante (c)
G1	0,0021	16,83	684,74
G2	0,0042	16,95	585,62
G3	0,0018	20,74	213
H1	0	13	24

**Tabela 3 – Limites operacionais da usina hidrelétrica**

	$V_{\max}$ ( $\times 10^4 \text{ m}^3$ )	$V_{\min}$ ( $\times 10^4 \text{ m}^3$ )	$V_{\text{ini}}$ ( $\times 10^4 \text{ m}^3$ )	$q_{\max}$ ( $\times 10^4 \text{ m}^3$ )	$q_{\min}$ ( $\times 10^4 \text{ m}^3$ )
H1	240	80	100	15	5

Ademais, o complexo de geração possui ainda unidades geradoras não despacháveis. O parque eólico possui quarenta aerogeradores com potência nominal de 15 MW, totalizando uma capacidade total de 300 MW. Para cada aerogerador, considera-se que a velocidade inicial para movimentação das pás é de 2 m/s, a velocidade de corte de movimentação das pás do aerogerador de 20 m/s e que a velocidade nominal do aerogerador de 4 m/s. Supõe-se ainda que a função densidade de probabilidade de Weibull, utilizada para gerar as amostras de dados da velocidade do vento possui fator de escala e fator de forma de 4,13 e 2,34, respectivamente. Esses dados se basearam nos valores de velocidade média do vento fornecidos pelo CRESESB (2023a).

Para o parque fotovoltaico, o estudo de caso considera que este possui uma capacidade instalada de 80 MWp. De acordo com a localização do complexo híbrido de geração de energia, entorno da Usina de Irapé, observou-se que a radiação média é de 5,29 Wh/m<sup>2</sup> (CRESESB, 2023b). Considerou-se ainda que o valor máximo de radiação solar é de 8,4 Wh/m<sup>2</sup>. Para geração dos dados de radiação utilizou-se uma função densidade de probabilidade normal com média 5,29 Wh/m<sup>2</sup> e desvio padrão 0,1.

As funções de custos de produção do parque eólico e fotovoltaico são apresentadas em (16) e (17) respectivamente. Essas funções são lineares e proporcionais à potência produzida, conforme Libraiz Junior (2022).

$$C_{Ej} = 8,08 \times P_{Ej} \quad (16)$$

$$C_{Fl} = 4,04 \times P_{Fl} \quad (17)$$

Considera-se, nessa simulação que o sistema híbrido deve atender a uma demanda de 520 MW, definida empiricamente para dar flexibilidade ao problema de otimização. Por sua vez, o custo total de geração corresponde ao somatório do custo de todas as unidades de geração, despacháveis e não-despacháveis. Sendo assim, o custo de cada unidade geradora está relacionado à quantidade de energia produzida em 1 hora.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos através da simulação do modelo de gerenciamento do sistema integrado de geração renovável (SIGR) apresentado no estudo de caso são apresentados nesta seção.

Ademais, como o modelo matemático proposto de gerenciamento do SIGR é um modelo estocástico, foram realizadas 2500 simulações, com intuito de obter um conjunto amostral abrangente. A taxa de convergência das simulações foi de 48,54%. O critério para avaliação da convergência foi o atendimento ao ponto factível que minimiza os custos de geração da planta híbrida de geração de energia. Os resultados apresentados foram determinados considerando-se os critérios para definição do ponto operacional considerando-se as variabilidades da radiação solar e da velocidade do vento. Dessa forma, os resultados serão apresentados estatisticamente com auxílio de uma “*box plot*”, cuja marca central, em vermelho, é a mediana, as bordas da caixa são os 25° e 75° percentis, os pontos que se estendem até o extremo são valores que o algoritmo considera não serem *outliers*, e, por sua vez, os *outliers* são plotados individualmente.

A Fig. 2 apresenta a variação dos custos para o espaço amostral que apresenta média \$8.613,152 e desvio padrão de 357,33. Observa-se que o custo dos recursos despacháveis, central hidrelétrica e termelétrica, apresenta maior variabilidade que o custo total do sistema. Isso pode ser explicado pelo fato de que essas unidades geradoras são despachadas dependendo da produção das unidades não despacháveis.

A variabilidade da geração fotovoltaica e eólica são apresentados na Fig. 3. Observa-se que para o modelo adotado, a variação da produção da geração eólica é maior que a da geração fotovoltaica, cujos desvios padrões são de 0,97 e 0,01, respectivamente. Tal fato, deve-se ao modelo de produção adotado que depende dos limites operacionais de cada aerogerador. Os dados de produção do sistema híbrido com menor custo, \$7.916,78, alcançado na rodada de número 1962, são apresentados na Tabela 4. Observa-se que a potência total que a planta deve gerar é de 520 MW. Considerando-se os limites operacionais definidos para o modelo de simulação, observa-se que o ponto operacional do sistema híbrido ocorre quando a produção da usina fotovoltaica (UFV) é maior. Os valores produzidos pelas termelétricas referem-se ao limite operacional mínimo de produção de cada unidade. Por sua vez, a produção da hidrelétrica, considerando seu custo e sua flexibilidade, depende da produção das outras unidades geradoras do sistema híbrido, atendo, assim, a demanda.

Ainda em relação ao ponto operacional de menor custo, destaca-se o atendimento das restrições operacionais do reservatório da usina hidrelétrica. Para que a hidrelétrica fosse capaz de produzir 538,01 kW, de acordo com o modelo adotado, o volume turbinado foi de  $0,325 \times 10^4 \text{ m}^3$ , e o volume final do reservatório foi de  $240 \times 10^4 \text{ m}^3$ , sendo necessário verter  $9,67 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,

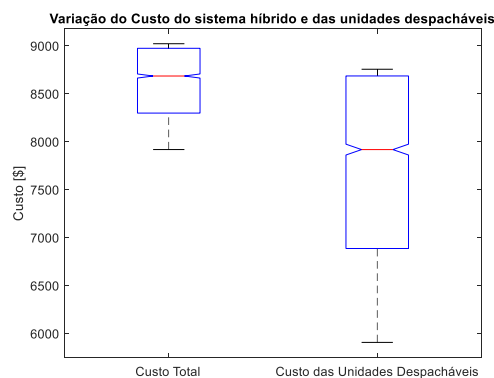


Fig. 2: Variação dos Custos do sistema híbrido de geração de energia.

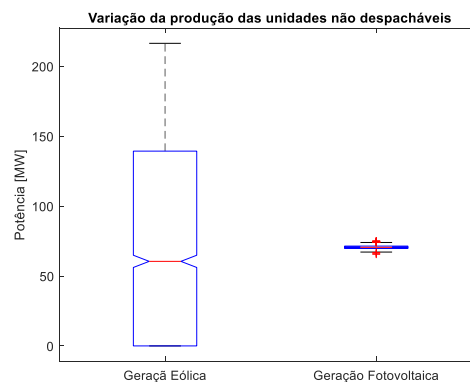


Fig. 3: Variação da produção das unidades geradoras não despacháveis.

Para fins de comparação, destaca-se que o ponto operacional com maior custo, \$9.020,27, ocorreu na rodada de número 706. Observe que na Tabela 4, o melhor cenário refere-se ao ponto operacional com menor custo, e o pior cenário ao ponto operacional com maior custo.

Observa-se que o ponto operacional com maior custo, isto é, o pior cenário, ocorre quando uma das unidades não despacháveis, no caso a eólica, não produz. Esse fato, de acordo com o modelo, pode ocorrer quando a velocidade do vento é menor que a velocidade mínima para rotação das pás dos aerogeradores ou quando a velocidade ultrapassa a velocidade máxima suportável pelas pás. Ainda, de acordo com o modelo, as termelétricas são despacháveis em seus limites inferiores de produção, devido aos seus custos de produção maiores que o da hidrelétrica. Assim, a hidrelétrica é utilizada para atender a demanda, ficando um volume de reservatório de  $233,95 \times 10^4 \text{ m}^3$ .

**Tabela 4 – Produção do sistema em diferentes cenários.**

Geradores	Produção [MWh]	
	Melhor cenário	Pior cenário
H1	0,538	219,12
G1	75,00	75,00
G2	60,00	60,0
G3	100,00	100,00
UFV	72,83	65,87
Eólica	211,64	0

Ademais, nota-se que o cenário simulado com menor custo, promove a complementaridade energética por meio da geração eólica e fotovoltaica, reduzindo o uso de usinas termelétricas e da hidrelétrica, os custos de energia, além de tornar o reservatório da usina hidrelétrica um armazenador natural de energia, que deve ser utilizada em cenários hidrológicos desfavoráveis, comuns ao norte mineiro.

Destaca-se ainda que o modelo de despacho que considera a intermitência da geração fotovoltaica e eólica, através de variáveis estocásticas, importante para análise de cenários hidrológicos favoráveis e desfavoráveis, contribuindo com uma tomada de decisão mais assertiva no gerenciamento de sistemas híbridos de geração de energia.

## 6. CONCLUSÕES

Sistemas híbridos combinam diferentes fontes de energia renovável, como solar e eólica, para aumentar a eficiência e a confiabilidade do sistema, reduzindo assim os custos de geração de energia. Além disso, a adoção de sistemas híbridos permite a utilização eficiente dos recursos disponíveis, mesmo em regiões onde a geração de energia renovável é intermitente ou irregular.

Em conclusão, como discutido neste trabalho, a adoção de sistemas híbridos de geração de energia renovável, combinada com o despacho econômico, é essencial para otimizar a operação de sistemas integrados de geração de energia renovável, minimizar custos e viabilizar a infraestrutura de conexão da usina ao SIN. Essas tecnologias devem ser amplamente adotadas no setor elétrico brasileiro, como parte de um esforço conjunto para alcançar metas de sustentabilidade ambiental e energética, ao mesmo tempo em que se mantém a confiabilidade e estabilidade do sistema de energia elétrica nacional.

## AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi realizada no âmbito da disciplina “Fontes Alternativas de Energia e Biocombustíveis”, e só foi possível graças à utilização da estrutura da UFVJM, campus Janaúba.

## REFERÊNCIAS

Araújo, T. F. A.; Uturbey W.; Nunes, L. C. *Short-term hydrothermal dispatch and demand management with evolutionary algorithms*. In: 2013 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering. IEEE, 2013. p. 259-264.

Brito, F. B. C., Siqueira, J. L. G., Turra, M. B., Moreira, M. A. C., Villela, F. R. *Participação da geração eólica e fotovoltaica da matriz energética brasileira – 2013 a 2017*, Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, v. 13, n. 1, p. 168-184, 2019.

CEMIG, UHE IRAPÉ Disponível em: <https://www.bcemig.com.br/usina/uhe-irape/>. Acessado em: 18 de janeiro de 2023.

da Silva, F. Z., & Rueda-Medina, A. C. *Um Método Híbrido de Otimização para Despacho Econômico e Alocação de GDs e Estações de Carregamento de Veículos Elétricos*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, v. 1, n. 1, 2020.

CRESESB. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*.< [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas\\_eolico](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico)> Acessado em 02/01/23

CRESESB. *Potencial Solar Sun Data v 3.0*. 2018.<<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>> . Acessado em 02/01/2023.

Empresa de Pesquisa Energética- EPE. *Planejamento Energético*. Disponível em:<<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/planejamento-energetico-e-a-epe>>. Acessado 18 de janeiro de 2023.

Lesaja, G. *Introducing interior-point methods for introductory operations research courses and/or linear programming courses*. The Open Operational Research Journal, vol. 3, pp1-12.

Libraiz Junior, P. H. *Despacho econômico de geração em sistemas de distribuição considerando geração térmica e eólica*. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP, 2022.

Luzzatto, A. *Despacho Econômico da geração de energia sob restrições de operações e perdas no Sistema Elétrico de Potência*. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2022. Acesso em: dez. 2022.

Oliveira, W. C. D. *Fluxo de potência ótimo probabilístico com fontes de geração renováveis: abordagem através de técnica de otimização matheurística*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP, 2020.

Portal Solar. *Crise energética no Brasil: impactos e consequências*, 2022. Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/crise-de-energia-no-brasil-e-no-mundo>>. Acesso em: 07 de janeiro de 2023.

Silva, F. J. R. D., Costa, D. A. C., Soares, F. S., Vieira, O. L., Carvalho, P. R. D., & Carvalho, P. C. M. D. *Fatores de forma e de escala da distribuição de probabilidade Weibull: um estudo de caso para dados de recursos eólicos da Região Nordeste do Brasil*. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 12, n.1, 2020.