

## ESTUDO DA SENSIBILIDADE DE UM SISTEMA OTIMIZADO DE MULTI-GERAÇÃO SIMPLES DE ENERGIA RENOVÁVEL COM PYTHON

---

*Data de submissão: 20/02/2025*

*Data de aceite: 05/03/2025*

### **Igor Francisco Tavares Soares**

Discente de graduação em Engenharia Elétrica - IFBA. Bolsista de Iniciação Científica do FAPESB/IFBA

### **Danielle Bandeira de Mello Delgado**

Professora do Curso de Engenharia Elétrica – IFBA

### **João Pedro Lima Dantas**

Discente de graduação em Engenharia Elétrica - IFBA

### **Josué Alves Araújo Neto**

Discente de graduação em Engenharia Elétrica - IFBA

essa temática, é possível notar também, segundo (Hasnaoui; Omari; Azzouz, 2022), que a principal preocupação referente a pesquisas sobre energias renováveis são os fatores climáticos e de estoque energético, pois os combustíveis fósseis, que são uma das principais fontes de energia, estão com suas reservas para acabar e além disso, os mesmos são os principais vilões quando se trata da poluição por emissão de poluentes e aumento do aquecimento global. Portanto, faz-se necessário pesquisas mais detalhadas sobre a transição energética.

No cenário que se constrói, trazendo para o tema de multi-geração, essa aplicação é promissora pois garante uma autonomia com a otimização dos gastos com energia elétrica da rede, garante maior eficiência energética e não polui o meio ambiente. Contudo, essa transição energética evidencia problemas complexos para a implementação desses novos modelos devido a dificuldade do dimensionamento das estruturas de modo a garantir o fluxo ótimo de energia em

## INTRODUÇÃO

No decorrer do tempo, pautas como energias renováveis, geração descentralizada, minigeração, multi-geração e sistemas autônomos de geração, estão cada vez mais presentes no cenário da produção de energia limpa, além de trazer garantia de redução de custos, autonomia e facilidade de operação para os usuários. No que concerne a

equilíbrio com investimentos e com ferramentas de controle eletrônico capazes de lidar com a comutação de consumo entre o sistema em questão e a rede elétrica, tornando-se relevantes os estudos aprofundados sobre os desafios desta, sobre o controle, logística, fatores de investimento e econômicos (Hasnaoui; Omari; Azzouz, 2022; Toughzaoui *et al*, 2023; Kong; Lyu; Miyatake, 2023).

Assim, com base nessas informações, cientistas estão cada vez mais nutrindo-se das técnicas de otimização devido a correlação da palavra com a aplicabilidade em âmbitos reais. Nesse aspecto, torna-se viável portanto a utilização dessas para tentar contornar os desafios gerados pelos sistemas de multi-geração como por exemplo a disposição ótima de equipamentos para geração própria, maximização de energia e redução de custos.

Baseado nisso, as técnicas de otimização clássicas tais como Programação Linear (PL) e derivações como Programação Linear Inteira (PLI) e Linear Inteira Mista respectivamente (PLIM), Heurísticas e Meta-Heurísticas, são alternativas interessantes para garantir a implementação desses sistemas no futuro. Nessa perspectiva, a PLIM é um modelo interessante para implementação para o caso citado, pois a mesma trabalha com constantes inteiras, fazendo-se assim analogia com equipamentos em um sistema de geração descentralizado hipotético além de apresentar melhor desempenho de resultados quando comparado com Heurísticas (Mohan *et al*, 2023). Além disso, segundo Belfiore e Fávero (2013), quando se trata da aplicação de otimização, é necessário a utilização de um conceito denominado Análise de Sensibilidade, que permite informações mais detalhadas acerca do ponto ótimo encontrado por essas técnicas de otimização, para assim conferir a viabilidade de implementação do referido sistema.

A partir dessas informações, acerca do tema multi-geração, agora com enfoque em sistemas residenciais, este trabalho tem como objetivos:

- Maximizar a capacidade de geração de energia de um sistema simples com a disposição ótima da quantidade de equipamentos para cada aplicação por meio de PLIM em códigos na linguagem python;
- Comparar os resultados antes e depois da mudança nos parâmetros operacionais do sistema residencial através da Análise de Sensibilidade;
- Checar a viabilidade da implementação do sistema ótimo robusto ao longo das mudanças nos parâmetros.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para a elaboração do sistema simples, foi considerado o uso de painéis solares e caldeiras de biomassa, dispostos como as variáveis da formulação matemática, de modo a se obter a configuração ótima da quantidade de equipamentos para atender cinco fatores: Compensação de eletricidade residencial, eletricidade para gerir equipamentos

aquecedores, eletricidade para equipamentos resfriadores, energia térmica também para água quente, e ainda eletricidade para carregamento de carro elétrico.

As constantes envolvidas foram divididas em operacionais, delimitadoras e energéticas. As constantes operacionais foram obtidas através dos *datasheets* dos equipamentos, as delimitadoras e energéticas foram obtidas com base nas atividades econômicas e estruturais de um complexo residencial de 20 apartamentos, aliados a um consumo mensal de 400 kWh, com uma área disponível de 10000 metros quadrados.

Em sequência, a modelagem foi feita seguindo a literatura de formulação de problemas de maximização, através da elaboração da função objetivo max atrelada às variáveis estruturais e parâmetros fixos e das restrições relacionadas a essas. A função objetivo de maximização de energia com base na justaposição quantificada dos equipamento foi elaborada, abaixo, da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \max = & 41. x_{\text{Painel}} + 41. x_{\text{água quente}} + 41. x_{\text{resfriamento}} + 41. x_{\text{carro}} \\ & + 4800. x_{\text{caldeira}} \#(1) \end{aligned}$$

Nas quais:

$x_{\text{Painel}}$  é a quantidade de painéis destinados a compensação de eletricidade do consumo de Tomadas de Uso Geral TUG e Tomadas de Uso Específicos TUE;

$x_{\text{água quente}}$  é a quantidade de painéis destinados a compensação eletricidade na operação dos sistemas de água quente e aquecimento;

$x_{\text{resfriamento}}$  é a quantidade de painéis destinados a compensação de eletricidade para os sistemas de refrigeração;

$x_{\text{carro}}$  é a quantidade de painéis destinados a compensação de eletricidade para estação de carregamento de carro elétrico;

$x_{\text{caldeira}}$  é a quantidade de caldeiras de biomassa para atuar também na produção de água quente;

As constantes são os valores de energia em kWh mensais geradas por aparelho inserido.

E essa função objetivo max, foi sujeita às seguintes restrições de constantes operacionais e delimitadoras abaixo:

Restrição de área de instalação, em m<sup>2</sup>:

$$1.5. (x_{\text{Painel}} + x_{\text{água quente}} + x_{\text{resfriamento}} + x_{\text{carro}}) + 30. x_{\text{caldeira}} \leq 10000 \#(2)$$

Restrição de investimento fixo, em R\$:

$$859. (x_{\text{Painel}} + x_{\text{água quente}} + x_{\text{resfriamento}} + x_{\text{carro}}) + 20000. x_{\text{caldeira}} \leq 300000 \#(3)$$

Restrição de custo de manutenção anual, em R\$:

$$0,8. (x_{\text{Painel}} + x_{\text{água quente}} + x_{\text{resfriamento}} + x_{\text{carro}}) + 198. x_{\text{caldeira}} \leq 10000 \#(4)$$

Restrições de mínimas quantidades devido aos valores mínimos de energia mensal solicitada por aplicação:

$$(x_{\text{painel}}) \geq 117 \#(5)$$

$$(x_{\text{água quente}}) \geq 24 \#(6)$$

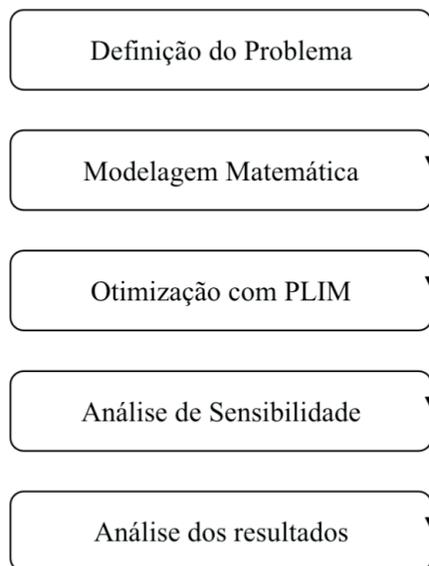
$$(x_{\text{resfriamento}}) \geq 19 \#(7)$$

$$(x_{\text{carro}}) \geq 9 \#(8)$$

$$0.21 \leq x_{\text{caldeira}} \leq 2 \#(9)$$

Para a solução, foi utilizado o método de PLIM, escrito através da linguagem Python em uma interface de desenvolvimento (IDE), em conjunto com a biblioteca de otimização do Google, a *OrTools* que implementa o método PLIM na linguagem utilizada.

Posteriormente, foi feita a Análise de Sensibilidade para comparação dos resultados e tirada das informações. Pode-se observar, na Figura 1, de maneira simplificada a metodologia de resolução.



**Figura 1** - Resolução de um problema de otimização simples

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a elaboração dos códigos e obtenção dos resultados do ponto maximizado de geração de energia, os mesmos foram expostos na Tabelas 1, relativa ao valor da função objetivo perante os cenários hipotéticos e a Tabela 2 referente aos valores , para contribuição com a análise do contexto em questão.

N°	Configuração/Cenário	max	Não viável
1	Configuração normal	21982 kWh	nenhum
2	Dobro do investimento inicial	36291 kWh	nenhum
3	Metade do investimento inicial	0 kWh	todos
4	Dobro dos preços dos equipamentos	0 kWh	todos
5	Metade dos preços dos equipamentos	36291 kWh	nenhum
6	Dobro da área de instalação	21982 kWh	nenhum
7	Metade da área de instalação	21982 kWh	nenhum

**Tabela 1** - Ponto ótimo devido à mudança nos parâmetros

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

	max	$x_{\text{painel}}$	$x_{\text{água quente}}$	$x_{\text{resfriamento}}$	$x_{\text{carro}}$	$x_{\text{caldeira}}$	Total
21982 kWh	N° de equipamentos	117	35	100	50	2	304
	Área m <sup>2</sup>	175,5	52,5	150	75	60	513
	Investimento R\$	100503	30065	85900	42950	40000	299418
	Manutenção R\$	93,6	28	80	40	396	637,6
36291 kWh	N° de equipamentos	376	125	100	50	2	653
	Área m <sup>2</sup>	564	187,5	150	75	60	1036,5
	Investimento R\$	322984	107375	85900	42950	40000	599209
	Manutenção R\$	300,8	100	80	40	396	916,8

**Tabela 2** - Ponto ótimo devido à mudança nos parâmetros

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com base nos valores dos pontos ótimos da função max, mencionados na tabela 1, os casos 1, 2, 5, 6 e 7 resultaram em pontos otimizados e viáveis em todas as variáveis, nos quais 1, 6 e 7 se equiparar, indicando uma solução forte, já os demais, 2 e 5, apresentaram o mesmo ponto ótimo, trazendo a tona a relação inversa entre preço e investimento garantirem soluções ótimas amplificadas. O tópico “Não viável” foi direcionado para caracterizar as variáveis que não atingiram o mínimo de geração viável para sua destinada aplicação, devido a potência literal necessitada para cada aplicação do centro residencial limitar essas certas variáveis a um valor mínimo de potência mensal em kWh. Ainda sobre a Tabela 1, também foi possível observar, nos casos 3 e 4 a variação nos parâmetros, que, quando caíram a 0 kWh instalados, a indicação foi a de não viabilidade de implementação do protótipo.

Acerca da Tabela 2, quando filtrados os números coletados das variáveis no *software*, para o exemplo onde os pontos ótimos se efetivaram, no ponto 21982 kWh, a

economia de área foi de 9487 m<sup>2</sup>, já no ponto de 36291 kWh, o reaproveitamento de área foi de 8963,5 m<sup>2</sup> livre. A respeito dos valores de economia, no primeiro ponto, ao efetuar a diferença entre tudo investido e o custo, houve um balanço positivo de 9944,4 R\$ em saldo, já no segundo ponto ótimo, 19874,2 R\$.

Como também observado na Tabela 2, a superestrutura teve seu tamanho aumentado devido ao aumento de área e do número de equipamentos em 140 unidades.

O abate na conta de luz, considerando um uso de 4800 kWh, para uma resposta segundo a Tabela 2, de 4797 kWh, o valor de uso da rede elétrica foi de 3 kWh, para o primeiro ponto. No segundo, a margem mudou para 10616 kWh gerado em excedência. A lógica se manteve equalizada para as demais variáveis.

## CONCLUSÕES

O estudo mostrou que com a aplicação de técnicas de otimização com PLIM se mostrou satisfatório, fornecendo dados finais importantes para fazer o balanço comparativo contra o consumo da própria rede elétrica, e contra implementação com logística humana sem planejamento computacional, melhorando assim a logística de maneira mais rápida e eficiente, abatendo os valores energéticos antes demandados da rede, e otimizando o máximo possível de espaço destinado ao uso dos equipamentos.

A partir disso, com base na análise feita acerca dos resultados, foi possível concluir que, observando os casos 6, 7, às perturbações de área não surtem efeito direto na instalação aumentada, sendo assim, para aumentar a área aproveitada, a única forma que o sistema se mostrou viável foi aumentando o valor dos investimentos para os casos 2 e 5, já que para um cenário econômico, a redução dos custos seria hipotética. Outro ponto interessante que foi possível encontrar com esse estudo foi que o sistema se mostrou passível de redistribuição dos excessos de fluxo energético, pois em ambos os pontos ótimos de max, o primeiro, houve uma redução de 4797 kWh numa referência de 4800 kWh, e no segundo, uma geração excedida de 10616 kWh, indicando assim a viabilidade do sistema para o mercado de créditos de energia. O mesmo foi possível observar em relação às demais variáveis.

Por fim, com base no estudo simplificado acerca da otimização residencial, ainda gera impasses operacionais, como o fator área, que para o âmbito de geração de energia, a área se mostra um ponto limitante visto a aplicabilidade ser em zonas residenciais, delimitando assim o aumento significativo na geração.

Acerca disso, ainda há desafios operacionais para a implementação desses sistemas inteligentes de energia, e para trabalhos futuros, fica-se sugestões como, o controle eletrônico entre troca comutativa de rede elétrica e sistema inteligente, análise dos transitórios envolvidos nessas trocas e previsão de geração solar com Inteligência Artificial (IA) para a compensação dos excedentes de energia elétrica calculada pelos softwares.

## REFERÊNCIAS

BELFIORE, Patrícia; FÁVERO, Luiz Paulo. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Elsevier Brasil, 2013.

HASNAOUI, Abir; OMARI, Abdelhafid; AZZOUZ, Zin-Eddine. Optimization of Building Energy based on Mixed Integer Linear Programming. **2022 2Nd International Conference On Advanced Electrical Engineering (Icaee)**, Constantine, Algeria, p. 1-6, 29 out. 2022. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/icaee53772.2022.9962068>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9962068>. Acesso em: 30 abr. 2024.

KONG, Deshi; LYU, Mingyu; MIYATAKE, Masafumi. Cooperative optimization of capacity and energy management of hybrid energy storage system in rail transit system based on non-dominated sorting genetic algorithm-II and mixed-integer linear programming. **2023 26Th International Conference On Electrical Machines And Systems (Icems)**, Zhuhai, China, p. 1981-1986, 5 nov. 2023. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/icems59686.2023.10344856>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10344856>. Acesso em: 30 abr. 2024.

MOHAN, Anjali *et al.* A Comparative Study on Genetic Algorithm and Mixed Integer Linear Programming based Optimal Home Energy Management System. **2023 IEEE International Conference On Power Electronics, Smart Grid, And Renewable Energy (PESGRE)**, Trivandrum, India, p. 1-6, 17 dez. 2023. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/pesgre58662.2023.10405071>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10405071>. Acesso em: 30 abr. 2024.

TOUGHZAOU, Yassine *et al.* System Sizing and Energy Management Optimization using a Hybrid Model. **2022 10Th International Conference On Systems And Control (Icsc)**, Marseille, France, p. 397-402, 23 nov. 2022. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/icsc57768.2022.9993857>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9993857>. Acesso em: 30 abr. 2023.