

Capítulo II: Efeito da Temperatura em um kit didático de Geração Solar para uso noturno: Jornada de aprendizagem

Callebe Espanga da Cruz
John Everson Rodrigo Mello Jayme
Dra. Camila Fogaça de Oliveira

RESUMO

Com o objetivo de desenvolver um kit didático para demonstrar o funcionamento de um sistema fotovoltaico, foi necessário avaliar a eficiência do módulo fotovoltaico em relação à temperatura. Para isso, o módulo foi exposto a um conjunto de lâmpadas halógenas e foram coletados dados de temperatura por meio de um multímetro e uma câmera termográfica. Utilizando o software Curve Expert e o Método de Verhulst, analisamos os dados e determinamos um limite de temperatura para o funcionamento adequado do kit didático de geração solar noturna. Concluímos que a temperatura incidente não afeta o desempenho do sistema estando dentro do limite estabelecido.

Palavras-chave: Irradiação Solar. Sistema Fotovoltaico. Temperatura. Modelagem Matemática. Equações Diferenciais.

Evaluation of the Effect of Temperature in a Solar Generation didactic kit for night use

ABSTRACT

In order to develop a didactic kit to demonstrate the operation of a photovoltaic system, it was necessary to evaluate the efficiency of the photovoltaic module in relation to temperature. For this, the module was exposed to a set of halogen lamps and temperature data were collected by means of a multimeter and a thermographic camera. Using the Curve Expert software and the Verhulst Method, we analyzed the data and determined a temperature limit for the proper functioning of the nighttime

solar generation didactic kit. We conclude that the incident temperature did not affect the performance of the system being within the established limit.

Key words: Solar irradiation. Photovoltaic System. Temperature. Mathematical Modeling. Differential Equations.

1 INTRODUÇÃO

O desempenho dos módulos fotovoltaicos é influenciado por diversos parâmetros, incluindo a intensidade da irradiação solar, o ângulo de inclinação dos módulos, a temperatura ambiente, a sujidade, a umidade relativa e a velocidade do vento, conforme afirmado por Foltz (2021). Além disso, Villalva (2015) afirma que quanto maior a temperatura de incidência, menor será a tensão elétrica que o módulo fotovoltaico apresentará.

Para investigar a interferência da temperatura na transferência de potência elétrica em um módulo fotovoltaico, foi elaborado um modelo matemático baseado em um teste de temperatura. O teste consiste em determinar o tempo de incidência do calor produzido pelo banco de lâmpadas no módulo fotovoltaico. Segundo a Lei de Ohm, a potência é proporcional ao produto da tensão pela corrente que circula em um equipamento, portanto, quanto menor for a tensão, menor será a potência e consequentemente a eficiência do módulo.

Este teste foi realizado com o objetivo de determinar a temperatura limite entre o conjunto de geração forçada e um módulo fotovoltaico, a fim de disponibilizar uma nova metodologia de ensino para alunos das áreas de tecnologias e engenharias sobre o funcionamento de um sistema fotovoltaico. O projeto didático tem como propósito permitir que a irradiação solar projetada no módulo fotovoltaico produza energia elétrica e que, desta forma, os estudantes possam aprender sobre a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Energia solar fotovoltaica

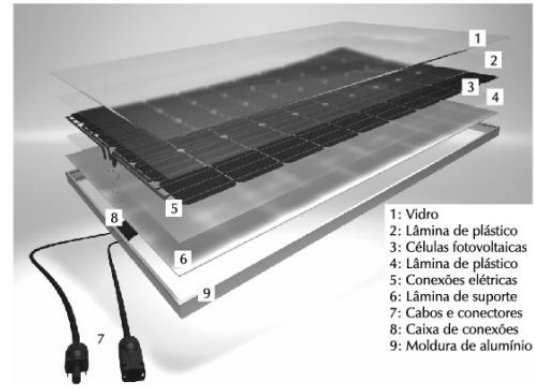
Segundo Villalva (2015), a transferência de energia em um sistema fotovoltaico ocorre por meio do movimento dos elétrons em camadas de semicondutores com dopagem apropriada quando expostos à radiação solar (Figuras 1 e 2), gerando uma corrente elétrica contínua.

Figura 1 – Usina de Eletricidade fotovoltaica



Fonte: Stockxchng.

Figura 2 – Componentes do módulo fotovoltaico



Fonte: Villalva (2015).

Ao contrário dos sistemas térmicos que utilizam a energia térmica do sol para gerar calor, nesse processo a corrente elétrica é coletada e passa por dispositivos de controle e conversão para corrente alternada, com modulação na mesma frequência e amplitude da rede elétrica. Essa corrente elétrica pode ser conectada simultaneamente à rede elétrica, proporcionando um fornecimento constante e confiável de energia elétrica.

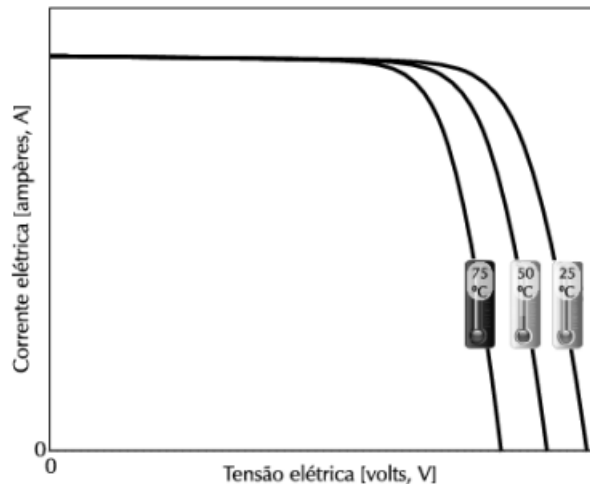
O módulo fotovoltaico é uma unidade básica do sistema fotovoltaico, composto por camadas de semicondutores com cargas negativas e positivas, camadas de proteção e construtivas, além de células fotovoltaicas que convertem a energia solar em energia elétrica. A instalação do módulo fotovoltaico é crucial para garantir um desempenho eficiente do sistema, e isso envolve a escolha de áreas adequadas, levando em conta fatores como a orientação solar, o ângulo de inclinação, a sombra e as condições climáticas locais.

A fixação do módulo também é uma etapa importante, pois é necessário garantir que ele esteja bem preso para suportar as condições de vento e outras adversidades. Além disso, é importante seguir as normas técnicas e de segurança durante a instalação para garantir a eficiência e a segurança do sistema.

2.2 Influência da temperatura

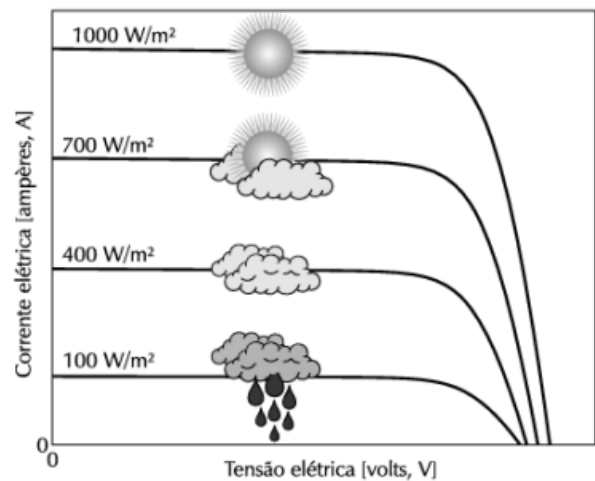
Segundo Villalva (2015), a temperatura é um fator que afeta a tensão no módulo fotovoltaico e, portanto, a potência que ele pode fornecer.

Figura 3 – Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico



Fonte: Villalva (2015).

Figura 4 – Influência da radiação solar na operação do módulo fotovoltaico



Fonte: Villalva (2015).

A Figura 3 ilustra que a tensão diminui à medida que a temperatura aumenta e vice-versa. A corrente fornecida pelo módulo, por outro lado, não é afetada pela temperatura. Isso significa que a potência fornecida pelo módulo diminui quando a temperatura aumenta, já que a potência é o produto da tensão e da corrente do módulo.

A quantidade de irradiação solar recebida em um módulo fotovoltaico varia em função das condições climáticas (Figura 4), como a presença de nuvens ou cobertura parcial ou total do sol, afetando diretamente a intensidade da radiação solar incidente no módulo. Isso pode resultar em uma redução da energia elétrica produzida pelo módulo fotovoltaico.

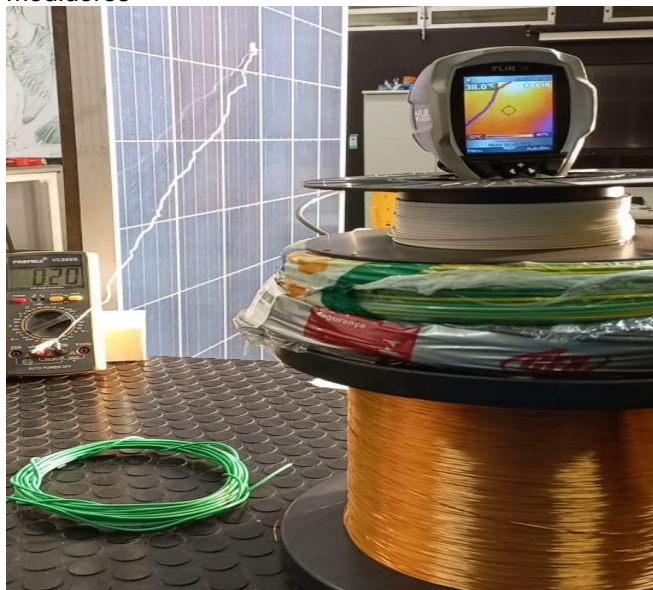
3 METODOLOGIA

O kit didático solar para estudo de energias renováveis durante o período noturno foi construído pelas turmas de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica como parte do projeto Jornada de Aprendizagem da Faculdade da Indústria Senai Londrina. Como o curso de graduação é noturno, não havia disponível um kit de energia solar para análise e verificação do seu funcionamento.

Para coletar dados sobre o efeito da temperatura no conjunto de lâmpadas halógenas, o módulo fotovoltaico foi posicionado a uma distância de 1000 mm de um banco de 8 lâmpadas halógenas de 300 W em uma sala específica (laboratório Maker). Foi feito o controle de temperatura (23°C, ambiente), desligando o ar-condicionado e deixando as janelas e portas abertas para permitir a maior refrigeração natural possível no ambiente de ensino.

Os valores de temperatura foram medidos utilizando dois instrumentos digitais de medição: um multímetro e uma câmera termográfica (Figuras 5 e 6). Além disso, a linha do tempo foi registrada com um gravador de vídeo de celular. A câmera termográfica foi fixada em um suporte estável e apontada para o centro da placa, enquanto o multímetro foi colocado próximo à placa, com sua ponta de medição de temperatura no centro da mesma.

Figura 5 – Dados de temperatura coletados com os medidores



Fonte: Dos autores.

Figura 6 – Valor de Tensão gerada pela placa medido com multímetro



Fonte: Dos autores.

Após a coleta de dados, as medições foram registradas e posteriormente inseridas manualmente em uma planilha eletrônica do Microsoft Excel. Os valores obtidos por meio do multímetro e da câmera termográfica foram organizados na Tabela 1, que apresenta as temperaturas registradas durante o experimento.

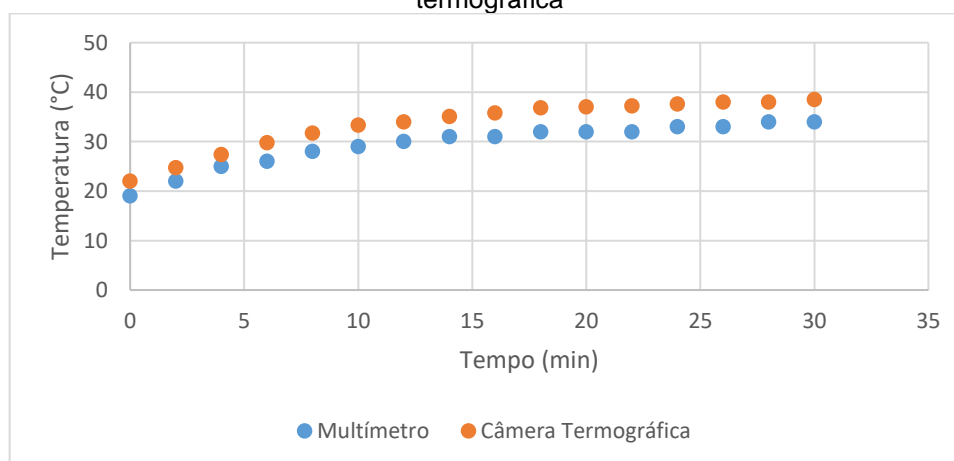
Tabela 1 – Dados coletados pelo Microsoft Excel

Tempo (min)	Temp. (°C) Multímetro	Temp. (°C) Câmera Termográfica
0	19	22,0
2	22	24,7
4	25	27,4
6	26	29,8
8	28	31,7
10	29	33,3
12	30	34,0
14	31	35,1
16	31	35,8
18	32	36,8
20	32	37,0
22	32	37,2
24	33	37,6
26	33	38,0
28	34	38,0
30	34	38,5

Fonte: Dos autores.

Com base nos dados apresentados na Tabela 1, é possível observar no Gráfico 1, a tendência da variação da temperatura registrada tanto pelo multímetro quanto pela câmera termográfica.

Gráfico 1 – Gráfico de comparação dos valores medidos com o multímetro e com a câmera termográfica



Fonte: Dos autores.

Nesse caso, temos como intuito observar a tendência dos dados, a fim de estimar a temperatura em qualquer instante de tempo.

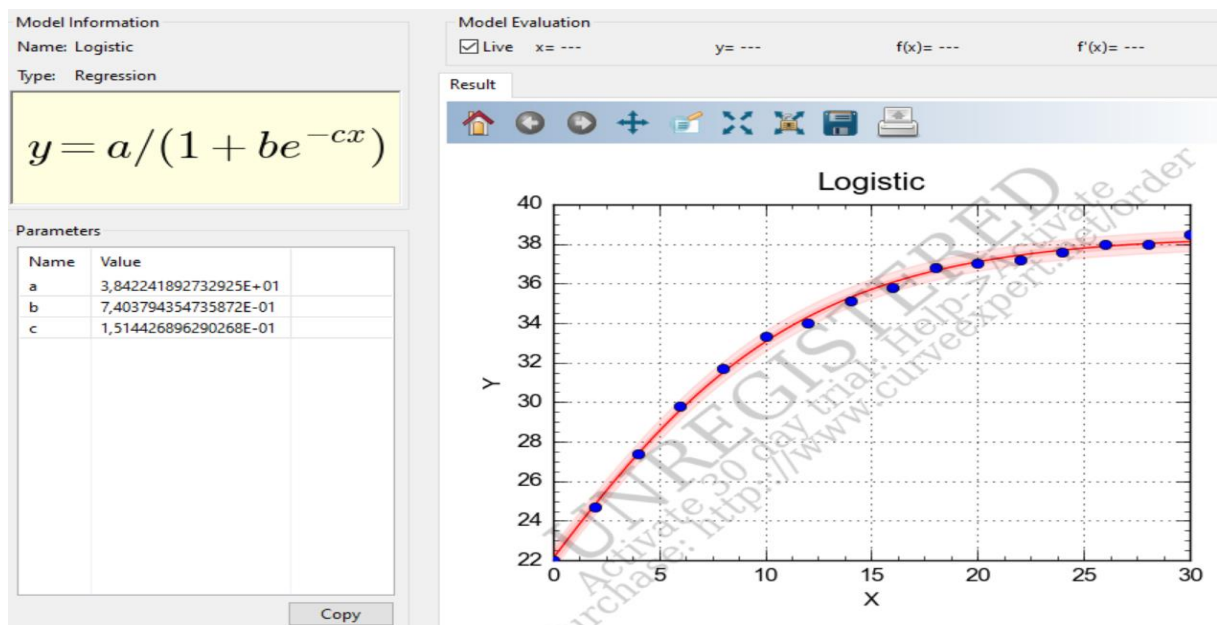
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Curve Expert

O software Curve Expert é uma ferramenta de ajuste de curvas e análise de dados, com suporte multiplataforma. Ele oferece uma ampla gama de opções para modelagem de dados e uma das suas principais vantagens é a capacidade de automatizar o processo de encontrar a melhor curva de ajuste, economizando tempo e esforço.

A Figura 7 ilustra o layout do programa e mostra o modelo logístico com a melhor aderência aos dados. O R^2 calculado, próximo a 1, indica que o modelo é satisfatório para análise das informações da Tabela 1.

Figura 7 – Modelo logístico



Fonte: Dos autores.

Nesse caso, o modelo matemático pode ser descrito por:

$$T(t) = \frac{38,4}{1 + 0,74e^{-0,1514t}}$$

onde $T(t)$ é a temperatura em graus Celsius e t é o tempo em minutos. O modelo Logístico prevê que o limite da temperatura entre o conjunto de geração forçada e o módulo fotovoltaico é de $38,4^{\circ}\text{C}$, ou seja,

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} T(t) = \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{38,4}{1 + 0,74e^{-0,1514t}} = \lim_{t \rightarrow +\infty} \frac{38,4}{1 + \frac{0,74}{e^{0,1514t}}} = 38,4^{\circ}\text{C}.$$

4.2 Método de Verhulst

Conforme Método de Verhulst podemos deduzir a variação de temperatura ao longo do tempo pela equação diferencial ordinária:

$$\frac{dT}{dt} = r \left(1 - \frac{T}{k} \right) T$$

Aplicando o método de separação de variáveis obtemos o seguinte resultado:

$$\int \frac{1 dT}{\left(1 - \frac{T}{k} \right) T} = \int r dt$$

Para resolver a EDO devemos aplicar o método das frações parciais:

$$\frac{1}{k} \int \frac{1}{1 - \frac{T}{k}} dT + \int \frac{1}{T} dT = \int r dt$$

Resolvendo as integrais em ambos os lados da equação, obtemos o valor da temperatura a um determinado tempo:

$$-\ln \left(1 - \frac{T}{k} \right) + \ln T = rt + c$$

$$e^{\ln \left(\frac{T}{1 - \frac{T}{k}} \right)} = e^{rt+c}$$

$$\frac{T}{1 - \frac{T}{k}} = C e^{rt}$$

Para encontrar o valor da constante C da integração, consideramos que a temperatura limite é de $k = 38,4^{\circ}\text{C}$ e a temperatura inicial de 22°C . Assim:

$$\frac{22}{1 - \frac{22}{k}} = C e^{r \cdot 0}$$

$$\frac{22}{1 - \frac{22}{38,4}} = C \cdot 1$$

Portanto, $C = \frac{22}{1 - \frac{22}{38,4}} = 51,51$.

Para encontrar o valor da constante r , consideramos $T(20) = 37\text{ }^\circ\text{C}$, nesse caso:

$$\frac{T}{1 - \frac{T}{38,4}} = 51,51e^{rt}$$

$$\frac{37}{1 - \frac{37}{38,4}} = 51,51e^{r \cdot 20}$$

$$1014,8571 = 51,51e^{r \cdot 20}$$

Temos que $e^{20r} = \frac{1014,8571}{51,51} = 19,7021$, ou seja, $r = \frac{\ln(19,7021)}{20} = 0,1490$.

Sendo assim, temos o modelo matemático para estimar os valores de temperatura de um kit didático de geração solar para uso noturno ao longo do tempo:

$$\frac{T}{1 - \frac{T}{38,4}} = 51,51e^{0,1490t}$$

$$T = 51,51e^{0,1490t} \left(1 - \frac{T}{38,4} \right)$$

$$T = 51,51e^{0,1490t} - \frac{51,51}{38,4}e^{0,1490t}T$$

$$1T + \frac{51,51}{38,4}e^{0,1490t}T = 51,51e^{0,1490t}$$

$$T \left(1 + \frac{51,51}{38,4}e^{0,1490t} \right) = 51,51e^{0,1490t}$$

$$T = \frac{51,51e^{0,1490t}}{1 + 1,3414e^{0,1490t}}$$

Dividindo em ambos os lados da equação por $1,3414e^{0,1490t}$ temos:

$$T(t) = \frac{38,4}{0,74e^{-0,1490t} + 1}$$

Podemos concluir que a temperatura obtida no experimento teve uma evolução não linear ao longo do tempo, com limitante de $38,4\text{ }^\circ\text{C}$. A Tabela 2 compara as temperaturas reais extraídas pela câmera termográfica e as medidas determinadas pelos modelos obtidos pelo software Curve Expert e Verhulst.

Tabela 2 – Comparação dos modelos matemáticos

Tempo (min)	Câmara Term. (°C)	Curve Expert (°C)	Verhulst (°C)
0	22,0	22,1	22,1
2	24,7	24,8	24,8
4	27,4	27,4	27,3
6	29,8	29,6	29,5
8	31,7	31,5	31,4
10	33,3	33,0	32,9
12	34,0	34,3	34,2
14	35,1	35,3	35,2
16	35,8	36,0	35,9
18	36,8	36,6	36,5
20	37,0	37,1	37,0
22	37,2	37,4	37,4
24	37,6	37,7	37,6
26	38,0	37,9	37,8
28	38,0	38,0	38,0
30	38,5	38,1	38,1

Fonte: Dos autores.

A temperatura ambiente ideal para o funcionamento de uma placa solar é de cerca de 25°C. No entanto, a temperatura real de operação pode variar significativamente devido a fatores externos, como as condições climáticas e as características do ambiente em que a placa está instalada.

A faixa de temperatura de operação das placas solares é um parâmetro crítico que deve ser levado em consideração ao selecionar um modelo específico para sua instalação. A maioria dos fabricantes disponibiliza essa informação em seus *datasheets*, indicando a faixa de temperatura que a placa pode suportar com segurança. Para placas solares convencionais, a faixa de temperatura de operação costuma variar entre -40°C e 85°C (Figura 8).

Figura 8 - Datasheet da placa utilizada produzida pela Balfar Solar

CLASSIFICAÇÕES DE TEMPERATURA		AVALIAÇÕES MÁXIMAS	
Coefficiente Operacional Nominal Temp	42±2°C	Temperatura Operacional	-40 – +85°C
Coefficiente de Temperatura de P _{max}	-0,38% / °C	Tensão Máxima do Sistema	1000V D C (IEC)
Coefficiente de Temperatura de V _{oc}	-0,28% / °C	Classificação Máxima dos Fusíveis das Séries	15A
Coefficiente de Temperatura de I _{sc}	0,04% / °C		

Fonte: Balfarsolar (2022).

É importante ressaltar que a eficiência da placa solar pode ser afetada negativamente se a temperatura ultrapassar os limites indicados no datasheet. Portanto, é fundamental avaliar a faixa de temperatura de operação do modelo escolhido para garantir a melhor performance e a longevidade da placa solar.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a realização das análises comparativas por meio de distintos métodos, observou-se que a placa fotovoltaica apresenta uma temperatura operacional significativamente inferior àquela estabelecida pelo fabricante como limite máximo. Essa conclusão aponta para a viabilidade do sistema fotovoltaico como recurso didático, em que se verifica que a temperatura não interfere na coleta de dados em diferentes condições estabelecidas pelo kit didático solar noturno.

REFERÊNCIAS

BALFARSOLAR. **Datasheet Mono 370 W.** Disponível em: <<https://balfarsolar.com.br/wp-content/uploads/2019/10/BALFAR-DATASHEET-MONO-370W.pdf>>. Acesso em: 21/06/2022.

FOLTZ, Laura Luana. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Fevereiro - 2021. **Avaliação e comparação da eficiência de painéis fotovoltaicos instalados na Unioeste, campus de Cascavel (PR), considerando diferentes inclinações e níveis de sujidade.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2021. Disponível em: <<https://www5.unioeste.br/portaunioeste/arq/files/PPGEA/Dissertacao.Laura.Foltz.pdf>>. Acesso em: 21/06/2022.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica.** 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2015.