

Modelo Matemático de Otimização

(Avaliação abrangente de novos modelos de negócios com Recursos Energéticos Distribuídos no Brasil após a Lei 14.300/2022)

Delberis A. Lima
Departamento de Engenharia Elétrica
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio
Rio de Janeiro, Brasil
e-mail: delberis@ele.puc-rio.br

Resumo— Nesse documento é apresentado o modelo matemático do artigo Avaliação abrangente de novos modelos de negócios com Recursos Energéticos Distribuídos no Brasil após a Lei 14.300/2022.

Palavras-chave— Otimização de Recursos Energéticos Distribuídos, Usina virtual, Lei 14.300/2022, Serviços ancilares.

NOMENCLATURA

Caracteres Maiúsculos

C_E^p	Custo de energia consumida na ponta [R\$]
C_E^{fp}	Custo de energia consumida na fora ponta [R\$]
C_E^{int}	Custo de energia consumida no intermediário [R\$]
C_{pv}	Custo por unidade de painel [R\$]
C_{inv}	Custo por unidade de inversor [R\$]
C_{bat}	Custo por unidade de bateria [R\$]
$C_{I_{pv}}$	Custo de investimento em painel [R\$]
$C_{I_{bat}}$	Custo de investimento em baterias [R\$]
$C_{I_{inv}}$	Custo de investimento em inversores [R\$]
C_{Anual}	Custo anual [R\$]
DOD	Profundidade de descarga das baterias [%]
$E_{b,d,h}^{G,p}$	Crédito Energético na ponta na barra b, para o dia/cenário d e hora h [kWh]

$E_{b,d,h}^{G,fp}$	Crédito Energético na fora ponta na barra b, para o dia/cenário d e hora h [kWh]
$E_{b,d,h}^{G,int}$	Crédito Energético no intermediário na barra b, para o dia/cenário d e hora h [kWh]
$E_{b,d,h}^{D,fp}$	Débito Energético na fora ponta na barra b, para o dia/cenário d e hora h [kWh]
$E_{b,d,h}^{D,int}$	Débito Energético no intermediário na barra b, para o dia/cenário d e hora h [kWh]
$E_{d,h}^{C(V),p}$	Contrato de Energia na tarifa verde A4 na ponta [kWh]
$E_{d,h}^{C(V),fp}$	Contrato de Energia na tarifa verde A4 na fora ponta [kWh]
$E_{d,h}^{C(B),p}$	Contrato de Energia na tarifa branca na ponta [kWh]
$E_{d,h}^{C(B),fp}$	Contrato de Energia na tarifa branca na fora ponta [kWh]
$E_{d,h}^{C(B),int}$	Contrato de Energia na tarifa branca no intermediário [kWh]
$E_{d,h}^{C(C),fp}$	Contrato de Energia na tarifa convencional na fora ponta [kWh]
$G_{b,d,h}^p$	Geração de Energia Fotovoltaica na barra b, para dia/cenário d e hora h [kWh]
H	Conjunto de horas definidas para um dia [$H = \{1:24\}$]
H^p	Conjunto de horas na ponta [$H^p = \{19,20,21\}$]
H^{fp}	Conjunto de horas na fora ponta [$H^{fp} = \{1,2, \dots, 17,23,24\}$]
H^{int}	Conjunto de horas no intermediário [$H^{int} = \{18,22\}$]
M	Parâmetro auxiliar de alto valor
P_{bat}	Potência da bateria [kW]
$T_E^{p(V)}$	Tarifa de energia verde A4 na ponta [R\$/kWh]
$T_E^{fp(V)}$	Tarifa de energia verde A4 na fora ponta [R\$/kWh]
$T_E^{(C)}$	Tarifa de energia convencional [R\$/kWh]
$T_E^{p(B)}$	Tarifa de energia branca na ponta [R\$/kWh]
$T_E^{fp(B)}$	Tarifa de energia branca na fora ponta [R\$/kWh]
$T_E^{int(B)}$	Tarifa de energia branca no intermediário [R\$/kWh]
$\Delta G_{b,d,h}$	Variável auxiliar para o crédito energético na barra b, para o dia/cenário d e hora h [kWh]
$\Delta D_{b,d,h}$	Variável auxiliar para o débito energético na barra b, para o dia/cenário d e hora h [kWh]

Caracteres Minúsculos

d^{FIO}	Taxa de desconto TUSD Fio B [%]
ef	Eficiência da bateria [%]
k	Taxa de desconto [%]
n	Vida útil do sistema

n_1	Vida útil das baterias
n_2	Vida útil dos painéis
n_3	Vida útil dos inversores
n_{bat}	Número total de baterias no sistema
n_b^{bat}	Número de baterias na barra b
n_{pv}	Número total de painéis no sistema
n_b^{pv}	Número de painéis na barra b
n_{inv}	Número total de inversores no sistema
n_b^{inv}	Número de inversores na barra b
$x_{h,b}$	Vetor que indica o percentual de carga da bateria na barra b e hora h [%]
$y_{h,b}$	Vetor que indica o percentual de descarga da bateria na barra b e hora h [%]
α_h	Percentual do Contrato de energia para diferentes tarifas na ponta [%]
β_h	Percentual do Contrato de energia para diferentes tarifas na fora ponta [%]

MODELO MATEMÁTICO

Nessa seção, será apresentado o modelo matemático de otimização da operação de REDs considerando arbitragem tarifária. O modelo fornece os contratos ótimos de energia para diferentes tarifas, bem como a operação do Sistema de Armazenamento de Energia (SAE). O modelo de otimização proposto minimiza o custo anual do sistema, e pode ser descrito por:

$$C_{Annual} = \min_{x_{b,h}, y_{b,h}, E_{b,d,h}^{G,p}, E_{b,d,h}^{G,fp}, E_{b,d,h}^{G,int}, \Delta G_{b,d,h}, E_{b,d,h}^{D,fp}, E_{b,d,h}^{D,int}, \Delta D_{b,d,h}, C_E^p, C_E^{fp}, C_E^{int}, E_{d,h}^{C(V),p}, E_{d,h}^{C(B),p}, E_{d,h}^{C(B),fp}, E_{d,h}^{C(B),int}, E_{d,h}^{C(C),fp}} C_E^p + C_E^{fp} + C_E^{int} + M \cdot \sum_{b \in B} \sum_{d \in D} \sum_{h \in H} \Delta G_{b,d,h} + \Delta D_{b,d,h} \quad (1)$$

s.a.

$$E_{b,d,h}^{G,p} = n_b^{pv} \cdot G_{d,h} + y_{b,h} \cdot n_b^{bat} \cdot DOD \cdot P_{bat} \cdot ef + \Delta G_{b,d,h} \quad \forall d, h \in H^p, b \in B \quad (2)$$

$$E_{b,d,h}^{G,fp} = n_b^{pv} \cdot G_{d,h} - x_{b,h} \cdot n_b^{bat} \cdot DOD \cdot P_{bat} + \Delta G_{b,d,h} \quad \forall d, h \in H^{fp}, b \in B \quad (3)$$

$$E_{b,d,h}^{G,int} = n_b^{pv} \cdot G_{d,h} - x_{b,h} \cdot n_b^{bat} \cdot DOD \cdot P_{bat} + \Delta G_{b,d,h} \quad \forall d, h \in H^{int}, b \in B \quad (4)$$

$$E_{b,d,h}^{G,p} \geq 0 \quad \forall d, h \in H^p, b \in B \quad (5)$$

$$E_{b,d,h}^{G,fp} \geq 0 \quad \forall d, h \in H^{fp}, b \in B \quad (6)$$

$$E_{b,d,h}^{G,int} \geq 0 \quad \forall d, h \in H^{int}, b \in B \quad (7)$$

$$\Delta G_{b,d,h} \geq 0 \quad \forall d, h \in H, b \in B \quad (8)$$

$$E_{b,d,h}^{D,fp} = x_{b,h} \cdot n_b^{bat} \cdot DOD \cdot P_{bat} - n_b^{pv} \cdot G_{d,h} + \Delta D_{b,d,h} \quad \forall d, h \in H^{fp}, b \in B \quad (9)$$

$$E_{b,d,h}^{D,int} = x_{b,h} \cdot n_b^{bat} \cdot DOD \cdot P_{bat} - n_b^{pv} \cdot G_{d,h} + \Delta D_{b,d,h} \forall d, h \in H^{int}, b \in B \quad (10)$$

$$E_{b,d,h}^{D,fp} \geq 0 \quad \forall d, h \in H^{fp}, b \in B \quad (11)$$

$$E_{b,d,h}^{D,int} \geq 0 \quad \forall d, h \in H^{int}, b \in B \quad (12)$$

$$\Delta D_{b,d,h} \geq 0 \quad \forall d, h \in H, b \in B \quad (13)$$

$$C_E^p = \sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^p}} \left(E_{d,h}^{C(V),p} - \alpha_h \cdot \sum_{b \in B} d^{FIO} \cdot E_{b,d,h}^{G,p} \right) T_E^{p(V)} + \left(E_{d,h}^{C(B),p} - (1 - \alpha_h) \cdot \sum_{b \in B} d^{FIO} \cdot E_{b,d,h}^{G,p} \right) \cdot T_E^{p(B)} \quad (14)$$

$$C_E^{fp} = \sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^{fp}}} \left(E_{d,h}^{C(B),fp} - \beta_h \cdot \sum_{b \in B} (d^{FIO} \cdot E_{b,d,h}^{G,fp} - E_{b,d,h}^{D,fp}) \right) \cdot T_E^{fp(B)} \\ + \left(E_{d,h}^{C(C),fp} - (1 - \beta_h) \cdot \sum_{b \in B} (d^{FIO} \cdot E_{b,d,h}^{G,fp} - E_{b,d,h}^{D,fp}) \right) \cdot T_E^{fp(C)} \quad (15)$$

$$C_E^{int} = \sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^{int}}} \left(E_{d,h}^{C(B),int} - \sum_{b \in B} (d^{FIO} \cdot E_{b,d,h}^{G,int} - E_{b,d,h}^{D,int}) \right) \cdot T_E^{int(B)} \quad (16)$$

$$\sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^p}} E_{d,h}^{C(V),p} \geq \sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^p}} \alpha_h \cdot \sum_{b \in B} d^{FIO} \cdot E_{b,d,h}^{G,p} \quad (17)$$

$$\sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^p}} E_{d,h}^{C(B),p} \geq \sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^p}} (1 - \alpha_h) \cdot \sum_{b \in B} d^{FIO} \cdot E_{b,d,h}^{G,p} \quad (18)$$

$$\sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^{fp}}} E_{d,h}^{C(B),fp} \geq \sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^{fp}}} \beta_h \cdot \sum_{b \in B} (d^{FIO} \cdot E_{b,d,h}^{G,fp} - E_{b,d,h}^{D,fp}) \quad (19)$$

$$\sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^{int}}} E_{d,h}^{C(B),int} \geq \sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^{int} \\ b \in B}} (d^{FIO} \cdot E_{b,d,h}^{G,int} - E_{b,d,h}^{D,int}) \quad (20)$$

$$\sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^{fp}}} E_{d,h}^{C(C),fp} \geq \sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^{fp}}} (1 - \beta_h) \cdot \sum_{b \in B} (d^{FIO} \cdot E_{b,d,h}^{G,fp} - E_{b,d,h}^{D,fp}) \quad (21)$$

$$\sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^{fp} \\ b \in B}} d^{FIO} \cdot E_{b,d,h}^{G,fp} \geq \sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^{fp} \\ b \in B}} E_{b,d,h}^{D,fp} \quad (22)$$

$$\sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^{fp} \\ b \in B}} d^{FIO} \cdot E_{b,d,h}^{G,int} \geq \sum_{\substack{d \in D \\ h \in H^{fp} \\ b \in B}} E_{b,d,h}^{D,int} \quad (23)$$

$$x_{b,h} = 0, h \in H^p, b \in B \quad (24)$$

$$x_{b,h} \geq 0, h \in H^{fp}, b \in B \quad (25)$$

$$x_{b,h} \geq 0, h \in H^{int}, b \in B \quad (26)$$

$$y_{b,h} = 1 \quad \forall h \in H^p, b \in B \quad (27)$$

$$y_{b,h} = 0 \quad \forall h \in H^{fp}, b \in B \quad (28)$$

$$y_{b,h} = 0 \quad \forall h \in H^{int}, b \in B \quad (29)$$

$$x_{b,h} \leq 0,5 \quad \forall h \in H, b \in B \quad (30)$$

$$\sum_{h \in H^p} y_{b,h} = \sum_{h \in H^{fp}} x_{b,h} + \sum_{h \in H^{int}} x_{b,h} \quad \forall b \in B \quad (31)$$

A função objetivo (1) pode ser subdividida em duas componentes: a primeira consiste na exposição dos balanços de custos entre energia e contrato para os distintos postos tarifários (C_E^p , C_E^{fp} e C_E^{int}); a segunda parte exhibe as penalizações referentes às variáveis auxiliares ΔG e ΔD . As expressões (2)-(4) descrevem o crédito energético para os diferentes postos tarifários. No período de ponta, representado pela restrição (2), o crédito energético é igual à energia gerada pelos painéis fotovoltaicos e pela descarga das baterias. Durante os períodos de fora de ponta e intermediário (restrições (3) e (4), respectivamente), o crédito energético é igual à energia gerada pelos painéis descontada da carga das baterias. A introdução da variável auxiliar ΔG evita que essas restrições tenham valores negativos. Em outras palavras, se a carga das baterias em algum momento do dia exceder a geração dos painéis fotovoltaicos, o crédito de energia será igual a zero. As expressões (5) - (8) garantem que o crédito energético e a variável auxiliar ΔG sejam maiores ou iguais a zero para todo período.

As equações (9) - (10) exemplificam o débito de energia quando a carga das baterias excede a geração dos painéis fotovoltaicos. A variável auxiliar ΔD tem o mesmo propósito que ΔG , assegurar que o débito de energia não seja menor que zero. As expressões (11) - (13) garantem que o débito energético e a variável auxiliar ΔD sejam maiores ou iguais a zero para todo período. Vale ressaltar que o débito de energia no período tarifário de ponta não existe, já que não há geração fotovoltaica neste horário.

As equações (14) - (16) descrevem o equilíbrio de custo entre energia e contrato. Durante os períodos de ponta e fora de ponta, podem existir contratos com diferentes tipos de tarifa. Portanto, o modelo estabelece esses contratos por meio dos fatores α_h (ponta) e β_h (fora de ponta). Especificamente no período de ponta, $\alpha_h = 0,7$, significando dizer que 70 % do contrato de energia para ponta será para tarifa verde, enquanto 30 % serão para tarifa branca. No período de fora de ponta, $\beta_h = 0,7$, significa dizer que 70 % do contrato de energia para fora de ponta será para tarifa branca, enquanto 30 % serão para tarifa convencional. Por fim, no período intermediário 100 % do contrato é para tarifa branca.

As equações (17) - (21) asseguram que os contratos de energia sejam maiores ou iguais à energia líquida. Além disso, é garantido que o crédito energético seja sempre maior que o débito, conforme estabelecido pelas equações (22) e (23).

As equações (24) - (30) são empregadas para determinar a operação de carga e descarga das baterias ao longo do dia, enquanto a equação (31) estabelece que a quantidade total descarregada deve ser igual à quantidade total carregada. Para manter o controle da tensão e garantir a longevidade das baterias, é imposto um limite de 50 % de sua capacidade nominal para a carga, evitando que sejam carregadas além desse valor.

TARIFAS DE ENERGIA

Nessa análise, os REDs foram distribuídos em 10 barramentos distintos, com 4 FV, 2 sistemas híbridos (FV e SAE) e 4 SAE. A Tabela 1 apresenta as tarifas de energia utilizadas no modelo proposto.

Tabela 1: Tarifas de energia.

Tarifa Verde	
Ponta	R\$ 2,32 /kWh
Fora ponta	R\$ 0,34 /kWh
Tarifa Branca	
Ponta	R\$ 1,82 /kWh
Fora ponta	R\$ 0,63 /kWh
Intermediário	R\$ 1,14 /kWh
Tarifa Convencional	
	R\$ 0,76 /kWh

CUSTO DO INVESTIMENTO

O custo do investimento, para efeito de simplicidade, equivale aos custos de compra dos painéis fotovoltaicos, baterias e inversores. Foram desconsiderados os custos com demais equipamentos elétricos e estruturais, custos de instalação, projeto de engenharia e de operação (OPEX), assim como a taxa de degradação dos componentes. A Tabela 2 apresenta os preços por unidade, vida útil e quantidade dos painéis fotovoltaicos, baterias e inversores utilizados no projeto. O preço unitário dos painéis fotovoltaicos, baterias e inversores foram retirados de (SULMINISTROS DEL SOL, 2023), (EGITO ENERGIA SOLAR, 2023) e (EPE, 2022), respectivamente. Já as quantidades e especificações técnicas são dados reais do projeto.

Tabela 2: Preços por unidade, vida útil e quantidade dos painéis fotovoltaicos, baterias e inversores.

	Quantidade	Preço/u.	Vida útil
Painel de 545 Wp	1080	R\$ 1.690,00	25 anos
Bateria de íon de Li 239 kWh	6	R\$ 876.652,00	10 anos
Inversor 100 TL	12	R\$ 35.093,76	20 anos

REFERÊNCIAS

EGITO ENERGIA SOLAR. Modelo e Preço do Painel Fotovoltaico. Disponível em: <https://egitosolar.com.br/placa-solar-canadian-545w-cs6w-hiku6-144-celulas-mono> . Acesso em: ago. 2023.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **PDE 2032, outubro de 2022**. Caderno de Micro e Minigeração Distribuída & Baterias. EPE, 2022.

SULMINISTROS DEL SOL. Modelo e Preço do Inversor. Disponível em: <https://suministrodelsol.com/en/grid-inverter/817-ingecon-sun-3play-100tlm-de-100kw-three-phase-grid-inverter.html> . Acesso em: ago. 2023.