

OPERAÇÃO OTIMIZADA DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO ON-GRID VIA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Palavras-Chave: Painel fotovoltaico, Eficiência energética, Modelagem numérica, Otimização

Autores(as):

Yunes Said Aurabi, FECFAU - UNICAMP

Prof^(a). Dr^(a). Vinícius de Carvalho Neiva Pinheiro (orientador), FECFAU - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Quanto mais complexo e mais componentes estiverem no sistema de geração on-grid, mais fluxos de energia são possíveis. Por isso, o sistema em si, de forma isolada, não opera para determinar qual é a melhor decisão a ser tomada visando economia e eficiência energética. Dessa forma, é necessária a otimização do sistema, que garante o fluxo ótimo de potência entre os elementos presentes dependendo da incidência solar, nível da bateria, tarifa de energia adotada e preço do kWh.

METODOLOGIA:

O modelo proposto tem horizonte de 1 dia, com intervalos para a coleta de dados de no máximo 1 hora. Visando maior precisão, a resolução do modelo será a máxima dentro das limitações do software utilizado. O modelo terá os seguintes dados de entrada:

- Curva diária de geração fotovoltaica, que mostra a energia gerada pelo painel em cada intervalo de tempo de um dia. Esse valor representa a quantidade total de energia, que poderá ser utilizada para carregar a bateria e alimentar o sistema de iluminação. Serão avaliados 3 cenários de geração: Um dia nublado, um dia plenamente ensolarado e um dia com nuvens esparsas. Os dados serão coletados de uma edificação residencial real com 4 habitantes na cidade de Campinas.
- Curva diária de demanda por energia elétrica para o sistema de iluminação para uma edificação. A curva mostra o quanto um sistema de iluminação requer de energia em cada intervalo de tempo de um dia. Os dados (padrão de consumo residencial com iluminação) serão coletados de uma edificação residencial real com 4 habitantes na cidade de Campinas. Na interface do modelo, a curva de demanda será uma função da potência instalada no sistema de

iluminação. Esta potência instalada, por sua vez, será editável na interface para permitir diferentes simulações.

- Capacidade de armazenamento da bateria. Maior valor possível de energia elétrica que a bateria pode acumular através de seu carregamento. Esse valor será estimado em um pré-dimensionamento do sistema, mas também poderá ser facilmente alterado na interface do modelo desenvolvido em Excel.
- Preços de compra de energia elétrica. Valores que dependem da tarifa de energia usada. Valores referentes à tarifa convencional, branca e de precificação horária estão incluídos nos dados de entrada. Para as tarifas convencional e branca, serão usados valores reais para a cidade de Campinas-SP. A tarifa horária será fictícia, seguindo um padrão proposto por Soriano (2023).

O modelo proposto terá 2 procedimentos de operação: cenário básico e otimizado. O primeiro é regido por 3 regras que dependem da quantidade de geração, carga e energia armazenada. Estão inclusos momentos em que não tem sol, e consequentemente a potência no painel fotovoltaico é zero. Tais regras são:

- Se a geração for maior que a carga, o fluxo de energia é destinado ao abastecimento da carga e da bateria, nesta ordem.
- Se a geração for menor que a carga e há energia armazenada, a energia gerada no painel fotovoltaico e armazenada na bateria é transferida para a carga, nesta ordem.
- Se a geração for menor que a carga e não há energia armazenada, a energia gerada no painel fotovoltaico é destinada à carga. Além disso, há necessidade de compra da rede de distribuição, a fim do abastecimento completo da iluminação.

O modelo terá um horizonte (H) de um dia com discretização temporal de 30 minutos. Adiante, apresenta-se o equacionamento do modelo de otimização proposto. Destaca-se que algumas alterações podem ser realizadas ao longo do desenvolvimento do projeto, por necessidade ou conveniência.

A função objetivo é definida como a minimização dos gastos com compra de energia elétrica da rede ao longo do horizonte de simulação:

$$Z = \min_{t=0:H} C_t$$

O custo com compra de energia da rede é expresso por:

$$C_t = P_t R_t$$

Sendo C_t o custo com compra de energia da rede no intervalo de tempo t , P_t o preço da energia comprada da rede no intervalo de tempo t e R_t a quantidade de energia comprada da rede no intervalo de tempo t .

O balanço energético do sistema é definido pela seguinte equação:

$$S_t + R_t + B_t = D_t$$

Sendo S_t a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos no intervalo de tempo t , B_t é a energia fornecida ou absorvida pela bateria no intervalo de tempo t e D_t é a demanda, ou seja, o consumo de energia elétrica do sistema de iluminação no intervalo de tempo t .

A geração fotovoltaica e a demanda por energia são dados de entrada do modelo. As variáveis de controle são a compra de energia da rede e o carregamento ou descarregamento da bateria. O nível de carregamento da bateria em cada intervalo de tempo (SoC_t) é uma variável de estado que está sujeita à seguinte restrição:

$$0 \leq SoC_t \leq SoC_{max}$$

Sendo SoC_{max} a capacidade da bateria.

A simulação do circuito será feita com uma planilha do Excel. O *plug-in* Solver será utilizado no cenário otimizado para a determinação do fluxo ótimo de potência para cada intervalo de tempo a partir dos dados de entrada.

Como o modelo simulado é linear e determinístico, a otimização numérica será realizada pelo método Simplex, único método disponível para programação linear no *plug-in* Solver do Excel.

Os resultados da pesquisa serão comparados com um modelo formado pelos mesmos elementos, porém sem otimização. Dessa forma, mostrando que a gestão do uso do sistema de armazenamento pode minimizar os custos com energia elétrica no sistema proposto e em diferentes tarifas de energia.

A combinação entre as 3 condições de geração, 3 tarifas de precificação e 2 regras de operação resulta em 18 cenários. Os resultados serão analisados a partir da comparação entre cenários de mesmas condições de geração e tarifa, se diferenciando apenas pela regra de operação. Portanto, os resultados serão analisados através de 9 comparações, que visam mostrar o benefício econômico obtido ao otimizar o sistema.

Foram coletados dados de geração de hora em hora do dia 30/07/2025, que foi plenamente ensolarado. Tais dados foram dados de entrada na planilha, que determina a compra de energia, o carregamento e o descarregamento da bateria em cada hora do dia.

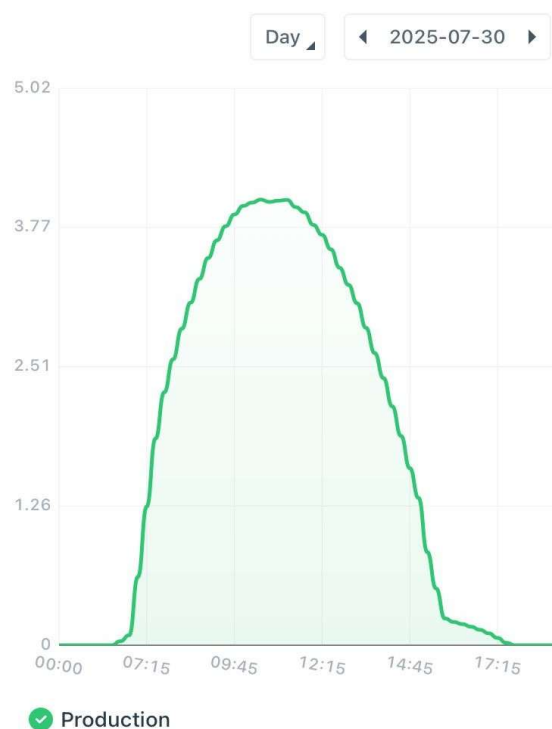


Figura 1 – Curva de geração do dia 30/07/2025

Intervalo	t_ini	t_fin	Geração solar (kWh)	Compra energia (kWh)	Tarifa	Gasto com energia	Demanda (kWh)	Carregamento (kWh)	Descarregamento (kWh)	Balanco energético (kWh)	SoC (kWh)	SoC (%)				
1	00:00	01:00	0,0	0,8	R\$ 1,00	R\$ 0,80	0,8	0	0	0,8	0	0%				
2	01:00	02:00	0,0	0,7	R\$ 1,00	R\$ 0,70	0,7	0	0	0,7	0	0%	Capacidade da bateria (kWh)			
3	02:00	03:00	0,0	0,7	R\$ 1,00	R\$ 0,70	0,7	0	0	0,7	0	0%	Carregamento inicial			
4	03:00	04:00	0,0	0,5	R\$ 1,00	R\$ 0,50	0,5	0	0	0,5	0	0%				
5	04:00	05:00	0,0	0,7	R\$ 1,00	R\$ 0,70	0,7	0	0	0,7	0	0%	sem bateria	R\$ 35,67		
6	05:00	06:00	0,0	0,8	R\$ 1,00	R\$ 0,80	0,8	0	0	0,8	0	0%	1	R\$ 30,67		
7	06:00	07:00	0,617	0,283	R\$ 1,00	R\$ 0,28	0,9	0	0	0,9	0	0%	2	R\$ 25,67		
8	07:00	08:00	2,579	0	R\$ 1,00	R\$ -	1	1	0	1,6	0	0%	3	R\$ 20,67		
9	08:00	09:00	3,492	0	R\$ 1,00	R\$ -	0,9	0	0	3,5	1	100%	4	R\$ 15,67		
10	09:00	10:00	3,963	0	R\$ 1,00	R\$ -	0,9	0	0	4,0	1	100%	5	R\$ 10,67		
11	10:00	11:00	4,010	0	R\$ 1,00	R\$ -	1,2	0	0	4,0	1	100%	6	R\$ 8,47		
12	11:00	12:00	3,791	0	R\$ 1,00	R\$ -	1,5	0	0	3,8	1	100%	7	R\$ 7,47		
13	12:00	13:00	3,251	0	R\$ 1,00	R\$ -	1,2	0	0	3,3	1	100%	8	R\$ 6,47		
14	13:00	14:00	2,409	0	R\$ 1,00	R\$ -	0,8	0	0	2,4	1	100%				
15	14:00	15:00	1,328	0	R\$ 1,00	R\$ -	0,8	0	0	1,3	1	100%				
16	15:00	16:00	0,210	0,49	R\$ 1,00	R\$ 0,49	0,7	0	0	0,7	1	100%				
17	16:00	17:00	0,107	0,793	R\$ 1,00	R\$ 0,79	0,9	0	0	0,9	1	100%				
18	17:00	18:00	0,0	0,5	R\$ 5,00	R\$ 2,50	1,5	0	1	1,5	1	100%				
19	18:00	19:00	0,0	2,2	R\$ 5,00	R\$ 11,00	2,2	0	0	2,2	0	0%				
20	19:00	20:00	0,0	1,6	R\$ 5,00	R\$ 8,00	1,6	0	0	1,6	0	0%				
21	20:00	21:00	0,0	1,2	R\$ 1,00	R\$ 1,20	1,2	0	0	1,2	0	0%				
22	21:00	22:00	0,0	1,2	R\$ 1,00	R\$ 1,20	1,2	0	0	1,2	0	0%				
23	22:00	23:00	0,0	1	R\$ 1,00	R\$ 1,00	1	0	0	1,0	0	0%				
24	23:00	00:00	0,0	0	R\$ 1,00	R\$ -	0,9	0	0,9	0,9	0	0%				

Tabela 1 – Operação otimização no Excel

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A operação otimizada foi feita com baterias de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 kWh e sem considerar a presença da bateria. O custo total para cada caso foi determinado a partir da soma do gasto com energia em cada horário. Nota-se que, quanto maior a capacidade da bateria, menor é o gasto com energia. Entretanto, a partir da bateria de 6 kWh de capacidade, a redução no custo total é menor do que o custo total utilizando as baterias de menor capacidade.

CONCLUSÕES:

A otimização trouxe resultados positivos no sistema proposto, visto que, os gastos com energia no sistema otimizado são menores que os gastos no mesmo sistema, porém sob a operação básica.

Para a escolha da bateria a ser adotada no sistema, deve-se levar em conta a economia nos gastos com energia e o custo da bateria em si. Isso ocorre, pois, baterias de maior capacidade, geram menos gastos, porém também tem custo mais elevado.

BIBLIOGRAFIA

IMAI, H. E. et al.. Simulação computacional como ferramenta de otimização na geração de energia solar fotovoltaica. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 12, p. e20190343, 2020.

SORIANO, Letícia. **Contribuição ao estudo da eficiência energética na operação de reservatórios urbanos de abastecimento de água com o uso de otimização e automação**. 2023. 1 recurso online (p.) Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/11734>. Acesso em: 11 set. 2024.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS) e altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 6 jan. 2023. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm. Acesso em: 11 set. 2024.

FICKEN, Frederick Arthur. The simplex method of linear programming. Courier Dover Publications, 2015.

SMALE, Steve. On the average number of steps of the simplex method of linear programming. Mathematical programming, v. 27, n. 3, p. 241-262, 1983.