

# **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

## **Comparação de Eficiência entre Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes e Terrestres.**

Por

**Michel Pereira Bueno Dias**

**Brasília, 08 de dezembro de 2023**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

# Resumo

O aumento da demanda por eletricidade tem levado a um crescente interesse por fontes de energia sustentáveis e eficientes. Nesse contexto, a energia solar tem se revelado um elemento crucial no cenário energético global e nacional. O Brasil, beneficiado por sua posição geográfica privilegiada e pela abundância de recurso solar, apresenta um potencial significativo para o desenvolvimento do setor fotovoltaico. Diante disso, o objetivo deste estudo visa analisar e comparar a eficiência de dois sistemas fotovoltaicos: um sistema flutuante e outro terrestre. O estudo é realizado na região de Brasília, onde são considerados dados meteorológicos específicos para simular a irradiância solar. A intenção é compreender as diferenças de desempenho resultantes da redução de temperatura proporcionada pelo ambiente aquático nos sistemas flutuantes. A metodologia adotada consiste em três fases. A primeira envolve a modelagem da irradiância no plano dos painéis solares para a localidade em questão. Na segunda fase, são avaliados a eficiência dos painéis solares terrestres, levando em conta o balanço energético e as condições ambientais. Por fim, a terceira fase amplia a análise para o sistema fotovoltaico flutuante, enfatizando a influência da temperatura da água na eficiência dos painéis. Os resultados indicam que os painéis flutuantes operam com temperatura geralmente mais baixa do que os terrestres, especialmente durante os meses com menor umidade relativa. Essa redução de temperatura contribui para uma eficiência ligeiramente maior dos painéis flutuantes, sendo um aumento de 0,62% na produção de energia anual para a temperatura virtual e 4,2% na produção de energia anual para a temperatura de bulbo úmido durante o período analisado. Entretanto, o estudo sugere que os ganhos de eficiência nos painéis flutuantes são mais acentuados em condições específicas de umidade e temperatura. Em conclusão, o projeto sugere a necessidade de futuras avaliações sobre a viabilidade econômica dos painéis flutuantes, levando em consideração os custos iniciais e de manutenção. Além disso, propõe-se a expansão da pesquisa para diferentes condições climáticas e geográficas, com o intuito de aprimorar o conhecimento sobre a eficiência e aplicabilidade dos sistemas fotovoltaicos flutuantes em diversas regiões. Isso possibilitaria a maximização da eficiência energética e da viabilidade econômica dessas instalações, abrindo caminho para otimizações significativas no campo da energia solar.

**Palavras-chave:** Painéis fotovoltaicos, Eficiência de conversão de energia, Estudo comparativo, Painéis solares flutuantes.

# Abstract

The increasing demand for electricity has led to a growing interest in sustainable and efficient energy sources. In this context, solar energy has proven to be a crucial element in the global and national energy landscape. Brazil, benefiting from its privileged geographical position and abundance of solar resources, shows significant potential for the development of the photovoltaic sector. Against this backdrop, the aim of this study is to analyze and compare the efficiency of two photovoltaic systems: a floating system and a land-based system. The study is conducted in the Brasília region, where specific meteorological data are considered to simulate solar irradiance. The intention is to understand the performance differences resulting from the temperature reduction provided by the aquatic environment in floating systems. The methodology adopted consists of three phases. The first involves modeling the irradiance on the plane of the solar panels for the locality in question. In the second phase, the efficiency of the land-based solar panels is evaluated, taking into account the energy balance and environmental conditions. Finally, the third phase expands the analysis to the floating photovoltaic system, emphasizing the influence of water temperature on the efficiency of the panels. The results indicate that floating panels generally operate at a lower temperature than land-based panels, especially during months with lower relative humidity. This temperature reduction contributes to a slightly higher efficiency of the floating panels, with an increase of 0.62% in annual energy production for virtual temperature and 4.2% for wet-bulb temperature during the analyzed period. However, the study suggests that efficiency gains in floating panels are more pronounced under specific humidity and temperature conditions. In conclusion, the project suggests the need for future evaluations on the economic viability of floating panels, taking into account initial and maintenance costs. Additionally, it proposes expanding the research to different climatic and geographical conditions, with the aim of enhancing knowledge about the efficiency and applicability of floating photovoltaic systems in various regions. This would enable the maximization of energy efficiency and economic viability of these installations, paving the way for significant optimizations in the field of solar energy.

**Keywords:** Photovoltaic Panels, Energy Conversion Efficiency, Comparative Study, Floating Solar Panels.

# Lista de Figuras

Figura 1 – Ilustração do processo de geração de corrente elétrica unidirecional em uma célula solar devido à diferença de potencial entre as regiões de junção P e N. (GREENIOT, 2023) . . . . .	6
Figura 2 – Diagrama esquemático de uma placa fotovoltaica, ilustrando suas múltiplas camadas. (ALPHASOLAR, 2023) . . . . .	7
Figura 3 – Ângulos solares, adaptado de Masters (2004) . . . . .	10
Figura 4 – Esquema mostrando o ângulo horário do sol para o observador O. $\theta_{ss}$ é o ângulo horário do pôr do sol, $\theta_{sr}$ é o do nascer do sol ( $\theta_{ss} = -\theta_{sr}$ ). Adaptado de Perrin de Brichambaut e Vauge (1982). . . . .	11
Figura 5 – Ângulo de Azimute em relação a um observador retirado de (COSTA; MAROJA, 2017). . . . .	12
Figura 6 – Imagem ilustrativa mostrando um painel solar inclinado. Os ângulos relevantes são destacados. Adaptado de (AMELIA et al., 2020) . . . . .	13
Figura 7 – Imagem ilustrativa mostrando os tipos de irradiações. Adaptado de (ALY, 2019) . . . . .	18
Figura 8 – Características I-V e V-P sob condições padrão: $1000 \text{ W/m}^2$ , $25^\circ\text{C}$ . Adaptado de (BÜHLER, 2023) . . . . .	20
Figura 9 – Efeito de irradiação reduzida ( $500 \text{ W/m}^2$ ) nas curvas I-V e V-P. Adaptado de (BÜHLER, 2023) . . . . .	21
Figura 10 – Impacto de alta temperatura celular ( $50^\circ\text{C}$ ) em I-V e V-P. Adaptado de (BÜHLER, 2023) . . . . .	21
Figura 11 – Componentes e tipos de energias de um painel solar. Adaptado de (LIMA, 2019) . . . . .	24
Figura 12 – Relação entre Temperatura Ambiente, Temperatura Acima da Água e Temperatura de Bulbo Úmido em Placas Flutuantes . . . . .	40
Figura 13 – O gráfico representa a quantidade de energia gerada por um painel fixo no solo ao longo do ano de 2014, de acordo com os diferentes meses. . . . .	41
Figura 14 – Gráfico da diferença de energia gerada por um painel flutuante e fixo em solo ao longo do ano de 2014, de acordo com os diferentes meses. . . . .	42

Figura 15 – Comparação da geração anual de energia entre painel fotovoltaico instalado em solo e painel flutuante, sob condições de temperatura de bulbo úmido. . . . .	43
Figura 16 – Comparação da geração anual de energia entre painel fotovoltaico instalado em solo e painel flutuante, sob condições de temperatura virtual. . . . .	44
Figura 17 – Correlação entre a temperatura ambiente e a temperatura da célula fotovoltaica. . . . .	45
Figura 18 – Relação entre energia incidente ( $G_t$ ) e energia gerada ( $E_{PV}$ ) em células fotovoltaicas. A linha vermelha presente ilustra o comportamento ideal da célula fotovoltaica. . . . .	46
Figura 19 – Gráfico representa a relação existente entre a energia recebida pelo painel fixo instalado no solo e sua eficiência de conversão. Indicadores de cor representam a temperatura da célula. . . . .	47

# Lista de símbolos

$\alpha_{cel}$  Absortividade das células fotovoltaicas (sem dimensão)

$\alpha_{vidro}$  Absorvidade do vidro (sem dimensão)

$\beta$  Ângulo do painel em relação ao Zênite ( $^{\circ}$ )

$\delta$  Declinação solar ( $^{\circ}$ )

$\dot{Q}$  Fluxo de calor (W)

$\dot{Q}_{cond,vidro}$  Fluxo de calor por condução no vidro (W)

$\dot{Q}_{cond,bs}$  Fluxo de calor por condução no Backsheet (W)

$\dot{Q}_{cond,cel}$  Fluxo de calor por condução nas células (W)

$\dot{Q}_{cond}$  Fluxo de calor por condução (W)

$\dot{Q}_{conv,vidro}$  Fluxo de calor por convecção do vidro (W)

$\dot{Q}_{conv,bs}$  Fluxo de calor por convecção do Backsheet (W)

$\dot{Q}_{conv}$  Fluxo de calor por convecção (W)

$\dot{Q}_{LW,vidro}$  Fluxo de calor por radiação de onda longa no vidro (W)

$\dot{Q}_{LW,bs}$  Fluxo de calor por radiação de onda longa no Backsheet (W)

$\dot{Q}_{SW,vidro}$  Fluxo de calor por radiação solar de onda curta no vidro (W)

$\dot{Q}_{SW,bs}$  Fluxo de calor por radiação solar de onda curta no Backsheet (W)

$\dot{Q}_{SW,cel}$  Fluxo de calor solar de ondas curtas nas células fotovoltaicas (W)

$\dot{W}$  Potência (W)

$\epsilon$  Emissividade (sem dimensão)

$\frac{dT_{vidro}}{dt}$  Taxa de variação da temperatura do vidro com o tempo ( $K s^{-1}$ )

$\frac{dT_{bs}}{dt}$  Taxa de variação da temperatura do Backsheet com o tempo ( $K s^{-1}$ )

$\frac{dT_{cel}}{dt}$	Taxa de variação da temperatura das células com o tempo ( $\text{K s}^{-1}$ )
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura ( $\text{K m}^{-1}$ )
$\gamma$	Ângulo Azimute do painel ( $^\circ$ )
$\gamma_t$	Coefficiente de temperatura da potência máxima ( $^\circ\text{C}^{-1}$ )
$\omega$	Ângulo horário ( $^\circ$ )
$\phi$	Latitude ( $^\circ$ )
$\rho_c$	Refletividade da célula solar (sem dimensão)
$\rho_{vidro}$	Fração da radiação refletida pelo vidro (sem dimensão)
$\rho_{vidro}$	Refletividade do vidro (sem dimensão)
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ )
$\tau_{vidro}$	Transmitância do vidro (sem dimensão)
$\text{den}_{vidro}$	Densidade do vidro ( $\text{kg m}^{-3}$ )
$\text{den}_{bs}$	Densidade do Backsheet ( $\text{kg m}^{-3}$ )
$\theta_i$	Ângulo de inclinação do painel ( $^\circ$ )
$\theta_z$	Ângulo zenital ( $^\circ$ )
$\varepsilon_{bs}$	Emissividade do Backsheet (sem dimensão)
$\varepsilon_c$	Emissividade da célula (sem dimensão)
$\varepsilon_{sky}$	Emissividade do céu (sem dimensão)
$\varepsilon_{vidro}$	Emissividade do vidro (sem dimensão)
$A$	Ângulo de azimute ( $^\circ$ )
$A_p$	Área da placa solar ( $\text{m}^2$ )
$a_{bs}$	Absortividade do Backsheet (sem dimensão)
$B$	Fração do ano ( $^\circ$ )
$C_{vidro}$	Calor específico do vidro ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
$c_{bs}$	Calor específico do Backsheet ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
$c_{cel}$	Calor específico das células ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
$d_{vidro}$	Espessura do vidro (m)

$d_{bs}$	Espessura do Backsheet (m)
$d_{cel}$	Espessura das células (m)
$den_{cel}$	Densidade das células ( $\text{kg m}^{-3}$ )
$E$	Correção da equação do tempo
$E_t$	Energia total do sistema (J)
$F_{céu,bs}$	Fator de visão entre o céu e a face superior do Backsheet (sem dimensão)
$F_{sky}$	Fator de visão do céu para o vidro (sem dimensão)
$F_{sombra}$	Fator de visão ajustado para áreas em sombra (sem dimensão)
$F_{sup,bs}$	Fator de visão entre a superfície próxima e o Backsheet (sem dimensão)
$F_{sup,bs}$	Fator de visão entre o solo e o Backsheet (sem dimensão)
$F_{sup}$	Fator de visão entre o céu e a superfície superior do Backsheet (sem dimensão)
$fd$	Fração de radiação solar difusa [adimensional]
$G_t$	irradiância solar total ( $\text{W m}^{-2}$ )
$G_{sky}$	Irradiância de onda longa do céu ( $\text{W m}^{-2}$ )
$h$	Coefficiente de transferência de calor por convecção ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ )
$I_0$	Intensidade da Irradiância solar extraterrestre ( $\text{W m}^{-2}$ )
$I_{cc}$	Corrente de Curto-Circuito (A)
$I_{bn}$	Irradiância Direta Normal ( $\text{W m}^{-2}$ )
$I_{bt}$	Irradiância Direta em Superfície Inclinada ( $\text{W m}^{-2}$ )
$I_{cc}$	Constante solar ( $\text{W m}^{-2}$ )
$I_d$	Irradiância Difusa ( $\text{W m}^{-2}$ )
$I_{gh}$	Irradiância Global Horizontal ( $\text{W m}^{-2}$ )
$I_{sr}$	Irradiância Refletida do Solo ( $\text{W m}^{-2}$ )
$I_{tt}$	Irradiância Total em Superfície Inclinada ( $\text{W m}^{-2}$ )
$k$	Condutividade térmica ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
$kt$	Índice de claridade [adimensional]
$L_{loc}$	Longitude local ( $^{\circ}$ )



$L_{ts}$	Longitude do fuso horário ( $^{\circ}$ )
$LW_{bs,1}$	Radiação de onda longa proveniente do céu que incide no Backsheet ( $\text{W m}^{-2}$ )
$LW_{bs,2}$	Radiação de onda longa emitida por uma superfície próxima e que incide no Backsheet ( $\text{W m}^{-2}$ )
$LW_{bs,3}$	Radiação de onda longa emitida pelo próprio Backsheet ( $\text{W m}^{-2}$ )
$LW_{vidro,1}$	Radiação térmica do céu absorvida pelo vidro ( $\text{W m}^{-2}$ )
$LW_{vidro,2}$	Radiação térmica emitida por superfícies próximas absorvida pelo vidro ( $\text{W m}^{-2}$ )
$LW_{vidro,3}$	Radiação térmica emitida pelo vidro ( $\text{W m}^{-2}$ )
$n$	Dia do ano
$P$	Potência elétrica gerada (W)
$P_{\max}$	Potência Máxima ou Nominal (W)
$P_{m, stc}$	Potência elétrica máxima do módulo PV em condições de teste padrão (W)
$P_m$	Potência elétrica gerada pelo módulo fotovoltaico (W)
$Q_{cond}$	Calor transferido por condução (W)
$Q_{conv}$	Calor transferido por convecção (W)
$Q_{rad}$	Calor transferido por radiação (W)
$SW_{bs,1}$	irradiância solar difusa incidente no Backsheet ( $\text{W m}^{-2}$ )
$SW_{bs,2}$	irradiância solar difusa refletida pelo solo incidente no Backsheet ( $\text{W m}^{-2}$ )
$SW_{cel,1}$	irradiância solar total incidente nas células ( $\text{W m}^{-2}$ )
$SW_{cel,2}$	irradiância solar refletida na superfície das células ( $\text{W m}^{-2}$ )
$SW_{vidro,1}$	Irradiância solar direta absorvida pelo vidro ( $\text{W m}^{-2}$ )
$SW_{vidro,2}$	Irradiância solar refletida absorvida pelo vidro ( $\text{W m}^{-2}$ )
$SW_{vidro,3}$	Irradiância solar refletida pela célula e absorvida pelo vidro ( $\text{W m}^{-2}$ )
$T_s$	Tempo solar (min)
$T_{st}$	Tempo padrão (min)
$T_a$	Temperatura do ar (K)
$T_c$	Temperatura da célula (K)

$T_{ref}$  Temperatura de referência da célula ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{tbs}$  Temperatura do Backsheet (K)

$T_{vd}$  Temperatura do vidro (K)

$V_{ca}$  Tensão de Circuito Aberto (V)

NOCT Temperatura Operacional Nominal da Célula ( $^{\circ}\text{C}$ )

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>2</b>
1.1.1	Objetivos Específicos	2
<b>1.2</b>	<b>Revisão da Literatura</b>	<b>2</b>
1.2.1	Organização do Trabalho	4
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Célula Solar</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Placa Fotovoltaica</b>	<b>6</b>
<b>2.3</b>	<b>Posição do sol</b>	<b>8</b>
2.3.1	Localização na Terra	8
2.3.2	Tempo Solar	8
2.3.3	Declinação Solar	9
2.3.4	Ângulo de Zênite	9
2.3.5	Ângulo de Azimute	11
2.3.6	Superfícies inclinadas	13
2.3.7	Hora do pôr do Sol	14
<b>2.4</b>	<b>Radiação Solar</b>	<b>14</b>
2.4.1	Irradiância Solar Extraterrestre	14
2.4.2	Irradiância Solar na Superfície Terrestre	15
2.4.3	Modelo para Cálculo de Radiação Direta e Difusa	16
2.4.4	Radiação em Superfícies Inclinadas	17
2.4.5	Irradiância direta em superfície inclinada	18
2.4.5.1	Modelo com radiação difusa isotrópica	19
<b>2.5</b>	<b>Balanco de Energia</b>	<b>19</b>
<b>2.6</b>	<b>Comportamento Elétrico dos Painéis Fotovoltaicos</b>	<b>20</b>
<b>2.7</b>	<b>Fluxos de calor</b>	<b>22</b>
2.7.1	Fluxo de calor por condução	22
2.7.2	Fluxo de calor por convecção	22
2.7.3	Fluxo de calor por radiação térmica	23

	<b>3</b>	<b>MODELAGEM NUMÉRICA</b>	<b>24</b>
3.0.1		Componentes	24
3.0.1.1		Célula solar	25
3.0.1.2		Vidro	26
3.0.1.3		Backsheet	29
3.0.2		Resolução das equações	32
<b>3.1</b>		<b>Eficiência</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>		<b>Potência Gerada</b>	<b>34</b>
3.2.1		Temperatura acima do corpo d'água	34
	<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>37</b>
	<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO E RESULTADOS</b>	<b>39</b>
5.1		Diferença das Temperaturas dos Painéis	39
5.2		Energia Gerada pelos Painéis	40
5.3		Eficiência dos Painéis	44
	<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>48</b>
		<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>50</b>
		<b>APÊNDICES</b>	<b>53</b>
		<b>APÊNDICE A – CÓDIGO MATLAB: MODELO PARA ESTIMAR A GERAÇÃO E EFICIÊNCIA EM PAINÉIS SO- LARES FIXOS E FLUTUANTES COM BASE EM SUA LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA.</b>	<b>54</b>
		<b>ANEXO A – ANEXOS: DATASHEET DA PLACA SOLAR UTILI- ZADA NO PROJETO.</b>	<b>79</b>

# 1 Introdução

A demanda crescente por energia elétrica, aliada à imperativa necessidade de diversificar as fontes energéticas, confere à energia solar um papel cada vez mais relevante no panorama energético global e nacional (HERNÁNDEZ-MORO; MARTÍNEZ-DUART, 2013). O Brasil, favorecido pela sua posição geográfica e pela riqueza em recurso solar, emerge como um território de elevado potencial para a expansão do setor fotovoltaico (PEREIRA et al., 2017). A procura por abordagens inovadoras e sustentáveis na geração de energia elétrica assume uma importância preponderante frente aos desafios ambientais e socioeconômicos contemporâneos.

Conforme dados do balanço energético nacional (EPE, 2023), observa-se um incremento significativo na adoção e produção de energia fotovoltaica no Brasil. Registrou-se um aumento de 10.748,3 GWh em 2020 para 30.126,5 GWh em 2022, correspondente ao ano-base deste estudo. Esta tendência ascendente evidencia não apenas a crescente aceitação da tecnologia no mercado, mas também reforça seu potencial como solução eficaz em determinados contextos, podendo trazer benefícios ainda maiores com o advento de novos avanços tecnológicos.

Atualmente, uma estratégia inovadora em análise para otimizar a utilização da energia solar no Brasil é a implementação de usinas solares flutuantes. Estas instalações, posicionadas sobre corpos d'água como lagos, apresentam potencial para alcançar índices superiores de eficiência energética. Este incremento na eficiência é atribuível ao microclima específico dessas localidades, que favorece a diminuição da temperatura dos painéis solares devido à evaporação da camada superficial da água. A performance dos painéis fotovoltaicos é aprimorada por este resfriamento natural, visto que sua eficiência energética é inversamente proporcional à temperatura de suas células. Esta estratégia de resfriamento tem se demonstrado promissora, melhorando o desempenho através do controle térmico das células solares (SAHU; YADAV; SUDHAKAR, 2016). Contudo, a implementação dessa tecnologia ainda é incipiente e pouco explorada em diversas regiões do Brasil, evidenciando a necessidade de informações mais detalhadas e fidedignas acerca de sua eficiência na conversão fotovoltaica.

Considerando-se o contexto regional do Brasil e, especificamente, de Brasília-DF, o projeto de graduação em questão investiga a eficiência de conversão de energia em painéis fotovoltaicos instalados em ambientes terrestre (fixos) e aquático (flutuantes sobre lago).

Tal estudo é inédito na região, e os resultados obtidos podem ser fundamentais para impulsionar a adoção e aprimorar a implementação de usinas solares flutuantes no país.

Para alcançar tal objetivo, será desenvolvido um modelo computacional utilizando Matlab. Este modelo servirá para distinguir as variações de eficiência entre esses dois tipos de sistemas fotovoltaicos. Com isso, os dados obtidos poderão embasar futuras políticas públicas e iniciativas privadas, direcionadas à promoção da energia solar flutuante no Brasil.

## 1.1 Objetivos

Analisar e comparar a eficiência de dois sistemas fotovoltaicos distintos: um sistema fotovoltaico flutuante e outro sistema fotovoltaico terrestre, com o intuito de compreender as divergências de desempenho decorrentes da redução de temperatura proporcionada pelo ambiente aquático.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- Realizar a análise de dados meteorológicos e ambientais específicos da região de Brasília para determinar o modelo de simulação de irradiância solar.
- Desenvolver e implementar balanços energéticos detalhados para cada componente dos sistemas fotovoltaicos, com a finalidade de obter um perfil de temperatura mais preciso das células solares.
- Formular e implementar um modelo para estimar a temperatura da superfície da água, com o intuito de analisar o impacto dessa temperatura no desempenho do sistema fotovoltaico flutuante.
- Desenvolver um modelo de eficiência energética específico para as placas solares, considerando variações ambientais e técnicas.
- Executar simulações desses modelos no software MATLAB®, permitindo uma análise comparativa quantitativa entre os sistemas fotovoltaicos flutuante e terrestre.
- Avaliar e quantificar as eficiências dos painéis fotovoltaicos em ambos os sistemas, com base nos dados simulados, para identificar diferenças significativas e tendências de desempenho.

## 1.2 Revisão da Literatura

O Brasil possui um vasto potencial de fontes energéticas em seu território, sendo uma das nações com a matriz energética mais diversificada no mundo. Dentre as energias

renováveis, a solar tem ganhado destaque, Visto o elevado potencial de geração, considerando o contexto solar do Brasil, principalmente nas regiões de maior incidência solar do país (EPE, 2023). Nesse sentido, os avanços na tecnologia fotovoltaica, que permite a conversão direta da luz solar em energia elétrica, têm incentivado a busca por alternativas mais eficientes de aproveitamento da energia solar.

Os painéis fotovoltaicos tiveram sua origem a partir do desenvolvimento de células solares, tendo como marco a criação da primeira célula solar de silício em 1954 nos Laboratórios Bell, nos Estados Unidos (CHAPIN; FULLER; PEARSON, 1954). Desde então, os painéis solares têm sido utilizados em diversas aplicações, desde satélites e missões espaciais até residências e edificações, contribuindo para a expansão das energias renováveis (WENHAM, 2007).

Um ponto crucial para o desempenho dos painéis fotovoltaicos é a influência da temperatura em sua eficiência. Estudos indicam que um aumento na temperatura das células reduz a eficiência de geração de eletricidade, devido às perdas térmicas e a um aumento na taxa de recombinação de portadores de carga dentro das células (SKOPLAKI; PALYVOS, 2009a). Conseqüentemente, sistemas onde há refrigeração dos painéis podem apresentar melhorias significativas na eficiência do processo de conversão de energia.

Ao longo dos anos, têm sido desenvolvidos diversos modelos de placas solares com o objetivo de maximizar a eficiência do processo de conversão de energia (PARIDA; INYAN; GOIC, 2011). Entre as opções alternativas, destacam-se os sistemas fotovoltaicos flutuantes, que permitem utilizar superfícies aquáticas como local favorável para a geração de energia por meio de placas fotovoltaicas, otimizando o espaço e evitando interferências no ambiente terrestre. (RANJBARAN et al., 2019).

A aplicação de sistemas fotovoltaicos flutuantes tem sido objeto de pesquisa e desenvolvimento em diferentes países. Esses sistemas podem apresentar diversas vantagens em relação aos sistemas convencionais em terra, como a melhoria da eficiência energética da instalação devido ao resfriamento natural da superfície da água e a diminuição da evaporação (SAHU; YADAV; SUDHAKAR, 2016).

No entanto, apesar dos estudos relacionados à eficiência da conversão fotovoltaica em função da temperatura das células, pouco se sabe sobre a eficiência e o desempenho de painéis fotovoltaicos refrigerados em condições específicas no Brasil. Portanto, torna-se relevante a realização de pesquisas que explorem o potencial de uso dessa tecnologia em ambientes terrestres e aquáticos em diferentes regiões do país, considerando aspectos locais e regionais que possam influenciar na eficiência e no desempenho dos painéis fotovoltaicos refrigerados. Isso permitirá uma melhor compreensão dos benefícios e das limitações dessa abordagem e contribuirá para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes de aproveitamento da energia solar no Brasil.

### 1.2.1 Organização do Trabalho

Este trabalho foi estruturado em seções específicas, visando atingir os objetivos propostos de forma clara e eficiente. Inicialmente, na seção de Referencial Teórico, são apresentados os conceitos fundamentais que formam a base para o desenvolvimento dos modelos e cálculos utilizados. Esta seção é essencial para o entendimento dos princípios teóricos que sustentam as análises subsequentes.

A seguir, na seção de Modelagem Numérica, detalha-se o processo adotado para calcular a potência e eficiência dos dois sistemas fotovoltaicos em estudo. Esta parte inclui uma descrição minuciosa dos balanços energéticos para cada componente dos sistemas, além da modelagem específica empregada no cálculo da temperatura acima da superfície da água.

Posteriormente, a seção Metodologia aborda como os cálculos foram conduzidos, com ênfase no uso do software MATLAB®. Esta seção é crucial para compreender as abordagens metodológicas e as ferramentas analíticas utilizadas no estudo.

Os dois capítulos finais são dedicados à apresentação dos resultados e à discussão. Nesses capítulos, são expostos os resultados obtidos e realizadas análises críticas sobre os mesmos, abordando também perspectivas para trabalhos futuros nesta área de pesquisa.

Finalmente, o trabalho é concluído com apêndices que incluem os códigos utilizados nas análises e o datasheet da placa solar empregada no estudo, proporcionando um recurso valioso para futuras referências e replicação da pesquisa.



## 2 Referencial Teórico

### 2.1 Célula Solar

A célula solar, também chamada de célula fotovoltaica, é a unidade fundamental responsável pela conversão direta da energia solar em energia elétrica. As células solares são comumente fabricadas a partir de materiais semicondutores, sendo o silício cristalino o material mais amplamente utilizado em aplicações comerciais devido à sua eficiência, abundância e propriedades semicondutoras adequadas (GREEN et al., 2014). Outros materiais semicondutores, como compostos de telureto de cádmio (CdTe) e sulfureto de cobre índio gálio (CIGS), também têm sido pesquisados e desenvolvidos para aplicações em células solares.

O funcionamento de uma célula solar baseia-se no efeito fotovoltaico, um fenômeno físico no qual a incidência de luz com energia suficiente promove a geração de uma corrente elétrica em um material semicondutor. Esse processo, ilustrado na figura 1, ocorre quando a luz com uma energia igual ou maior do que a energia da banda proibida (ou energia de gap) do semicondutor é absorvida, excitando elétrons do nível de energia de valência para o nível de energia de condução e, assim, criando pares elétron-lacuna. Esses elétrons livres são conduzidos pela diferença de potencial criada entre a região de junção P (rica em lacunas) e a região de junção N (rica em elétrons), gerando uma corrente elétrica no circuito externo (CORKISH et al., 2006).

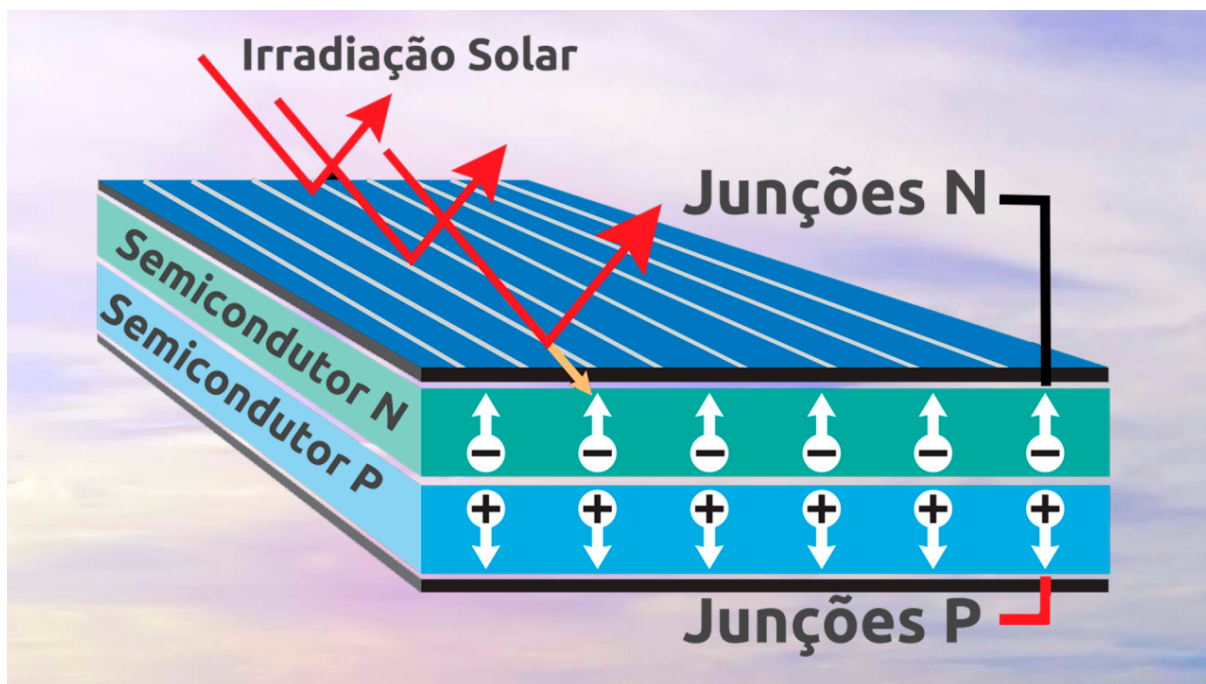


Figura 1 – Ilustração do processo de geração de corrente elétrica unidirecional em uma célula solar devido à diferença de potencial entre as regiões de junção P e N. (GREENIOT, 2023)

## 2.2 Placa Fotovoltaica

Uma placa fotovoltaica é composta por células solares interligadas e encapsuladas em uma estrutura. Essa configuração protege as células solares contra agentes externos, como umidade, poeira e impactos mecânicos. A construção das placas fotovoltaicas envolve múltiplas camadas, como ilustrado em 2, elas são projetadas para otimizar tanto a eficiência energética quanto a vida útil da placa. A seguir, serão abordadas cada uma dessas camadas detalhadamente:

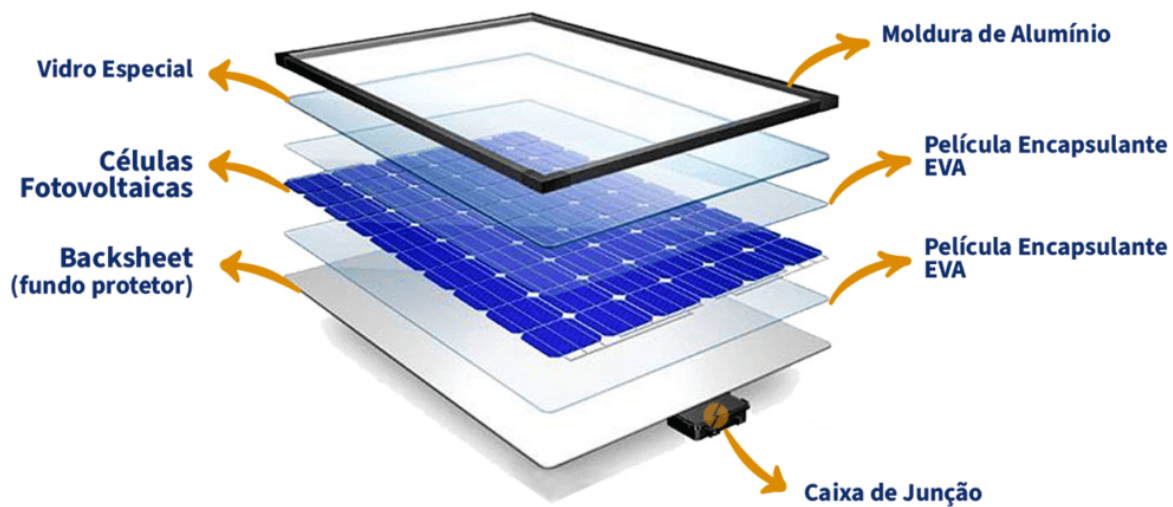


Figura 2 – Diagrama esquemático de uma placa fotovoltaica, ilustrando suas múltiplas camadas. (ALPHASOLAR, 2023)

**Moldura:** A moldura é normalmente feita de alumínio e impede a deformação das partes internas da placa fotovoltaica. Além disso, a moldura fornece fixação e proteção para os componentes internos da placa (DU; WANG; TAO, 2020).

**Vidro:** A camada de vidro é normalmente feita de vidro temperado de baixo teor de ferro, pois este tipo de vidro possui alta transmitância e resistência. Atua como protetor externo para os componentes internos da placa e permite a passagem de luz para alcançar as células fotovoltaicas (DU; WANG; TAO, 2020).

**Encapsulante - EVA (Etileno Acetato de Vinila):** A camada de EVA está presente em ambos os lados das células fotovoltaicas e visa protegê-las dos efeitos do ambiente, como umidade, variação de temperatura e exposição à luz ultravioleta. O EVA também auxilia na aderência das células fotovoltaicas ao vidro e ao backsheet, garantindo a integridade mecânica da placa fotovoltaica (SAIFULLAH; GWAK; YUN, 2016).

**Células Fotovoltaicas:** As células fotovoltaicas são o principal componente das placas, responsáveis pela conversão da energia solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Geralmente, são feitas de silício cristalino (monocristalino ou policristalino).

**Backsheet:** O backsheet, localizado na parte traseira da placa fotovoltaica, é composto por material polimérico, como poliéster laminado (PET) ou fluoropolímero. Tem a função de fornecer isolamento elétrico e proteção mecânica às células fotovoltaicas, além de impedir a penetração de umidade e outros agentes que possam comprometer a integridade das células (BUERHOP-LUTZ et al., 2021).

**Caixa de junção:** Esse componente externo à placa é responsável por conectar ele-

tricamente várias placas em série ou paralelo. Contém diodos de bypass para evitar problemas de sombreamento que possam diminuir a eficiência energética das células, acarretando em maiores perdas energéticas.

Cada camada na construção das placas fotovoltaicas desempenha uma função específica, otimizando o desempenho do dispositivo em conjunto. A compreensão desses componentes e de suas funções é vital para o projeto, instalação e manutenção eficientes de sistemas de energia solar fotovoltaica.

## 2.3 Posição do sol

A posição do sol em relação à Terra constitui um parâmetro fundamental no estudo da eficiência de conversão de energia em painéis fotovoltaicos. A quantidade e qualidade da energia solar que atinge os módulos fotovoltaicos dependem da posição do sol no céu e da localização geográfica do sistema. Ao longo do dia e do ano, a posição do sol sofre variações devido à rotação da Terra e à sua inclinação em relação à órbita em torno do sol. A determinação dessa posição requer a consideração de fatores como a localização do painel, o tempo solar e as coordenadas do astro.

### 2.3.1 Localização na Terra

Latitude e longitude são coordenadas geográficas que representam a posição de um ponto na superfície da Terra. A latitude é medida em graus a partir do equador e varia de 0° a 90° para o norte ou para o sul, enquanto a longitude varia de 0° a 180° para leste ou oeste a partir do meridiano de Greenwich, na Inglaterra. A combinação dessas duas coordenadas, juntamente com o fator de altura do ponto na Terra, permite determinar a posição exata de um local (HILL; BRAUN, 2001).

### 2.3.2 Tempo Solar

O tempo solar é uma medida de tempo baseada no movimento aparente do sol no céu. Essa medida fornece uma estimativa da hora do dia conforme a posição geográfica e é crucial para assegurar a eficiência na captação de energia solar pelos painéis fotovoltaicos.

A determinação do tempo solar pode ser realizada por meio da equação do tempo, que leva em consideração a correção da órbita terrestre ao longo das estações do ano. O tempo solar considera a posição da terra em relação ao sol e difere do tempo padrão, registrado pelos relógios. A equação para calcular o tempo solar é (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$T_s = T_{st} + 4(L_{ts} - L_{loc}) + E$$

Onde,

$T_s$  = tempo solar [min]

$T_{st}$  = tempo padrão [min]

$L_{ts}$  = longitude do fuso horário [grau]

$L_{loc}$  = longitude local [grau]

$E$  = correção da equação do tempo

A correção da equação do tempo (E) pode ser determinada com base nas tabelas astronômicas ou fórmulas empíricas, e varia ao longo do ano devido à inclinação do eixo da terra e à excentricidade da órbita terrestre.

$$E = 229.18 (0.000075 + 0.001868 \cos(B) - 0.032077 \sin(B) - 0.014615 \cos(2B) - 0.040849 \sin(2B))$$

Onde B é a fração do ano:

$$B = (n - 1) \times \frac{360}{365}$$

$n$  = dia do ano

### 2.3.3 Declinação Solar

A declinação solar ( $\delta$ ) é o ângulo entre o plano do equador terrestre e a linha que conecta o centro do Sol ao centro da Terra. Esse ângulo varia ao longo do ano devido à inclinação do eixo da Terra em relação ao seu plano orbital.

A fórmula para calcular a declinação solar em graus é dada por (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$\delta = \arcsin(\sin(23.45^\circ) \times \sin\left[\frac{360}{365} \times (284 + n)\right]) \quad (2.1)$$

Nessa fórmula, o valor de "n" representa o dia do ano para o qual se deseja calcular a declinação solar. A fórmula utiliza o valor médio da inclinação axial da Terra, que é de aproximadamente 23.45°.

### 2.3.4 Ângulo de Zênite

O ângulo zenital ( $\theta_z$ ) é o ângulo medido entre a linha que vai do observador até o sol e a linha que aponta diretamente para cima, ou seja, perpendicular à superfície da Terra, como mostra a figura 3. Esse ângulo é fundamental para estimar a quantidade de radiação solar que incide em uma determinada localidade, podendo ser calculado com

base na latitude ( $\phi$ ), na declinação solar ( $\delta$ ) e no ângulo horário ( $\omega$ ) (COSTA; MAROJA, 2017).

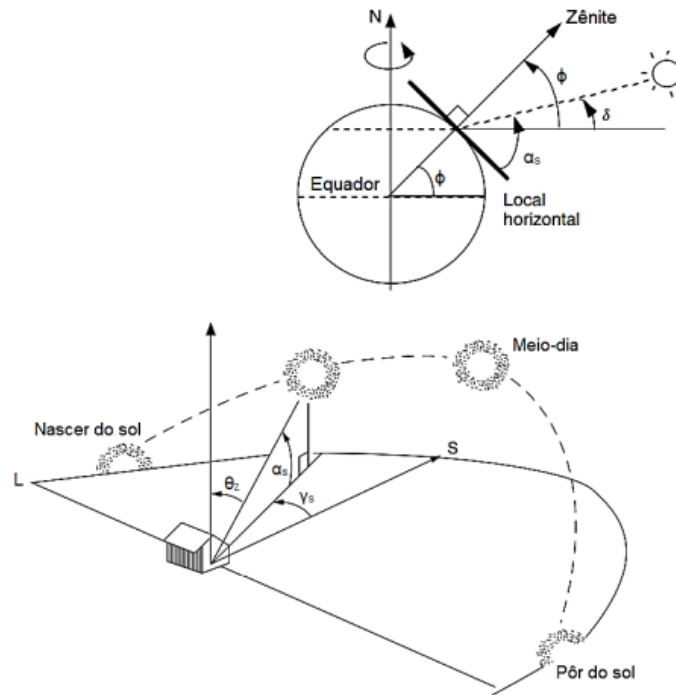


Figura 3 – Ângulos solares, adaptado de Masters (2004)

O cálculo do ângulo zenital pode ser feito mediante a equação abaixo (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$\cos(\theta_z) = \sin(\phi) \times \sin(\delta) + \cos(\phi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) \quad (2.2)$$

Na equação 2.2,  $\phi$  é a latitude do local,  $\delta$  é a declinação solar e  $\omega$  é o ângulo horário. A declinação solar varia ao longo do ano e está relacionada ao eixo de inclinação da Terra em relação ao plano da eclíptica e à posição da Terra em sua órbita ao redor do sol. Por sua vez, o ângulo horário é a diferença entre as posições do sol e o meridiano local.

Para calcular o ângulo de hora, é usado o fator hora ( $T_s$ ), representado em minutos, que indica a quantidade de tempo antes ou depois do meio-dia local, podendo ser calculado conforme a equação abaixo (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$\omega = \left( \frac{T_s - 12 \times 60}{60} \right) \times 15^\circ \quad (2.3)$$

Neste contexto, 1 hora de deslocamento angular corresponde a  $15^\circ$ , considerando a rotação da Terra em  $360^\circ$  durante 24 horas. Além disso, o deslocamento angular do sol em relação ao meio-dia (hora local) é representado pelo ângulo horário ( $\omega$ ), como mostrado na figura 4.

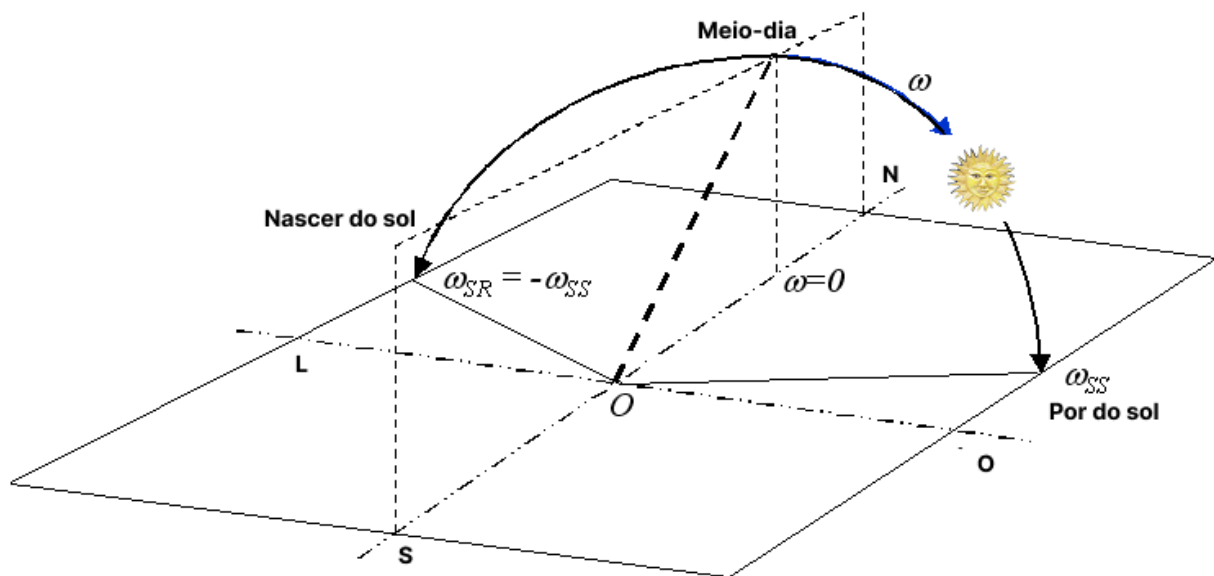


Figura 4 – Esquema mostrando o ângulo horário do sol para o observador O.  $\omega_{ss}$  é o ângulo horário do pôr do sol,  $\omega_{sr}$  é o do nascer do sol ( $\omega_{ss} = -\omega_{sr}$ ). Adaptado de Perrin de Brichambaut e Vauge (1982).

### 2.3.5 Ângulo de Azimute

O ângulo de azimute ( $A$ ) é uma medida que define a orientação horizontal do painel solar. Ele indica a direção do painel em relação ao Norte geográfico e é uma variável importante para determinar a quantidade de radiação solar incidente na superfície do painel. O azimute, como mostra a figura 5, é medido em graus e varia de 0 a 360°, sendo 0° correspondente ao Norte, 90° ao Leste, 180° ao Sul e 270° ao Oeste (COSTA; MAROJA, 2017).

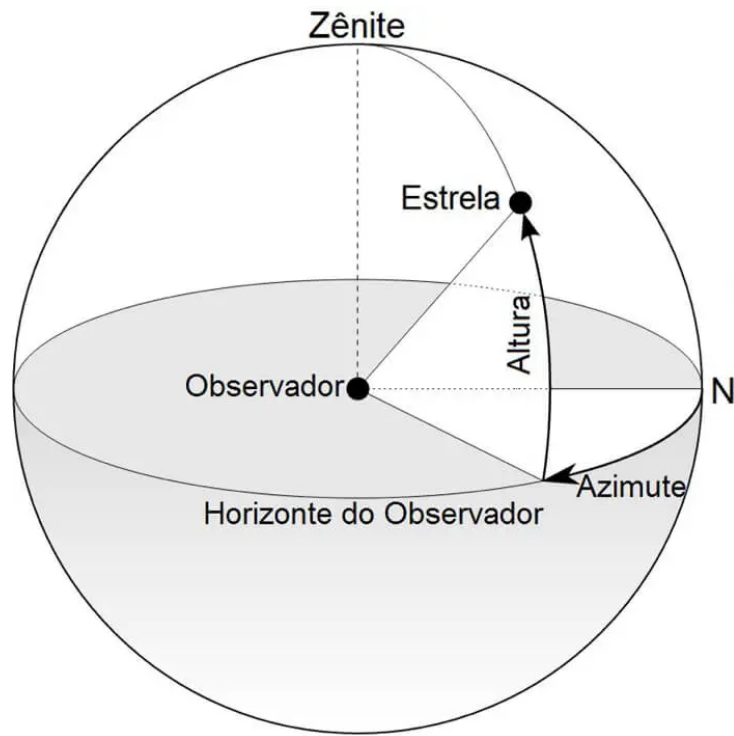


Figura 5 – Ângulo de Azimute em relação a um observador retirado de (COSTA; MAROJA, 2017).

A posição ótima do azimute depende da localização geográfica e da estação do ano. Em geral, recomenda-se que painéis fotovoltaicos instalados no hemisfério Sul sejam orientados para o Norte e no hemisfério Norte para o Sul, visando maximizar a exposição à radiação solar. O azimute é uma variável importante no cálculo da posição solar, que influencia diretamente o desempenho dos painéis fotovoltaicos e a eficiência de conversão de energia (MA; YANG; LU, 2014).

A fórmula para calcular o ângulo de azimute é dada por (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$\sin(A) = -\frac{\cos(\delta) \times \sin(\omega)}{\cos(90 - \theta_z)} \quad (2.4)$$

onde:

- $A$  = ângulo de azimute [graus];
- $\delta$  = declinação solar [graus];
- $\omega$  = ângulo horário [graus];
- $\theta_z$  = ângulo zenital [graus].



### 2.3.6 Superfícies inclinadas

A orientação e inclinação do painel desempenham um papel crucial na quantidade de radiação solar captada. Geralmente, painéis inclinados conseguem absorver mais luz solar em comparação aos planos, especialmente em regiões de altas latitudes (TRIPA-NAGNOSTOPOULOS et al., 2002).

Os painéis solares fotovoltaicos inclinados são ajustados de modo a maximizar a interceptação da radiação solar ao longo do ano. Nesse processo, considera-se a latitude do local de instalação e possíveis sombras geradas por construções vizinhas e vegetação. De modo geral, utilizar o mesmo ângulo da latitude local é recomendado para garantir um bom desempenho do sistema fotovoltaico.

O ângulo de incidência ( $\theta_i$ ) corresponde ao ângulo formado entre o vetor normal à superfície do painel solar e a direção da radiação solar, como mostra a figura 6. Para calcular esse ângulo, é necessário conhecer a declinação solar ( $\delta$ ), a latitude da localidade ( $\phi$ ), o ângulo do painel em relação ao Zênite ( $\beta$ ), o ângulo de hora ( $\omega$ ) e o ângulo do painel em relação ao Norte ( $\gamma$ ).

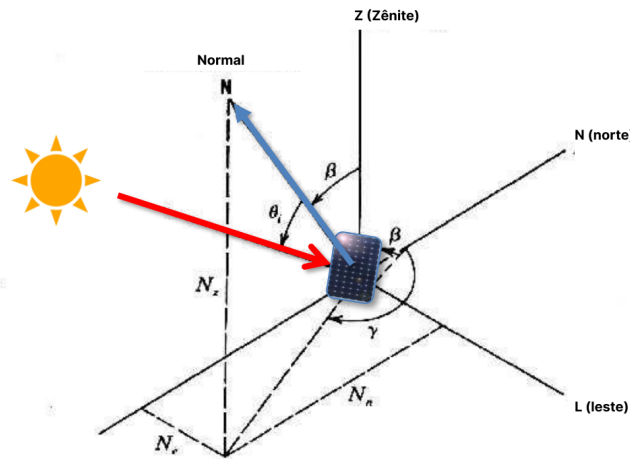


Figura 6 – Imagem ilustrativa mostrando um painel solar inclinado. Os ângulos relevantes são destacados. Adaptado de (AMELIA et al., 2020)

Como mencionado, uma equação para calcular o ângulo de incidência ( $\theta_i$ ) é a seguinte (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$\begin{aligned}
 \cos(\theta_i) = & \sin(\delta) \times \sin(\phi) \times \cos(\beta) \\
 & - \sin(\delta) \times \cos(\phi) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma) \\
 & + \cos(\delta) \times \cos(\phi) \times \cos(\beta) \times \cos(\omega) \\
 & + \cos(\delta) \times \sin(\phi) \times \sin(\beta) \times \cos(\omega) \\
 & + \cos(\delta) \times \sin(\beta) \times \sin(\gamma) \times \sin(\omega)
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Onde,

- $\theta_i$  é o ângulo de incidência [grau];
- $\delta$  é a declinação solar [grau];
- $\phi$  é a latitude da localidade [grau];
- $\beta$  é o ângulo vertical do painel [grau];
- $\gamma$  é o ângulo Azimute do painel [grau];
- $\omega$  é o ângulo horário [grau].

### 2.3.7 Hora do pôr do Sol

A hora do pôr do sol é um fator crítico que afeta a quantidade de energia solar que incide sobre os painéis fotovoltaicos. Em geral, nos locais onde o horário do pôr do sol é mais tarde, os painéis recebem mais horas de luz solar, o que aumenta sua geração energética. A hora do pôr do sol pode variar de acordo com a localização geográfica, a estação do ano, e os sistemas de horário local (SANTOS, 2015).

No momento do nascer e pôr do sol, o ângulo zenital é igual a  $90^\circ$ . Nesse contexto, conforme mencionado no cálculo de  $\cos(\theta_z)$  2.2, considera-se  $\theta_z = 90^\circ$ . Assim, obtém-se (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$\cos(\omega_{sunset}) = -\tan(\phi) \times \tan(\delta) \quad (2.6)$$

Onde,

- $\phi$  = latitude do local [grau];
- $\delta$  = declinação solar [grau].

O número de horas de luz solar pode ser calculado por:

$$N = \frac{2}{15} \arccos(-\tan(\phi) \times \tan(\delta)) \quad (2.7)$$

## 2.4 Radiação Solar

### 2.4.1 Irradiância Solar Extraterrestre

Irradiância solar extraterrestre refere-se à quantificação da intensidade da radiação solar no espaço sideral, antes de qualquer interação com a atmosfera terrestre. Esse parâmetro é uma representação da energia total que é irradiada pelo Sol e que alcança

uma determinada localização espacial, antes de ser influenciada pela atmosfera do nosso planeta.

A expressão para o cálculo da intensidade da Irradiância solar extraterrestre ( $I_0$ ) é fornecida por (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$I_0 = I_{cc}[1.000110 + 0.034221 \cos(B) + 0.001280 \sin(B) + 0.000719 \cos(2B) + 0.000077 \sin(2B)] \pm 0.5\% \quad (2.8)$$

- $I_0$  = Irradiância Extraterrestre [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];

Aqui, a constante solar ( $I_{cc}$ ) é um valor estabelecido aproximadamente como  $1361 \text{ W}/\text{m}^2$ , que representa a energia emitida pelo Sol por unidade de superfície à distância média entre a Terra e o Sol. O termo  $B$ , por outro lado, é conhecido como o ângulo do dia do ano e pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$B = \frac{360n}{365} \quad (2.9)$$

Nesta última equação,  $n$  é a variável que representa o dia do ano, um valor que oscila entre 1 e 365.

## 2.4.2 Irradiância Solar na Superfície Terrestre

Essa energia é emitida na forma de radiação solar e alcança a Terra por meio de uma combinação de radiação direta e difusa. A mensuração da radiação total recebida em um determinado ponto na superfície terrestre é denominada Irradiância Global Horizontal (Global Horizontal Irradiance - GHI), cuja unidade de medida é watts por metro quadrado ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

A radiação direta corresponde à luz solar que alcança a Terra sem sofrer interferência da atmosfera, percorrendo, assim, um trajeto retilíneo do Sol até a superfície. A radiação difusa, por sua vez, refere-se à luz solar que foi dispersa ou refletida por gases atmosféricos, partículas e nuvens antes de atingir a superfície terrestre. Para os propósitos desta análise, considera-se a Irradiância Difusa como sendo isotrópica, ou seja, uniformemente distribuída em todas as direções.

A fórmula geral para a determinação da Irradiância Global Horizontal é a seguinte (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$I_{gh} = I_d + I_{bh} \quad (2.10)$$

Na qual:

- $I_{gh}$  = Irradiância Global Horizontal [W/m<sup>2</sup>];
- $I_d$  = Irradiância Difusa [W/m<sup>2</sup>];
- $I_{bh}$  = Irradiância Direta Horizontal [W/m<sup>2</sup>]

Onde, é definido também:

$$I_{bh} = I_{bn} \times \cos(\theta_z) \quad (2.11)$$

Sendo:

- $I_{bn}$  = Irradiância Direta Normal [W/m<sup>2</sup>];
- $\theta_z$  = ângulo Zenital Solar [grau].

### 2.4.3 Modelo para Cálculo de Radiação Direta e Difusa

Erbs, Klein e Duffie (1982) introduziram uma metodologia para determinar a proporção entre a radiação solar direta e difusa numa base horária. Esta metodologia tem sido amplamente adotada em estudos de energia solar e é crucial na avaliação da eficiência de sistemas solares fotovoltaicos e térmicos.

A metodologia é fundamentada em uma função empírica do "índice de clareza" (clearness index), que é a razão entre a radiação solar que atinge a superfície terrestre e a radiação que seria recebida se a atmosfera estivesse completamente limpa. As equações propostas por Erbs et al. (1982) são usadas para calcular a fração de radiação solar difusa ( $fd$ ) em relação à radiação global com base neste índice. A fração de radiação direta é então obtida subtraindo a fração difusa da radiação global.

Assim, o índice de clareza é definido como:

$$kt = \frac{I_{gh}}{I_0 \times \cos(\theta_z)} \quad (2.12)$$

A fração de radiação solar difusa é calculada da seguinte maneira:

$$fd = \frac{I_d}{I_{gh}} \quad (2.13)$$

Para o índice de clareza ( $kt$ ) menor ou igual a 0.22, a fração difusa ( $fd$ ) é:

$$fd = 1 - 0.09 \times kt \quad (2.14)$$

Para o índice de claridade entre 0.22 e 0.80, a fração difusa é:

$$fd = 0.9511 - 0.1604 \times kt + 4.388 \times kt^2 - 16.638 \times kt^3 + 12.336 \times kt^4 \quad (2.15)$$

E para o índice de claridade maior que 0.8, a fração difusa é:

$$fd = 0.165 \quad (2.16)$$

#### 2.4.4 Radiação em Superfícies Inclinadas

Conforme exposto anteriormente, a orientação de um painel solar é um fator determinante para maximizar a captação de radiação solar. Comumente, os painéis são inclinados em um ângulo equivalente à latitude do local de instalação, visando melhorar a eficiência durante todo o ano. Esta inclinação traz, ainda, a vantagem de facilitar a limpeza dos painéis, permitindo que a chuva remova a sujeira acumulada na superfície com maior facilidade.

A fim de realizar o cálculo da irradiância em superfícies inclinadas, é necessário considerar tanto a irradiância difusa quanto a direta, conforme ilustra a equação abaixo. Além disso, a Irradiância Refletida do Solo também deve ser levada em conta, visto que a inclinação do painel contribui para a absorção dessa energia, como mostra a figura 7. Assim, o cálculo é realizado da seguinte maneira (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$I_{tt} = I_{bt} + I_d \quad (2.17)$$

Onde:

- $I_{tt}$  = Irradiância Total na Superfície Inclinada [W/m<sup>2</sup>];
- $I_{bt}$  = Irradiância Direta na Superfície Inclinada [W/m<sup>2</sup>];
- $I_d$  = Irradiância Difusa [W/m<sup>2</sup>]

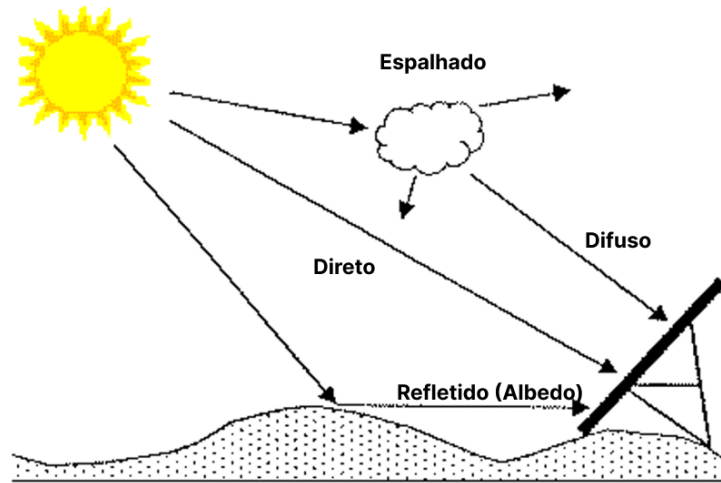


Figura 7 – Imagem ilustrativa mostrando os tipos de irradiações. Adaptado de (ALY, 2019)

### 2.4.5 Irradiância direta em superfície inclinada

Para a determinação desse componente, é imprescindível levar em conta o fator geométrico. Esse fator é utilizado para representar a relação entre a irradiância em uma superfície inclinada e a irradiância em uma superfície horizontal. Tal relação pode ser expressa pela seguinte equação, válida para um azimute de painel igual a zero, ou seja, quando o painel está direcionado para o norte, como é o caso deste estudo:

$$R_b = \frac{\cos(\Phi \pm \beta) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\Phi \pm \beta) \times \sin(\delta)}{\cos(\Phi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\Phi) \times \sin(\delta)} = \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_z} \quad (2.18)$$

Onde,

- $R_b$  = Fator de inclinação;
- $\Phi$  = Latitude [grau];
- $\beta$  = Ângulo de inclinação [grau];
- $\delta$  = Declinação solar [grau];
- $\omega$  = Hora angular [grau].

Nesta formulação desenvolvida por (LIU; JORDAN, 1963), o sinal nos termos  $(\Phi \pm \beta)$  será determinado de acordo com o hemisfério onde o painel solar está situado. Para o Hemisfério Norte, o sinal negativo é adotado, enquanto o sinal positivo é aplicado no caso do Hemisfério Sul.

Em seguida, é possível calcular a Irradiância Direta em Superfície Inclinada ( $I_{bt}$ ), conforme demonstrado na equação:

$$I_{bt} = I_{bh} \times R_b \quad (2.19)$$

Onde,

- $I_{bh}$  = Irradiância Direta Horizontal [W/m<sup>2</sup>].

#### 2.4.5.1 Modelo com radiação difusa isotrópica

O modelo com radiação difusa isotrópica é um modelo matemático e conceitual que foi inicialmente desenvolvido por Hottel e Woertz (1942), tendo sido posteriormente aperfeiçoado por Liu e Jordan (1960). O modelo em questão pressupõe que a Irradiância difusa é distribuída de forma uniforme em todas as direções do hemisfério celeste.

O Modelo com radiação difusa isotrópica pode ser expresso matematicamente pela seguinte equação:

$$I_{tt} = I_{bt} + I_d \times \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + (I_d + I_{bh}) \times \rho \times \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (2.20)$$

Nesta equação:

- $\rho$  = reflectância do solo

## 2.5 Balanço de Energia

A análise do balanço de energia em qualquer sistema é fundamental para compreender a forma como a energia é convertida e utilizada dentro do sistema. Isso é especialmente crucial em aplicações de engenharia, onde a eficiência energética pode ter um impacto significativo no desempenho do sistema. A principal lei que rege essa análise é a primeira lei da termodinâmica (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

A equação geral de balanço de energia, de acordo com a 1ª Lei da Termodinâmica, é dada por:

$$\frac{dE_t}{dt} = \sum \dot{Q} + \sum \dot{W} \quad (2.21)$$

Os termos na equação representam:

- $E_t$ : Energia total do sistema [J]
- $t$ : Tempo [s]
- $\dot{Q}$ : Fluxos de calor por convecção, condução e/ou radiação [W]
- $\dot{W}$ : Trabalho realizado sobre o sistema [W]

## 2.6 Comportamento Elétrico dos Painéis Fotovoltaicos

O comportamento elétrico dos dispositivos fotovoltaicos é analisável por meio de suas características de tensão-corrente ( $I \times V$ ) e tensão-potência ( $V \times P$ ). Essas características são fundamentais para a determinação de três parâmetros críticos: a tensão de circuito aberto ( $V_{ca}$ ), a corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ ) e a potência máxima ou nominal ( $P_{max}$ ) (BÜHLER, 2023). A Figura 8 mostra as curvas adquiridas sob condições padrão de teste, as quais incluem uma irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$  sobre o módulo e uma temperatura de célula de  $25^\circ\text{C}$ .

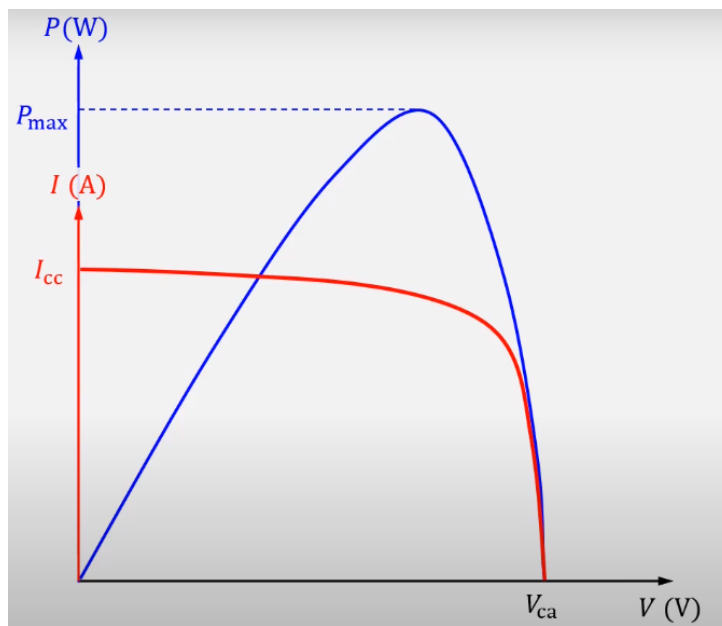


Figura 8 – Características I-V e V-P sob condições padrão:  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ . Adaptado de (BÜHLER, 2023)

Sob condições de irradiação inferior a  $1000 \text{ W/m}^2$ , como em cenários de incidência angular dos raios solares ou em dias nublados, observa-se uma variação mínima em  $V_{ca}$ , enquanto  $I_{cc}$  diminui proporcionalmente. Por exemplo, com uma irradiação de  $500 \text{ W/m}^2$ , a corrente de curto-circuito decresce aproximadamente pela metade. A curva de potência mantém sua forma, mas o seu pico reduz-se proporcionalmente, refletindo a menor quantidade de energia captada pelo módulo, conforme demonstrado na Figura 9.



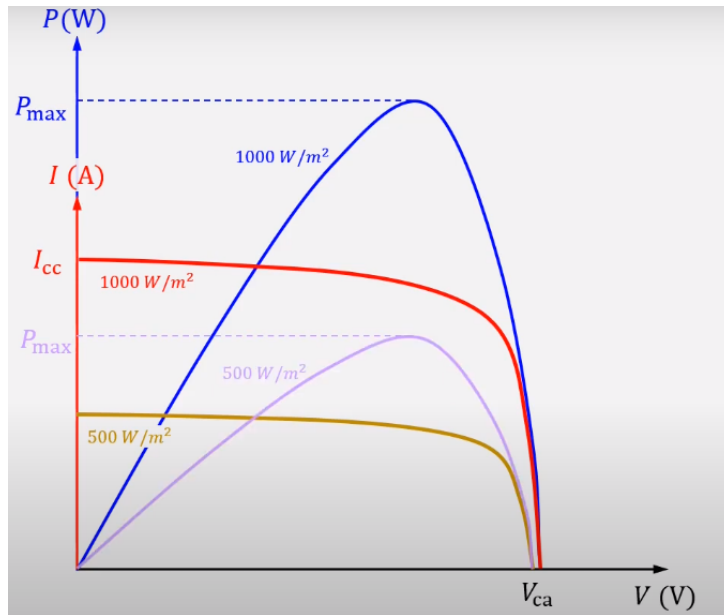


Figura 9 – Efeito de irradiação reduzida ( $500 \text{ W/m}^2$ ) nas curvas I-V e V-P. Adaptado de (BÜHLER, 2023)

Nas condições padrão de teste, a temperatura das células do módulo é mantida a  $25^\circ\text{C}$ . Contudo, em operação normal, esta temperatura geralmente difere. Com temperaturas celulares elevadas, por exemplo,  $50^\circ\text{C}$ ,  $I_{cc}$  apresenta um leve aumento, mas  $V_{ca}$  reduz-se significativamente. Consequentemente,  $P_{max}$  diminui em alguns décimos de um ponto percentual por cada grau de elevação na temperatura das células. Isso implica que, sob a mesma irradiância, um módulo fotovoltaico será mais eficiente em ambientes mais frios, como evidenciado na Figura 10.

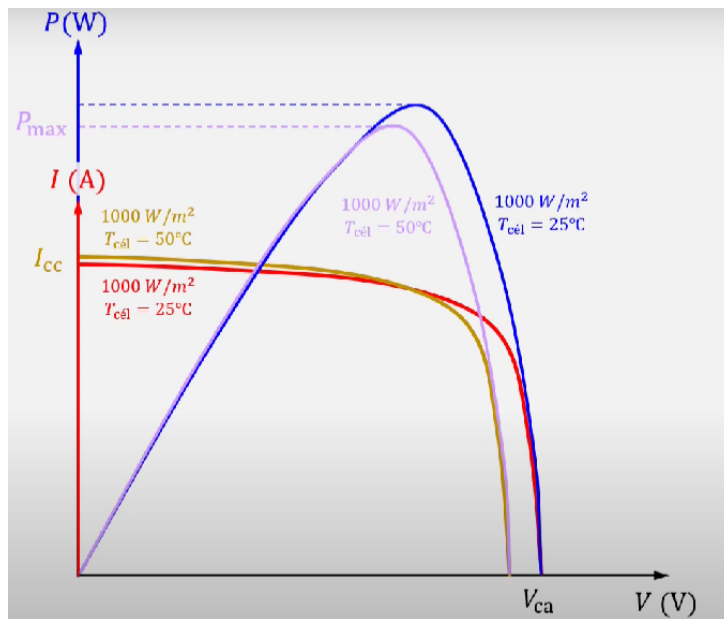


Figura 10 – Impacto de alta temperatura celular ( $50^\circ\text{C}$ ) em I-V e V-P. Adaptado de (BÜHLER, 2023)

## 2.7 Fluxos de calor

Um elemento essencial na equação 2.21 é o termo  $\dot{Q}$ , que representa os fluxos de calor. Os fluxos de calor são essencialmente as formas pelas quais a energia é transferida em virtude de uma diferença de temperatura. Esses fluxos podem ocorrer de três formas principais: condução, convecção e radiação.

### 2.7.1 Fluxo de calor por condução

A condução é o processo de transferência de energia térmica entre substâncias em contato direto. Isso ocorre devido às vibrações das moléculas na substância mais quente que são passadas para as moléculas na substância mais fria. A equação que descreve a condução de calor é a Lei de Fourier, dada por:

$$\dot{Q}_{cond} = -kAs \frac{dT}{dx} \quad (2.22)$$

Os termos na equação representam:

- $\dot{Q}_{cond}$ : Fluxo de calor por condução [W]
- $k$ : Condutividade térmica do material [W/m.K]
- $As$ : Área através da qual o calor é conduzido [m<sup>2</sup>]
- $\frac{dT}{dx}$ : Gradiente de temperatura (taxa de variação da temperatura com a espessura) [K/m]

### 2.7.2 Fluxo de calor por convecção

A convecção é o processo de transferência de energia térmica entre uma superfície sólida e um fluido em movimento. Isso acontece devido ao movimento do fluido, que permite que o calor seja transportado de uma região para outra. A equação que descreve a convecção de calor é a Lei de Newton do resfriamento, dada por:

$$\dot{Q}_{conv} = hAs(T_s - T_{amb}) \quad (2.23)$$

Os termos na equação representam:

- $h$ : Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m<sup>2</sup>.K]
- $As$ : Área da superfície em contato com o fluido [m<sup>2</sup>]
- $T_s$ : Temperatura da superfície [K]

- $T_{amb}$ : Temperatura do fluido (ou ambiente) [K]

### 2.7.3 Fluxo de calor por radiação térmica

A radiação térmica é o processo de transferência de energia por meio de ondas eletromagnéticas. Diferentemente da condução e da convecção, a radiação pode ocorrer no vácuo, pois não requer um meio para sua propagação. A equação que descreve a radiação de calor é a Lei de Stefan-Boltzmann, dada por:

$$\dot{Q}_{emit} = \epsilon\sigma A_s T_s^4 \quad (2.24)$$

Os termos na equação representam:

- $\epsilon$ : Emissividade do material (sem dimensões, variando entre 0 e 1)
- $\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )
- $A_s$ : Área da superfície que emite radiação [ $\text{m}^2$ ]
- $T_s$ : Temperatura da superfície [K]

## 3 Modelagem Numérica

Para obter uma quantificação mais precisa da energia gerada em cada um dos sistemas propostos - ou seja, o sistema de placas solares fixas em terra e o sistema de placas flutuantes -, é necessário levar em consideração todos os componentes que compõem essas placas. Dessa forma, a influência da temperatura poderá ser considerada com menor probabilidade de erros. Essa abordagem é fundamental, já que o objetivo deste estudo é analisar a diferença de eficiência entre os dois sistemas propostos e essa diferença em termos de dimensão pode não ser significativa, e os erros poderiam distorcer os resultados obtidos.

As equações empregadas nesta análise de balanço energético foram obtidas a partir da pesquisa de (LIMA, 2019) e foram implementadas no código MATLAB. Essas equações serão apresentadas neste trabalho para uma compreensão mais abrangente do assunto.

### 3.0.1 Componentes

Na presente análise, serão considerados os seguintes elementos no balanço de energia da placa, conforme ilustrado na Figura 11.

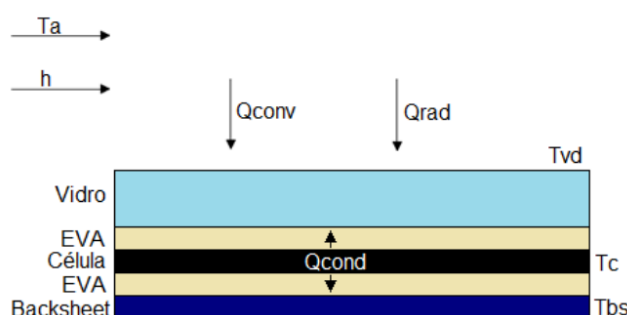


Figura 11 – Componentes e tipos de energias de um painel solar. Adaptado de (LIMA, 2019)

Sendo:

- $Q_{conv}$ : Calor transferido por convecção
- $Q_{rad}$ : Calor transferido por radiação

- $Q_{cond}$ : Calor transferido por condução
- $T_a$ : Temperatura do ar
- $T_{vd}$ : Temperatura do vidro
- $T_c$ : Temperatura da célula
- $T_{tbs}$ : Temperatura do Backsheet

É importante ressaltar que, nesse contexto, o material EVA atua como uma resistência térmica, sem exercer influência no balanço energético através da transferência de calor.

### 3.0.1.1 Célula solar

O balanço de energia para as células fotovoltaicas é determinado pela equação 3.1.

$$den_{cel} \cdot c_{cel} \cdot d_{cel} \cdot A_p \cdot \frac{dT_{cel}}{dt} = \dot{Q}_{SW,cel} - \dot{Q}_{cond,cel} - P \quad (3.1)$$

Sendo:

- $den_{cel} \cdot c_{cel} \cdot d_{cel} \cdot A_p \cdot \frac{dT_{cel}}{dt}$  :
  - Este termo representa a taxa de variação da energia térmica armazenada nas células fotovoltaicas.
  - $den_{cel}$  é a densidade para as células [kg/m<sup>3</sup>].
  - $c_{cel}$  é o calor específico das células fotovoltaicas [J/(kg · K)].
  - $d_{cel}$  é a espessura das células fotovoltaicas [m].
  - $A_p$  é a área das células fotovoltaicas expostas [m<sup>2</sup>].
  - $\frac{dT_{cel}}{dt}$  é a taxa de variação da temperatura das células fotovoltaicas com o tempo [K/s].
- $\dot{Q}_{SW,cel}$  :
  - Representa a irradiância total devido a radiação solar absorvida pela célula
- $\dot{Q}_{cond,cel}$  :
  - Representa a perda de calor nas células fotovoltaicas devido à condução.
- $P$  :
  - Representa a potência elétrica produzida pelas células fotovoltaicas, que é um termo de perda de calor.

O termo de radiação solar de ondas curtas ( $SW$ ), representado pela equação 3.2, é composto por duas componentes: a irradiância incidente proveniente do sol ( $SW_{cel,1}$ ) e a irradiância refletida na superfície do local onde a placa está instalada ( $SW_{cel,2}$ ). Estas componentes são representadas pelas equações 3.3 e 3.4, respectivamente.

$$\dot{Q}_{SW,cel} = (SW_{cel,1} + SW_{cel,2}) \cdot A_p \quad (3.2)$$

$$SW_{cel,1} = G_t \cdot (1 - \rho_{vidro})(1 - \alpha_{vidro}) \cdot \alpha_{cel} \quad (3.3)$$

$$SW_{cel,2} = [(G_b \cdot \cos(\theta_z) + G_d \cdot F_{sup}) \cdot (1 - \rho_{vidro})(1 - \alpha_{vidro}) \cdot \alpha_{cel}] \quad (3.4)$$

Sendo:

- $SW_{cel,1}$  :
  - Refere-se à irradiância solar total ( $G_t$ ) que atinge diretamente as células fotovoltaicas, após passar pelo vidro.
  - $\rho_{vidro}$  é a fração da radiação refletida pelo vidro.
  - $\alpha_{vidro}$  é a fração da radiação absorvida pelo vidro.
  - $\alpha_{cel}$  é a absortividade das células fotovoltaicas, indicando a fração da radiação que é absorvida por elas.
- $SW_{cel,2}$  :
  - Refere-se à componente refletida na superfície
  - $G_b$  é a componente da irradiância solar direta
  - $\cos(\theta_z)$  é o cosseno do ângulo zenital do sol.
  - $G_d$  é a irradiância solar difusa.
  - $F_{sup}$  é o fator de visão da parte superior da célula.
  - Os termos  $(1 - \rho_{vidro})$  e  $(1 - \alpha_{vidro})$  representam a fração da radiação que não é refletida nem absorvida pelo vidro, respectivamente, e  $\alpha_{cel}$  é a fração dessa radiação que é absorvida pelas células.

### 3.0.1.2 Vidro

O balanço de energia para o vidro é determinado pela seguinte equação:

$$\text{den}_{\text{vidro}} \cdot C_{\text{vidro}} \cdot d_{\text{vidro}} \cdot A_p \frac{dT_{\text{vidro}}}{dt} = \dot{Q}_{SW,\text{vidro}} + \dot{Q}_{LW,\text{vidro}} + \dot{Q}_{\text{cond},\text{vidro}} - \dot{Q}_{\text{conv},\text{vidro}} \quad (3.5)$$

Dentre os termos apresentados, tem-se:

- $\text{den}_{\text{vidro}} \cdot C_{\text{vidro}} \cdot d_{\text{vidro}} \cdot A_p \frac{dT_{\text{vidro}}}{dt}$  :
  - Este é o termo de acúmulo de energia, que representa a taxa de variação da energia térmica armazenada no vidro.
  - $\text{den}_{\text{vidro}}$  é a densidade do vidro [kg/m<sup>3</sup>].
  - $C_{\text{vidro}}$  é o calor específico do vidro [J/(kg · K)].
  - $d_{\text{vidro}}$  é a espessura do vidro [m].
  - $A_p$  é a área da placa solar [m<sup>2</sup>].
  - $\frac{dT_{\text{vidro}}}{dt}$  é a taxa de variação da temperatura do vidro com o tempo [K/s].
- $\dot{Q}_{SW,\text{vidro}}$  :
  - Este é o ganho de calor devido à radiação solar de onda curta absorvida pelo vidro.
- $\dot{Q}_{LW,\text{vidro}}$  :
  - Este é o ganho ou perda de calor devido à radiação de onda longa trocada entre o vidro e os arredores.
- $\dot{Q}_{cond,\text{vidro}}$  :
  - Este é o ganho de calor devido à condução através do vidro.
- $\dot{Q}_{conv,\text{vidro}}$  :
  - Essa é a perda de calor devido à convecção através do vidro.

No caso do vidro, os termos de  $SW$ , equação 3.6, tem três contribuições. Além da irradiância incidente do sol e a refletida no solo, ainda existe a refletida na célula e a absorvida pelo vidro, respectivamente pelas equações 3.7, 3.8 e 3.9.

$$\dot{Q}_{SW,\text{vidro}} = (SW_{\text{vidro},1} + SW_{\text{vidro},2} + SW_{\text{vidro},3}) \cdot A_p \quad (3.6)$$

$$SW_{\text{vidro},1} = G_t(1 - \rho_{\text{vidro}}) \cdot \alpha_{\text{vidro}} \quad (3.7)$$

$$SW_{\text{vidro},2} = [G_b \cdot \cos(\theta_z) + G_d] \cdot F_{sup} \cdot (1 - \rho_{\text{vidro}}) \cdot \alpha_{\text{vidro}} \quad (3.8)$$

$$SW_{\text{vidro},3} = (G_t + [G_b \cdot \cos(\theta_z) + G_d] \cdot \rho_c \cdot F_{sup}) \cdot (1 - \rho_{\text{vidro}}) \cdot (1 - \alpha_{\text{vidro}}) \cdot \rho_{cel} \cdot (1 - \tau_{\text{vidro}}) \quad (3.9)$$

Dentre os termos apresentados, tem-se:

- $SW_{vidro,1}$  :
  - Representa a parte da irradiância solar direta que é absorvida pelo vidro.
  - $G_t$  é a irradiância solar direta total.
  - $\rho_{vidro}$  é a refletividade do vidro.
  - $\alpha_{vidro}$  é a absorvidade do vidro.
- $SW_{vidro,2}$  :
  - Representa a contribuição da irradiância solar refletida que é absorvida pelo vidro.
  - $G_b$  é a componente da irradiância solar direta
  - $\cos(\theta_z)$  é o cosseno do ângulo zenital do sol.
  - $G_d$  é a irradiância solar difusa.
  - $F_{sup}$  é o fator de visão da parte superior da célula.
- $SW_{vidro,3}$  :
  - Representa a radiação refletida pela célula e absorvida pelo vidro.
  - $\rho_c$  é a refletividade da célula solar.
  - $1 - \tau_{vidro}$  é a fração da radiação que não é transmitida pelo vidro.

Para ondas de comprimento longo, é observada a existência de radiação térmica proveniente do céu, da superfície do concreto ou da água (no caso de painéis flutuantes), além da absorção dessa radiação pelo vidro, bem como a emissão de radiação térmica pelo próprio vidro. Esses fenômenos podem ser descritos pelas equações 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13.

$$\dot{Q}_{LW,vidro} = (LW_{vidro,1} + LW_{vidro,2} + LW_{vidro,3}) \cdot A_p \quad (3.10)$$

$$LW_{vidro,1} = G_{sky} \cdot F_{sky} \quad (3.11)$$

$$LW_{vidro,2} = \varepsilon_c \cdot \alpha \cdot F_{sup} \cdot T_{sup}^4 \quad (3.12)$$

$$LW_{vidro,3} = -\varepsilon_{vidro} \cdot \sigma \cdot F_{sup} \cdot T_{vidro}^4 \quad (3.13)$$

A descrição dos termos é a seguinte:

- $LW_{vidro,1}$  :
  - Corresponde à radiação térmica do céu que é absorvida pelo vidro.



- $G_{sky}$  é a irradiância de onda longa do céu.
- $F_{sky}$  é o fator de visão do céu para o vidro.
- $LW_{vidro,2}$  :
  - Refere-se à radiação térmica emitida por superfícies próximas, como concreto ou água, que é absorvida pelo vidro.
  - $\varepsilon_c$  é a emissividade destas superfícies.
  - $F_{sup}$  é o fator de visão entre estas superfícies e o vidro.
  - $T_{sup}^4$  é a temperatura destas superfícies elevada à quarta potência.
- $LW_{vidro,3}$  :
  - É a radiação térmica emitida pelo próprio vidro.
  - $-\varepsilon_{vidro}$  é a emissividade do vidro, com o sinal negativo indicando perda de calor.
  - $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann.
  - $F_{sup}$  é o fator de visão do vidro para o ambiente.
  - $T_{vidro}^4$  é a temperatura do vidro elevada à quarta potência.

O termo convectivo é calculado pela equação 3.14:

$$\dot{Q}_{conv,vidro} = h \cdot A_p \cdot (T_{vidro} - T_a) \quad (3.14)$$

É importante ressaltar que o estudo realizado por (LIMA, 2019) levou em consideração a manutenção de uma temperatura constante na espessura do vidro ao estimar o termo transiente, assim como os demais componentes envolvidos. Tal abordagem é coerente devido à pequena espessura do vidro e ao fato de que a absorção de radiação solar é um processo volumétrico.

### 3.0.1.3 Backsheet

O balanço de energia para o Backsheet é determinado pela seguinte equação:

$$\text{den}_{bs} \cdot c_{bs} \cdot d_{bs} \cdot A_p \frac{dT_{bs}}{dt} = \dot{Q}_{SW,bs} + \dot{Q}_{LW,bs} + \dot{Q}_{cond,bs} - \dot{Q}_{conv,bs} \quad (3.15)$$

Dentre os termos apresentados, tem-se:

- $\text{den}_{bs} \cdot c_{bs} \cdot d_{bs} \cdot A_p \frac{dT_{bs}}{dt}$  :
  - Este é o termo de acúmulo de energia, que representa a taxa de variação da energia térmica armazenada no Backsheet.

- $\text{den}_{bs}$  é a densidade do Backsheet [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].
- $c_{bs}$  é o calor específico do Backsheet [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ].
- $d_{bs}$  é a espessura do Backsheet [ $\text{m}$ ].
- $A_p$  é a área da placa solar [ $\text{m}^2$ ].
- $\frac{dT_{bs}}{dt}$  é a taxa de variação da temperatura do Backsheet com o tempo [ $\text{K}/\text{s}$ ].
- $\dot{Q}_{SW,bs}$  :
  - Este é o ganho de calor devido à radiação solar de onda curta absorvida pelo Backsheet.
- $\dot{Q}_{LW,bs}$  :
  - Este é o ganho ou perda de calor devido à radiação de onda longa trocada entre o Backsheet e os arredores.
- $\dot{Q}_{cond,bs}$  :
  - Este é o ganho de calor devido à condução através do Backsheet.
- $\dot{Q}_{conv,bs}$  :
  - Este é a perda de calor devido à convecção entre o Backsheet e o ambiente.

Os termos de SW, equação 3.16, são apenas dois, a incidente do sol (somente difusa), equação 3.17, e a refletida no solo, equação 3.18:

$$\dot{Q}_{SW,bs} = (SW_{bs,1} + SW_{bs,2}) \cdot A_p \quad (3.16)$$

$$SW_{bs,1} = (G_d \cdot F_{c\acute{e}u,bs}) \cdot a_{bs} \quad (3.17)$$

$$SW_{bs,2} = [(G_b \cdot \cos(\theta_z) + G_D] \cdot \rho_c \cdot F_{sup,bs}) \cdot a_{bs} \quad (3.18)$$

Dentre os termos apresentados, tem-se:

- $SW_{bs,1}$  :
  - Representa a componente da radiação solar difusa incidente ( $G_d$ ) que atinge o Backsheet.
  - $F_{c\acute{e}u,bs}$  é o fator de visão entre o céu e a face superior do Backsheet.
  - $a_{bs}$  é a absortividade do Backsheet para a radiação solar.
- $SW_{bs,2}$  :

- Refere-se à radiação solar refletida pelo solo que atinge o Backsheet.
- $G_b$  é a componente da radiação solar direta que incide no solo.
- $\cos(\theta_z)$  é o cosseno do ângulo zenital, influenciando a quantidade de radiação direta refletida.
- $G_D$  é a componente difusa da radiação solar.
- $\rho_c$  é o coeficiente de reflexão do solo.
- $F_{sup,bs}$  é o fator de visão entre o solo e o Backsheet.
- $a_{bs}$  é a absorvidade do Backsheet, afetando a quantidade de radiação refletida que é absorvida.

Para as ondas longas, a equação 3.19 mostra os termos relacionados à radiação térmica do céu, à radiação térmica emitida pela superfície do concreto e absorvida pelo backsheet, e à radiação térmica emitida pelo backsheet, indicados respectivamente pelas equações 3.20, 3.21 e 3.22.

$$\dot{Q}_{LW,bs} = (LW_{bs,1} + LW_{bs,2} + LW_{bs,3}) \cdot A_p \quad (3.19)$$

$$LW_{bs,1} = \varepsilon_{sky} \cdot F_{sup} \quad (3.20)$$

$$LW_{bs,2} = \varepsilon_c \cdot \alpha \cdot F_{sup,bs} \cdot T_{sup}^4 + F_{sombra} \cdot T_{sup}^4 \quad (3.21)$$

$$LW_{bs,3} = -\varepsilon_{bs} \cdot \sigma \cdot T_{bs}^4 \quad (3.22)$$

Dentre os termos apresentados, tem-se:

$LW_{bs,1}$  :

- É a radiação de onda longa proveniente do céu que incide no Backsheet.
- $\varepsilon_{sky}$  é a emissividade do céu.
- $F_{sup}$  é o fator de visão entre o céu e a superfície superior do Backsheet.

$LW_{bs,2}$  :

- É a radiação de onda longa emitida por uma superfície próxima e que incide no Backsheet.
- $\varepsilon_c$  é a emissividade dessa superfície.

- $F_{sup,bs}$  é o fator de visão entre a superfície próxima e o Backsheet.
- $T_{sup}^4$  é a temperatura da superfície próxima elevada à quarta potência.
- $F_{sombra}$  é o fator de visão ajustado para áreas em sombra.

$LW_{bs,3}$  :

- É a radiação de onda longa emitida pelo próprio Backsheet.
- $-\varepsilon_{bs}$  é a emissividade negativa do Backsheet, indicando a perda de calor.
- $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann.
- $T_{bs}^4$  é a temperatura do Backsheet elevada à quarta potência.

Semelhante ao vidro, a convecção é calculada pela equação 3.23:

$$\dot{Q}_{conv,bs} = h \cdot A_p \cdot (T_{bs} - T_a) \quad (3.23)$$

A condução é estimada como o residual do balanço para o backsheet, na equação 3.24.

$$\dot{Q}_{cond,bs} = d_{ens} \cdot c_{bs} \cdot d_{bs} \cdot A_p \cdot \frac{dT_{bs}}{dt} - (\dot{Q}_{SW,bs} - \dot{Q}_{LW,bs} + \dot{Q}_{conv,bs}) \quad (3.24)$$

### 3.0.2 Resolução das equações

Depois de elaborar todos os balanços energéticos dos componentes do sistema, foi desenvolvido um código para solucionar essas equações. O modelo proposto consiste em resolver as equações diferenciais ordinárias (EDOs) resultantes dos balanços de energia para os componentes dos painéis solares, a saber, célula (Eq.3.1), vidro (Eq.3.5) e backsheet (Eq.3.24). Dado que essas equações não possuem solução analítica, é necessário recorrer à resolução numérica. Devido à presença de uma forte não-linearidade, escolheu-se utilizar o método de Newton-Raphson para calcular a evolução da temperatura ao longo do tempo. Para executar o código, são necessários dados de entrada, incluindo as propriedades físicas e operacionais do painel (especificações técnicas fornecidas pelo fabricante) e dados meteorológicos, tais como irradiância global horizontal, temperatura e umidade do ar, e velocidade do vento.

### 3.1 Eficiência

Para determinar a eficiência dos sistemas em questão, foi utilizado como referência o trabalho conduzido por (SKOPLAKI; PALYVOS, 2009b). Neste estudo, destaca-se a relação entre a eficiência energética e a temperatura, bem como a fórmula adotada nos códigos desse estudo.

Este estudo tem como um dos objetivos analisar a relação entre a temperatura e a eficiência elétrica de células fotovoltaicas. Nesse contexto, é válido ressaltar que a temperatura de operação exerce uma considerável influência nessa eficiência. Essa variável influencia diretamente a corrente ( $I$ ) e a tensão ( $V$ ) do dispositivo, que por sua vez determinam a potência máxima ( $P_{\max}$ ) que o módulo pode gerar. Essa relação pode ser expressa pela equação descrita por Zondag et al. (ZONDAG et al., 2003):

$$P_{max} = V_m \cdot I_m = (FF) \cdot V_{ca} \cdot I_{cc} \quad (3.25)$$

Onde  $FF$  é o fator de preenchimento do módulo,  $V_{ca}$  é a tensão de circuito aberto e  $I_{cc}$  é a corrente de curto-circuito.

Conforme a temperatura aumenta,  $V_{ca}$  tende a diminuir, uma vez que os elétrons termicamente excitados passam a dominar a condução nos semicondutores. A corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ ) pode aumentar ligeiramente, mas a redução em  $V_{ca}$  é mais significativa, resultando em uma eficiência geral menor. A eficiência do módulo em relação à temperatura é descrita pela seguinte equação:

$$\eta = \eta_r [1 - \beta(T_c - T_{ref}) + \gamma \log(G)] \quad (3.26)$$

Aqui,  $\eta_r$  representa a eficiência na referência de temperatura ( $T_{ref}$ ), e  $G$  é a irradiação solar de referência de  $1000 \text{ W/m}^2$ . O coeficiente de temperatura,  $\beta$ , é uma propriedade intrínseca do material do módulo fotovoltaico e normalmente possui um valor em torno de  $0.004 \text{ K}^{-1}$  para células de silício monocristalino.

Frequentemente, o termo associado a  $\gamma$  é considerado nulo para simplificar a análise, reduzindo a equação a (EVANS, 1981):

$$\eta = \eta_r [1 - \beta(T_c - T_{ref})] \quad (3.27)$$

Essa forma simplificada é comumente usada para descrever a eficiência dos módulos fotovoltaicos como uma função linear da temperatura e é a equação utilizada nos códigos desse projeto. Os valores de  $\eta_r$  e  $\beta$  são fornecidos pelos fabricantes dos módulos, mas também podem ser obtidos por meio de testes que medem a saída elétrica do módulo em diferentes temperaturas sob uma radiação solar constante, neste caso, o coeficiente

de temperatura da potência de pico ( $\beta$ ) foi considerado como sendo  $0.0039^\circ C^{-1}$  e esta informação foi obtida do fabricante, conforme apresentado no apêndice do trabalho.

## 3.2 Potência Gerada

A quantificação da energia elétrica produzida por um módulo fotovoltaico pode ser prevista pela seguinte equação:

$$P_{gen} = \eta \cdot \dot{Q}_{SW,cel} \quad (3.28)$$

Na equação acima,  $\dot{Q}_{SW,cel}$  é determinado pela equação 3.2.

### 3.2.1 Temperatura acima do corpo d'água

A temperatura ambiente incidente sobre o painel fixo é determinada pela medição disponível nos dados do INMET. No entanto, referindo-se ao painel flutuante, a obtenção de sua temperatura não é tão simples, uma vez que sofre influência direta da evaporação, a qual é um processo de resfriamento. Isso ocorre devido ao fato de que as moléculas de água evaporadas da superfície levam consigo calor na forma de energia latente. Consequentemente, a superfície da água perde calor frequentemente através da evaporação, resultando em temperaturas mais baixas no ar acima dela. (GUPTA; MATHEW; KHANDELWAL, 2019).

Para avaliar a temperatura atmosférica sobre uma superfície aquática, emprega-se o conceito de temperatura virtual, conforme definido por (STULL, 1988). A temperatura virtual é caracterizada como a temperatura que um volume de ar seco necessitaria para igualar a densidade de um volume equivalente de ar úmido. É crucial notar que a temperatura virtual tende a aumentar proporcionalmente à umidade relativa do ar. Isso ocorre porque o incremento da umidade reduz a densidade do ar, e, para que o ar seco atinja essa mesma densidade reduzida, sua temperatura deve ser mais elevada. Assim, reconhece-se que o ar úmido é intrinsecamente menos denso do que o ar seco.

A expressão matemática para a temperatura virtual, simbolizada por  $T_v$ , incorpora a umidade e oferece uma versão ajustada da temperatura do ar. Ela é descrita pela equação (STULL, 1988):

$$T_v = T_{md}(1 + 0.61r) \quad (3.29)$$

Para a porção acima da água, foi considerado o caso de ambiente saturado:

$$T_{v,\acute{a}gua} = T_{ar,\acute{a}gua}(1 + 0.61r_{sat}) \quad (3.30)$$

onde  $T$  representa a temperatura do ar em Kelvin e  $r$  é a razão de mistura, que se refere à quantidade de vapor de água por unidade de ar seco, medida em quilogramas. O coeficiente 0.61 origina-se da relação entre as massas moleculares do vapor de água e do ar seco.

A razão de mistura ( $r$ ) é calculada através da expressão:

$$r = \frac{m_{vapor}}{m_{ar,seco}} = \frac{P_v \cdot R_{ar}}{R_{\acute{a}gua} \cdot P_{ar}} \quad (3.31)$$

Desenvolvendo a fórmula, obtém-se:

$$r = \frac{U \cdot P_{vsat} \cdot R_{ar}}{R_{\acute{a}gua} \cdot P_{ar}} \quad (3.32)$$

Neste contexto, as variáveis são definidas da seguinte maneira:

- $m_{vapor}$ : Massa de vapor de água [kg]
- $m_{ar,seco}$ : Massa de ar seco [kg]
- $U$ : Umidade relativa [sem dimensões]
- $P_{vsat}$ : Pressão de saturação do vapor [Pa]
- $R_{ar}$ : Constante de gás para o ar [J/(kg · K)]
- $R_{\acute{a}gua}$ : Constante de gás para a água [J/(kg · K)]
- $P_{ar}$ : Pressão atmosférica [Pa]

A temperatura virtual é mantida uniforme tanto para o ar acima do solo quanto para o ar acima da água a uma determinada altura. Neste cenário, considera-se que a temperatura acima da água está saturada, enquanto a temperatura acima do solo não está. Portanto, toda diferença de temperatura observada no ar é devida à umidade presente nele. A determinação da temperatura do ar sobre um corpo d'água ( $T_{ar,agua}$ ) é alcançada por meio da combinação da temperatura medida ( $T_{md}$ ) com as razões de mistura previamente calculadas, conforme expressado pela seguinte relação:

$$T_{ar,agua} = T_{md} \cdot \frac{(1 + 0.61 \cdot r)}{(1 + 0.61 \cdot r_{sat})} \quad (3.33)$$

Esta equação possibilita a estimação da temperatura real do ar acima da água, corrigindo as variações causadas pela umidade.

Onde:

- $T_{md}$ : Temperatura medida [K]

- $r$ : Razão de mistura do ar atual [sem dimensões]

Na equação 3.33  $r_{sat}$  é a razão de mistura de saturação, dada por:

$$r_{sat} = \frac{r}{U} \quad (3.34)$$



## 4 Metodologia

Para atingir os objetivos delineados neste estudo, o projeto de graduação foi estruturado em três fases principais.

Na fase inicial do estudo, adotou-se um modelo de conversão da irradiância global horizontal ( $I_{gh}$ ) para a irradiância no plano do painel fotovoltaico, que possui uma inclinação específica. Este processo é detalhado no referencial teórico. Dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram utilizados, incluindo medidas de radiação global, temperatura, umidade do ar e velocidade do vento específicas para a região de Brasília, DF.

Esses dados foram utilizados para o cálculo da radiação solar incidente nos painéis. O modelo de Erbs, Klein e Duffie (1982), descrito na seção 2.4.3, foi empregado para estabelecer uma relação entre a radiação global e a radiação extraterrestre (referenciada em 2.8). A partir desta relação, determinou-se um índice de claridade ( $kt$ ), conforme indicado em 2.4.3. Esse índice é crucial para estabelecer a fração da radiação difusa em relação à radiação total, como descrito em 2.4.3.

A segunda fase deste estudo tem por objetivo determinar a eficiência dos painéis solares terrestres. Para esta finalidade, utilizou-se a modelagem descrita na seção 3.2 deste trabalho, levando-se em consideração o balanço energético dos componentes da placa solar, bem como as interferências causadas pela superfície onde a placa está fixada no intercâmbio de energia térmica do sistema, conforme apresentado no tópico 3. Esta etapa desempenha um papel crucial na compreensão dos aspectos relacionados ao desempenho dos painéis solares terrestres, considerando variáveis como a inclinação e orientação da placa, a temperatura ambiente, além das variações climáticas na região.

A terceira fase é dedicada à determinação da eficiência do painel solar flutuante. Aqui, utilizou-se a mesma modelagem da fase anterior, com a diferença de que agora se considera a influência da redução de temperatura causada pela evaporação superficial do corpo d'água no qual o painel está instalado que está descrita no tópico 3.2.1. Esta etapa permitirá avaliar o potencial de melhora na eficiência dos painéis solares flutuantes devido ao efeito de resfriamento natural proporcionado pelo ambiente aquático.

Após a conclusão destas três fases, será possível realizar uma comparação sistemática entre os dois tipos de sistemas fotovoltaicos, determinando as diferenças em termos

de eficiência, bem como identificar os benefícios e desafios associados a cada configuração.

## 5 Discussão e resultados

Este capítulo é dedicado à apresentação e interpretação dos resultados obtidos ao longo do estudo, em consonância com os objetivos propostos. A análise começa com a investigação do comportamento da Irradiância na superfície inclinada dos painéis solares. Destaca-se que, devido à localização idêntica dos painéis flutuantes e terrestres, a variação de Irradiância entre eles não se apresenta como um diferencial nesta análise.

A partir de uma rotina programada em Matlab, seguindo os princípios e conceitos apresentados anteriormente na seção de referencial teórico e metodologia, foram obtidos os resultados discutidos. Essa programação possibilitou a modelagem da irradiância incidente nos painéis e a análise do impacto da localização do painel flutuante na temperatura. Além disso, foi estabelecido também o cálculo do balanço energético entre os componentes da placa, com o objetivo de determinar a temperatura mais precisa da célula.

### 5.1 Diferença das Temperaturas dos Painéis

Aplicando a metodologia exposta na seção 3.2.1, foi possível estabelecer uma relação entre as temperaturas ambiente, obtidas por meio dos dados coletados pelo INMET, a temperatura acima da água e, por fim, a temperatura de Bulbo Úmido, também proveniente do INMET, conforme apresentado no gráfico 12.

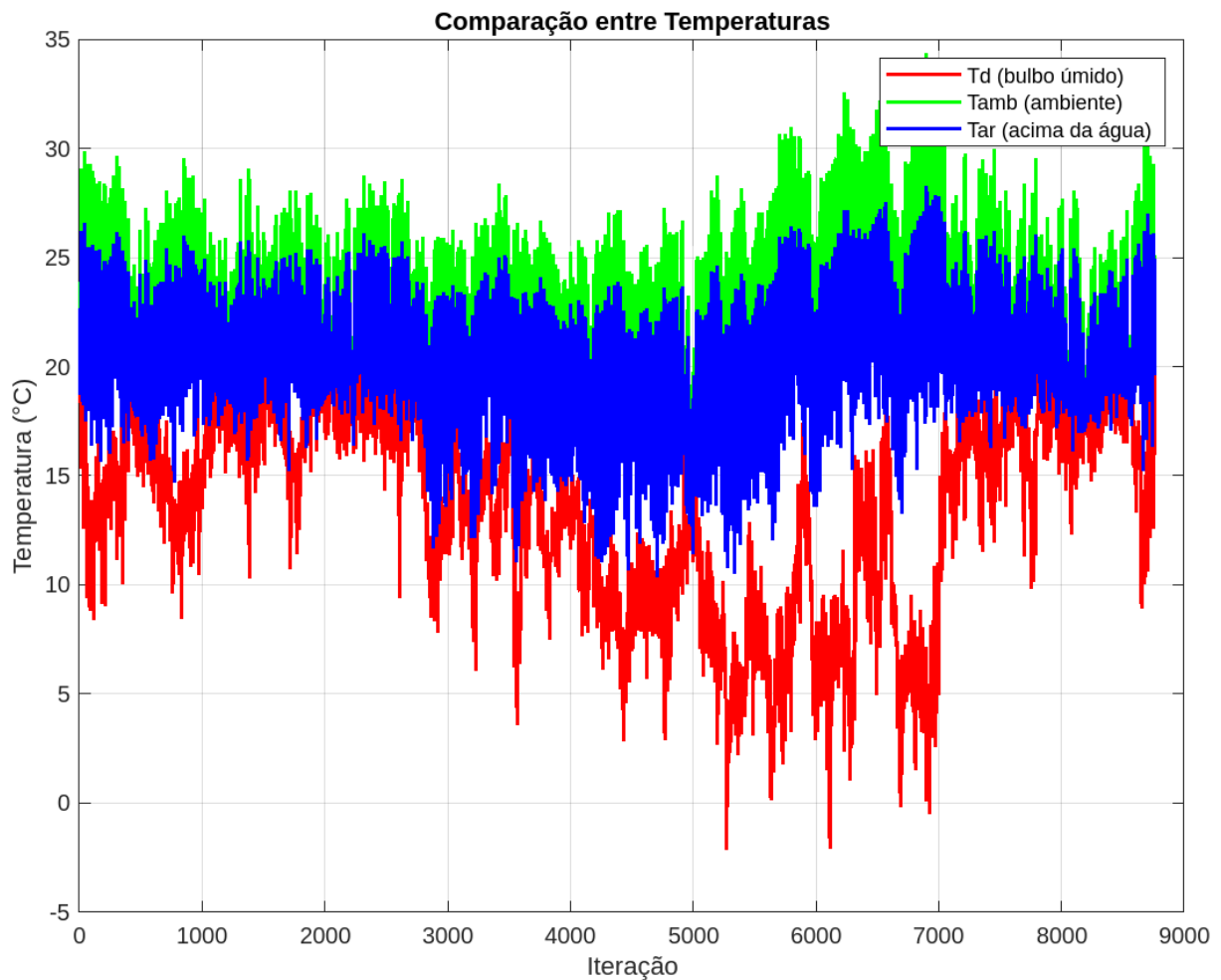


Figura 12 – Relação entre Temperatura Ambiente, Temperatura Acima da Água e Temperatura de Bulbo Úmido em Placas Flutuantes

É perceptível que a temperatura que influencia as placas flutuantes é, em média, inferior à temperatura ambiente. Além disso, o referido gráfico indica que a temperatura de Bulbo Úmido é a mais baixa em termos absolutos, sugerindo que o método proposto para o cálculo da temperatura retorna um valor compreendido entre as duas temperaturas limites, ou seja, a temperatura ambiente e a menor temperatura para esse caso.

## 5.2 Energia Gerada pelos Painéis

Aplicando a metodologia descrita nas seções de Eficiência e Potência (seções 3.1 e 3.2, respectivamente), juntamente com as informações de radiação direta, irradiância difusa e irradiância solar refletida do solo e da água, conforme apresentado no tópico 2.4.2, foi possível calcular a quantidade de energia gerada pelas placas fixas e flutuantes. Esses cálculos resultaram na elaboração do gráfico 13, que representa a quantidade de energia gerada pela placa.

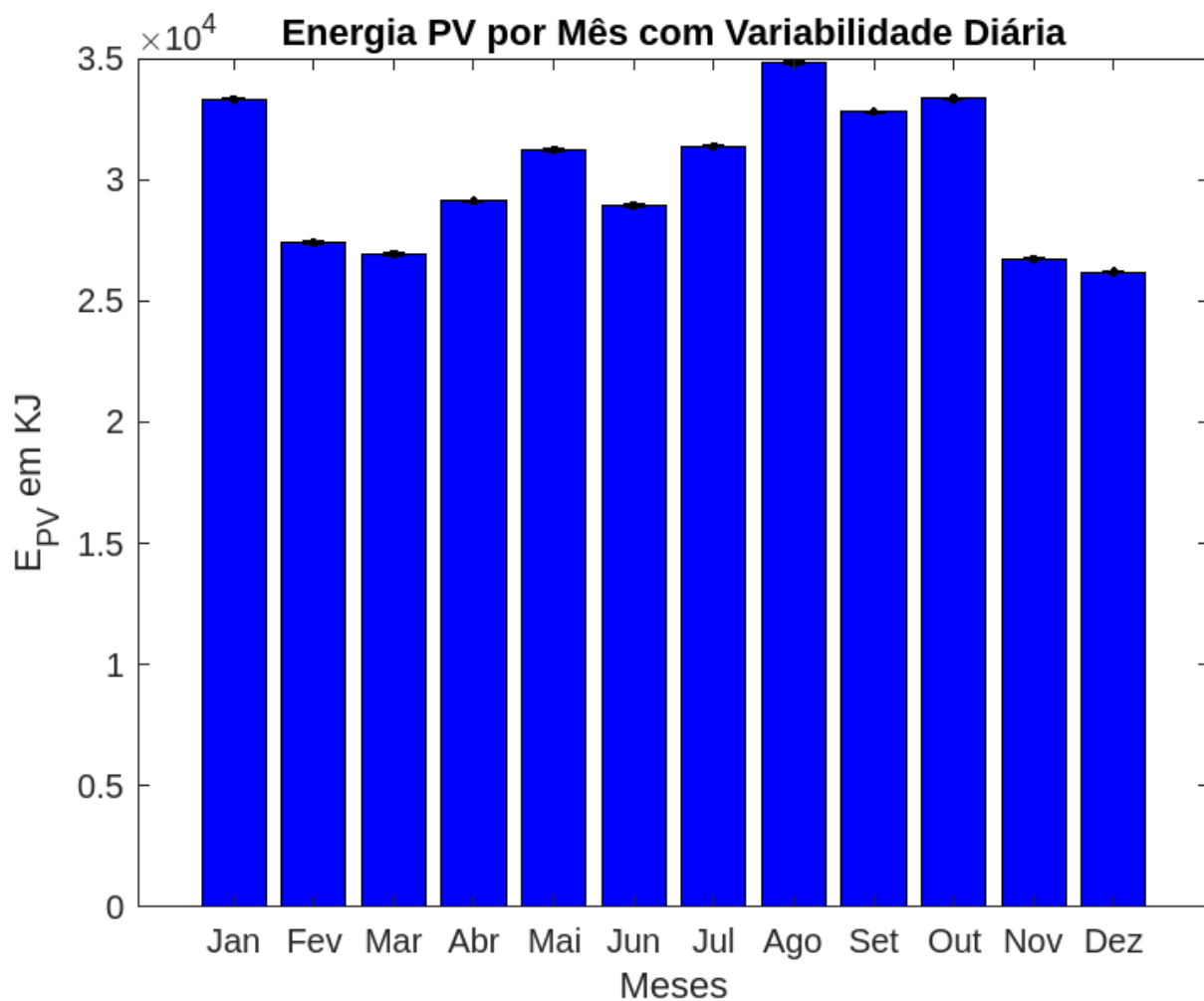


Figura 13 – O gráfico representa a quantidade de energia gerada por um painel fixo no solo ao longo do ano de 2014, de acordo com os diferentes meses.

Outro gráfico é gerado para a placa flutuante; no entanto, a diferença entre os sistemas não é facilmente perceptível ao analisar os gráficos de forma isolada. Para uma análise mais aprofundada, é viável observar o gráfico 14, que retrata a variação na geração de energia entre os dois sistemas.

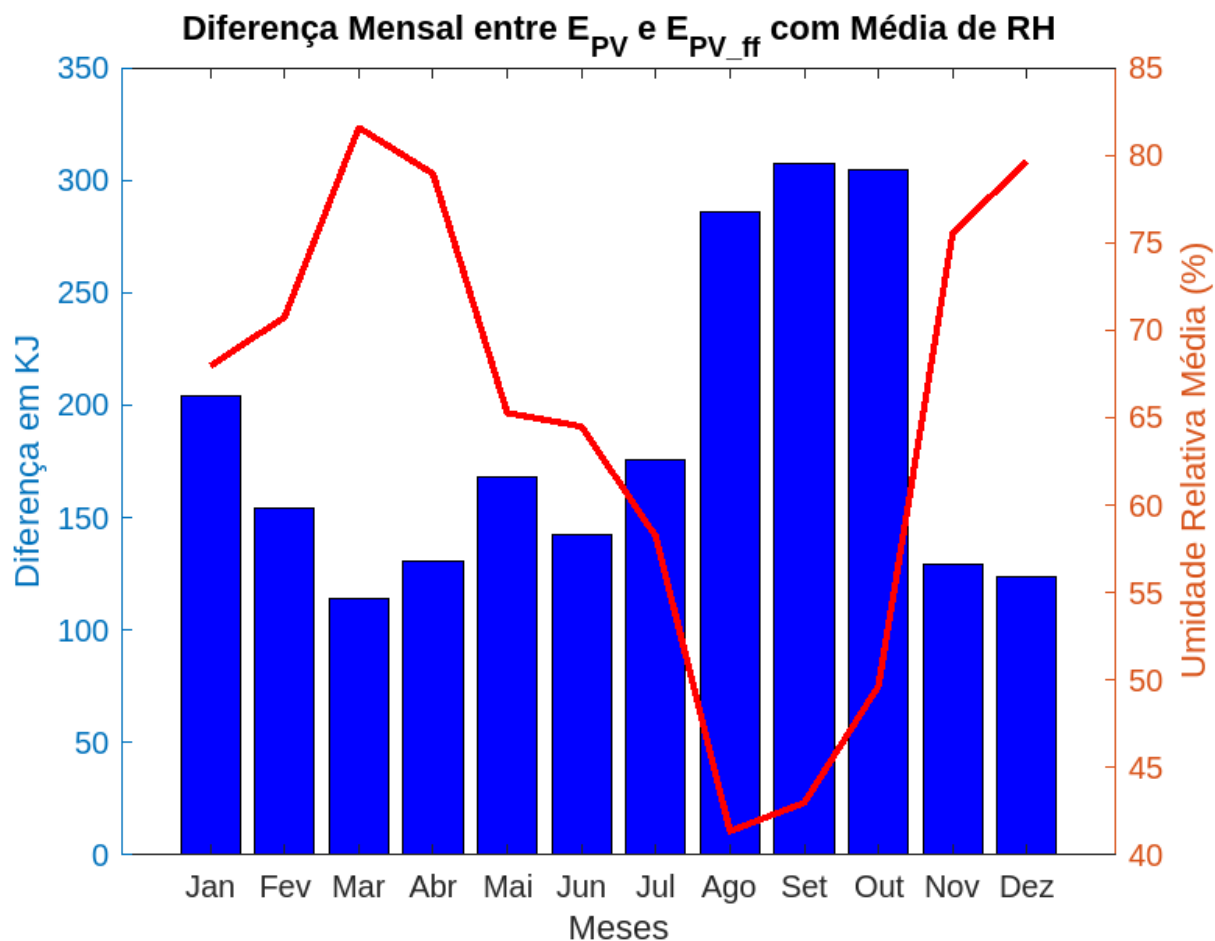


Figura 14 – Gráfico da diferença de energia gerada por um painel flutuante e fixo em solo ao longo do ano de 2014, de acordo com os diferentes meses.

No gráfico apresentado na Figura 14, observa-se que os ganhos de eficiência do painel flutuante sobre o painel fixo no solo são influenciados pela temperatura operacional, que tende a ser mais baixa. Isso é particularmente evidente nos meses de Agosto, Setembro e Outubro, quando os índices de umidade relativa estão entre os mais baixos do ano, conforme ilustra a linha vermelha no gráfico. Durante esse período, a menor umidade favorece a evaporação e, por conseguinte, uma maior perda de calor, resultando em temperaturas operacionais reduzidas para o painel flutuante, como detalhado na seção 3.2.1. Em contrapartida, o mês de Março, com sua umidade relativa média superior a 80%, mostra uma eficiência reduzida em comparação.

Esta relação entre umidade e temperatura é fundamental para compreender as variações na eficiência energética dos sistemas fotovoltaicos. Na ausência de medições diretas de temperatura, a modelagem baseada em dados teóricos torna-se essencial. Conforme descrito, utiliza-se o ponto de orvalho, derivado dos dados do INMET, como o limite inferior e a temperatura virtual, calculada a partir do modelo 3.2.1, como o limite superior para os intervalos de temperatura operacional. Esta abordagem permite a inferência de condições térmicas mais realistas para a avaliação da performance dos painéis, tanto flutuantes quanto terrestres.

No gráfico da figura 15, observa-se a comparação entre as energias geradas pelos painéis flutuantes e terrestres, com a temperatura de ponto de orvalho servindo como a referência para a análise. De forma similar, o gráfico da figura 16 oferece um paralelo entre as energias geradas quando considerada a temperatura virtual, que é modelada. A comparação direta apresentada nesses gráficos é crucial, pois ela revela o impacto das variações de temperatura, estimadas a partir das condições climáticas, sobre a eficiência dos painéis.

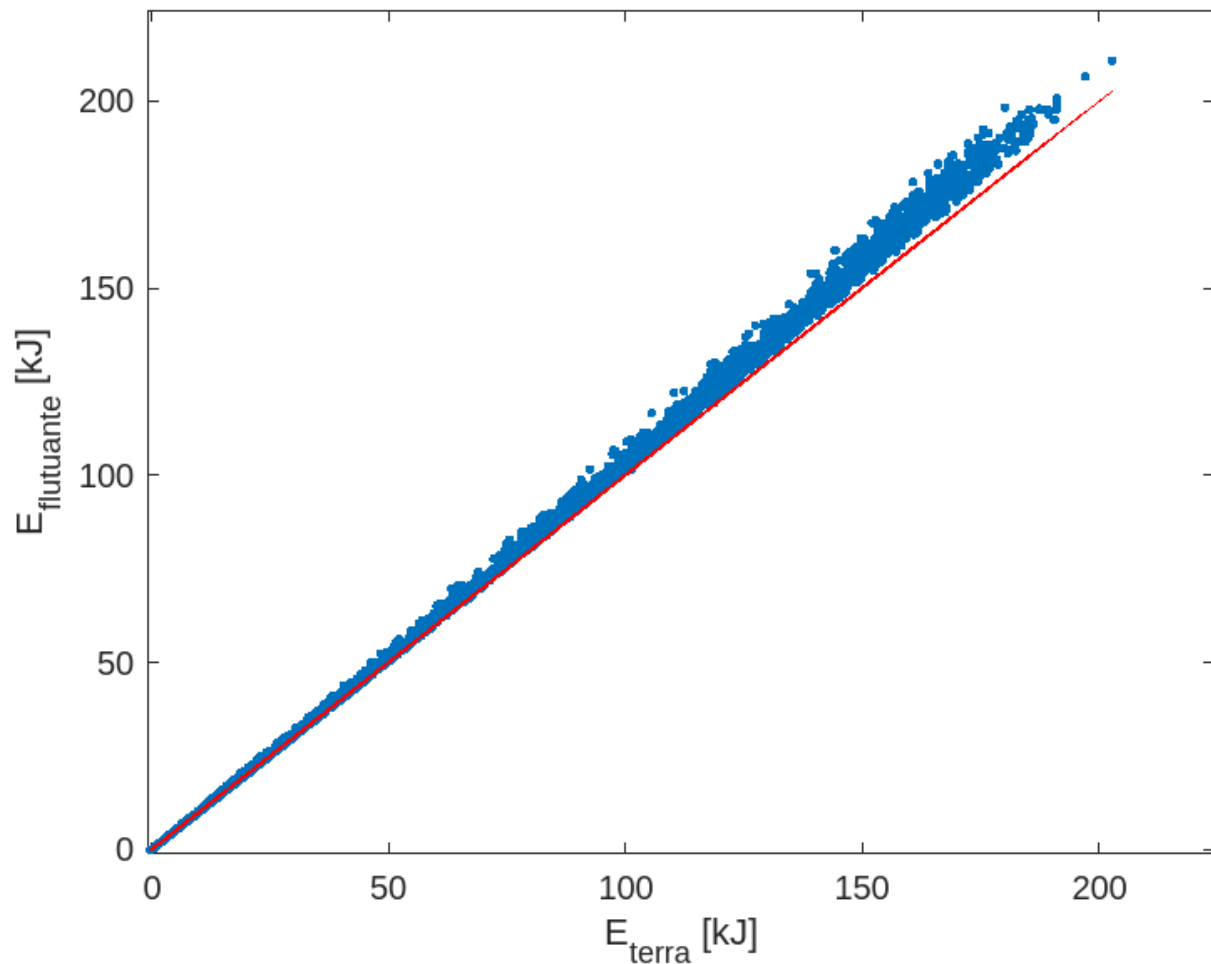


Figura 15 – Comparação da geração anual de energia entre painel fotovoltaico instalado em solo e painel flutuante, sob condições de temperatura de bulbo úmido.

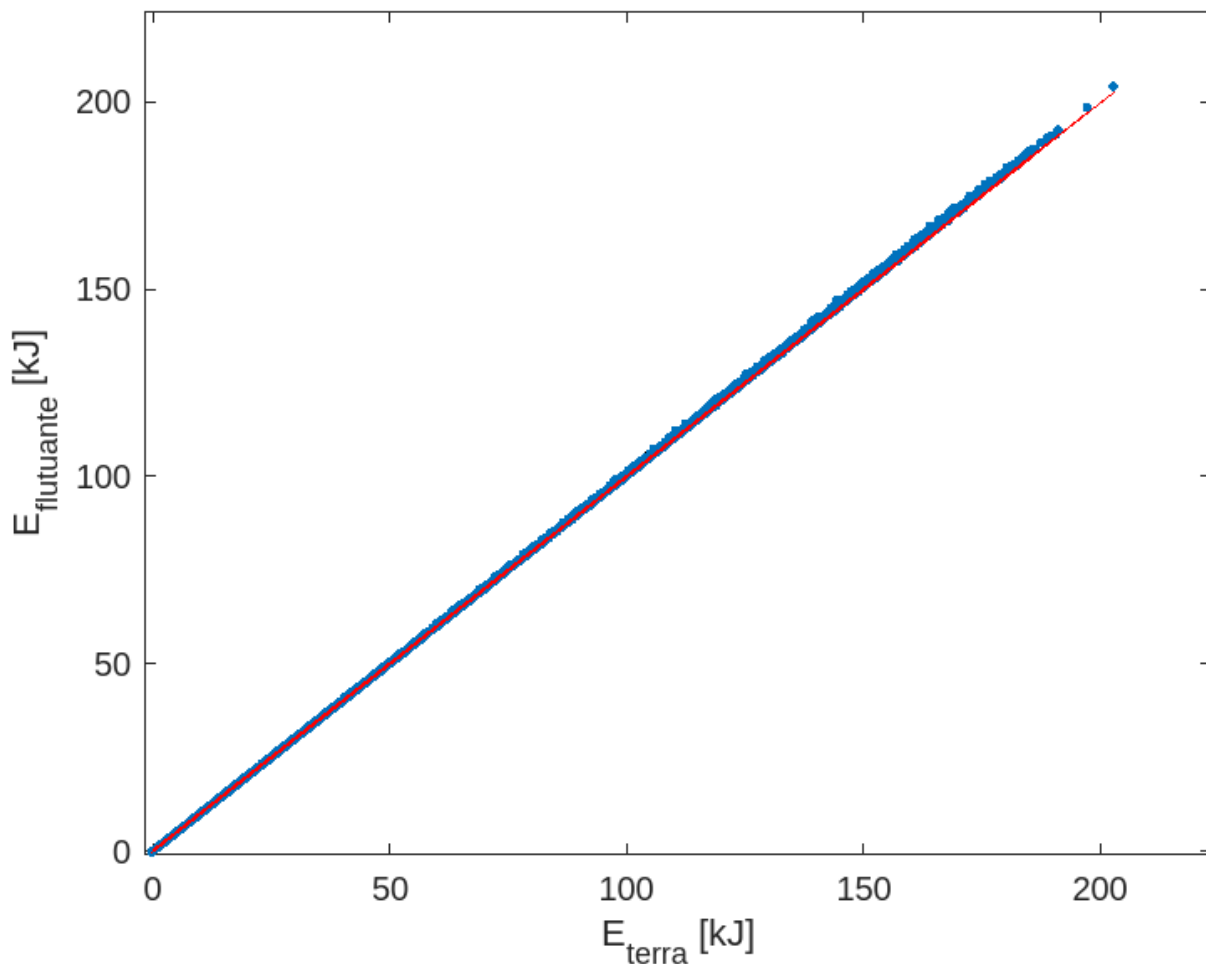


Figura 16 – Comparação da geração anual de energia entre painel fotovoltaico instalado em solo e painel flutuante, sob condições de temperatura virtual.

É de particular interesse a região superior direita dos gráficos, onde se verifica uma intensificação da radiação solar. Neste domínio, a influência da temperatura sobre a eficiência energética torna-se mais evidente. Os dados indicam que, sob alta irradiância, a diferença de eficiência se acentua, sendo mais notável no gráfico da figura 15. Isso ocorre porque a temperatura operacional, que afeta o painel flutuante neste caso, é consideravelmente mais baixa em comparação com o painel terrestre, destacando a sensibilidade dos sistemas fotovoltaicos às variações térmicas em condições de elevada radiação solar.

### 5.3 Eficiência dos Painéis

Conforme elucidado nas discussões anteriores, a temperatura operacional da célula fotovoltaica emerge como um parâmetro crítico na determinação da eficiência de conversão energética. Esta temperatura é modulada por uma multiplicidade de fatores, dentre os quais a temperatura ambiente se destaca, conforme evidenciado no Gráfico 17.



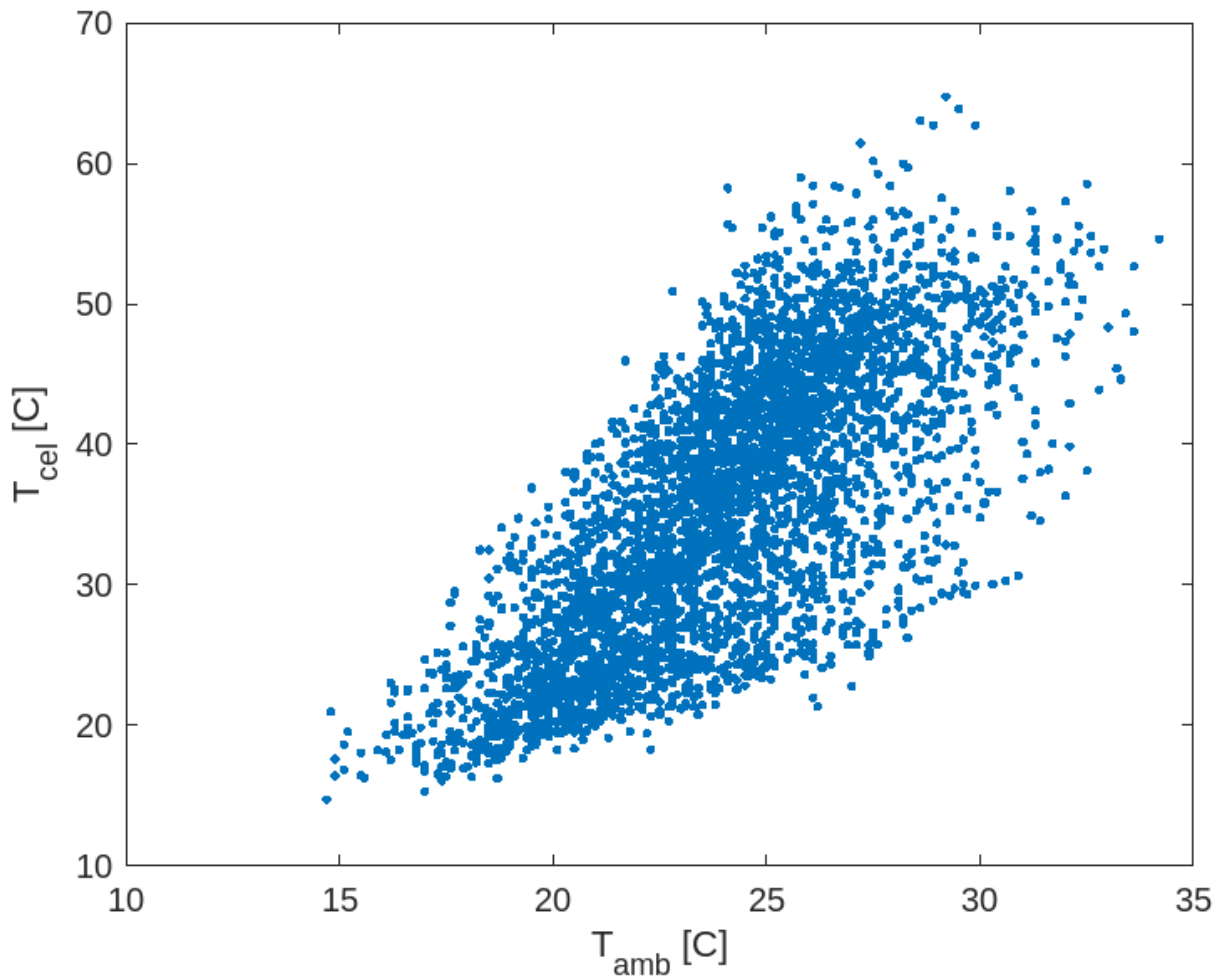


Figura 17 – Correlação entre a temperatura ambiente e a temperatura da célula fotovoltaica.

Os valores ilustrados no gráfico 17 correspondem ao desempenho da célula fotovoltaica fixada ao solo. Paralelamente, a análise da célula fotovoltaica flutuante revelou um padrão de comportamento graficamente análogo. Contudo, uma diferença notável foi observada no que concerne às temperaturas operacionais, sendo que a célula flutuante registrou temperaturas consistentemente inferiores em todos os pontos simulados.

Nas simulações, também foi realizada uma análise da correlação entre a energia incidente total ( $G_t$ ) em joules e a energia gerada ( $E_{PV}$ ) por uma célula fotovoltaica, também medida em joules, conforme ilustrado no gráfico 18. Os dados simulados de  $E_{PV}$  são representados por pontos azuis no gráfico, evidenciando a variação da energia gerada pela célula fotovoltaica em função da energia incidente.

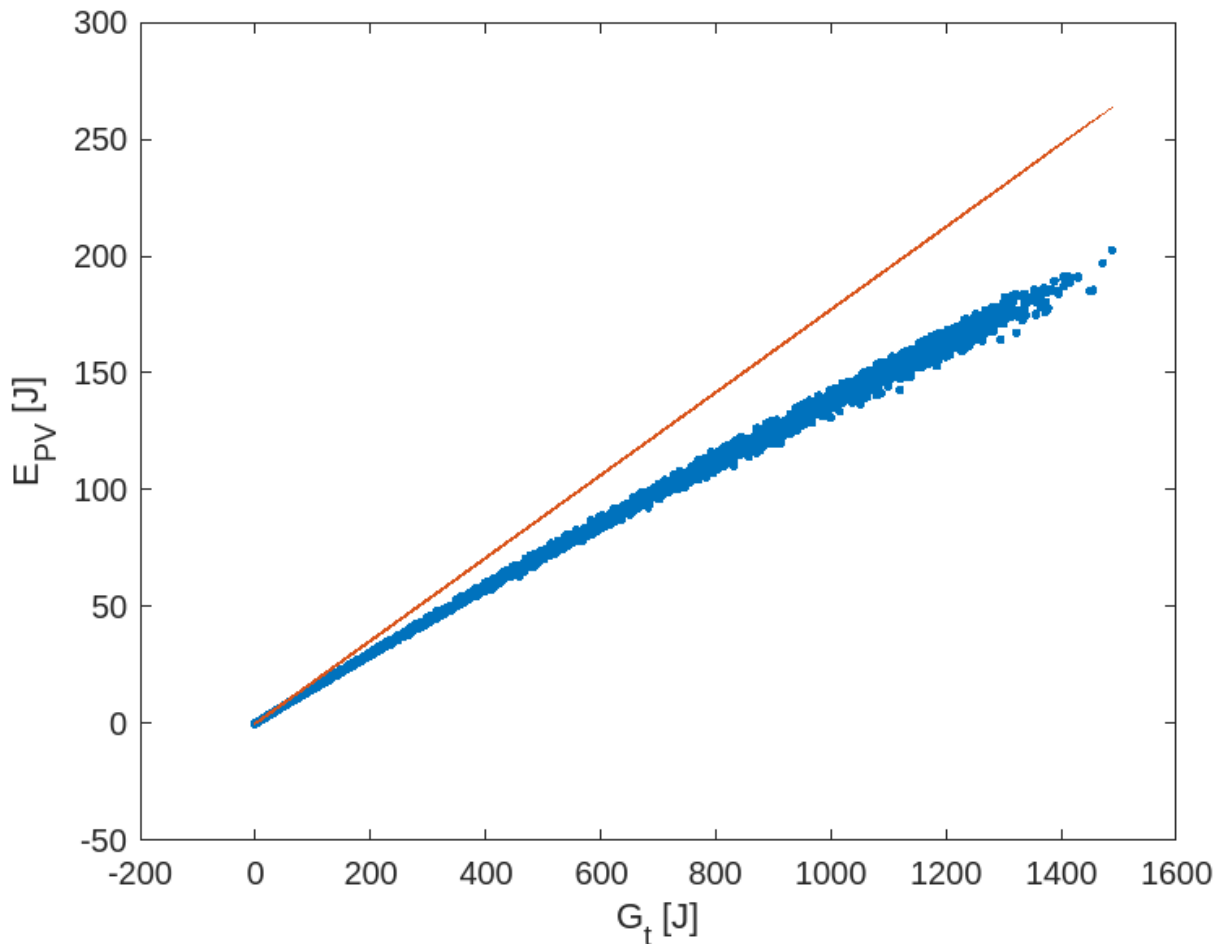


Figura 18 – Relação entre energia incidente ( $G_t$ ) e energia gerada ( $E_{PV}$ ) em células fotovoltaicas. A linha vermelha presente ilustra o comportamento ideal da célula fotovoltaica.

A linha vermelha presente no gráfico 18 ilustra o comportamento ideal da célula fotovoltaica, no qual a energia gerada é diretamente proporcional à energia incidente, ajustada pela eficiência de referência da célula ( $\text{eff}_{\text{cel\_ref}}$ ). A proximidade dos pontos azuis à linha vermelha indica que o comportamento da célula fotovoltaica sob análise está alinhado ao modelo teórico proposto.

A análise da figura 18 revela que, inicialmente, a célula fotovoltaica demonstra uma relação linear entre a energia incidente ( $G_t$ ) e a energia gerada ( $E_{PV}$ ), alinhando-se às expectativas teóricas em condições de irradiância baixa a moderada. Entretanto, para valores elevados de  $G_t$ , observa-se um desvio dos dados experimentais em relação à linha ideal, indicando uma redução na eficiência da célula com o aumento da irradiância. Este fenômeno pode ser atribuído a efeitos térmicos, que tendem a diminuir a resistência interna e diminuir a tensão de circuito aberto da célula fotovoltaica, além de outras possíveis não linearidades no comportamento da célula sob alta irradiância. Notavelmente, verifica-se que a perda de eficiência em condições de alta irradiância é atenuada no caso de painéis flutuantes, devido às menores temperaturas operacionais que estes painéis conseguem manter.

No gráfico apresentado na figura 19, pode-se observar a relação entre a eficiência do painel solar e a energia recebida por ele. Tanto para a instalação fixa no solo quanto para a instalação flutuante, verificou-se uma representação bastante similar ao analisar este mesmo gráfico, ou seja, a diferença entre elas é bastante discreta.

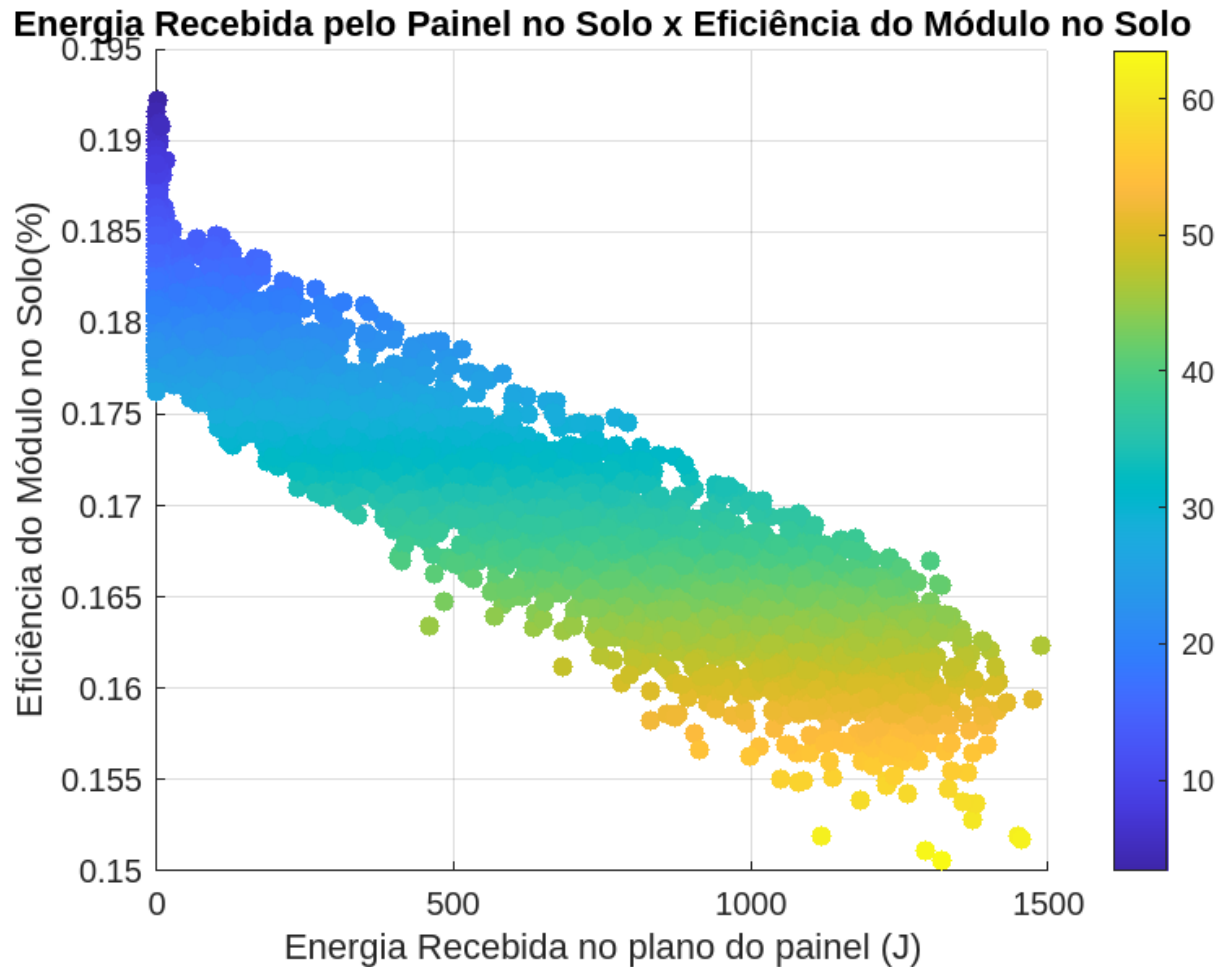


Figura 19 – Gráfico representa a relação existente entre a energia recebida pelo painel fixo instalado no solo e sua eficiência de conversão. Indicadores de cor representam a temperatura da célula.

Na imagem apresentada, pode-se observar a relação entre a temperatura da célula e o desempenho do mesmo. Constatou-se uma diminuição na eficiência conforme a temperatura aumenta, conforme discutido anteriormente na seção 3.1.

## 6 Conclusão

Este projeto teve como foco principal investigar as diferenças de eficiência entre dois tipos de painéis solares: um instalado de maneira fixa no solo e outro configurado como uma estrutura flutuante em um corpo d'água. Ambos os sistemas foram analisados considerando as condições ambientais de Brasília, DF.

Inicialmente, realizou-se um estudo teórico abrangente sobre painéis solares, que incluiu desde o desenvolvimento de modelos de irradiação solar incidente em painéis inclinados até a concepção de balanços energéticos detalhados para cada componente do painel. Além disso, foi desenvolvido um modelo para estimar a redução de temperatura em painéis flutuantes, considerando o microclima específico na superfície do corpo d'água.

Baseando-se nesta fundamentação teórica, um código foi implementado em Matlab para analisar as influências dessas variáveis em ambos os tipos de painéis, levando em consideração seus parâmetros distintos.

Os resultados indicaram uma discrepância na eficiência média anual entre os dois tipos de painéis, com o painel flutuante apresentando um aumento de 0,62% na produção de energia anual para a temperatura virtual e 4,2% na produção de energia anual para a temperatura de bulbo úmido durante o período analisado.

É relevante destacar que, conforme especificações técnicas fornecidas pelo fabricante do painel solar, a potência máxima do módulo é de 350W, com uma eficiência máxima de 17,71%. Os valores obtidos através das simulações em Matlab mostraram-se consistentes com estas especificações.

Observou-se também que os maiores incrementos de eficiência ocorreram em meses com baixa umidade relativa. Essa condição ambiental favorece a perda de calor por evaporação, contribuindo para uma eficiência energética superior nos painéis flutuantes durante esses períodos.

Para estudos futuros, seria relevante avaliar se o acréscimo de eficiência proporcionado pelos painéis flutuantes justifica o dispêndio inicial e os custos de manutenção diferenciados em comparação com as instalações tradicionais. Uma análise detalhada do custo-benefício, considerando os benefícios energéticos em relação aos gastos adicionais relacionados à manutenção e à infraestrutura desses sistemas, poderia fornecer insights significantes para a viabilidade econômica dessas instalações solares flutuantes.

Ademais, uma área promissora para pesquisa subsequente reside na ampliação do estudo para diversas condições climáticas e geográficas. A eficiência dos painéis solares flutuantes pode apresentar variações consideráveis conforme fatores ambientais, tais como temperatura, umidade, radiação solar e características do corpo d'água. Investigar essas variações em diferentes regiões, desde climas temperados até tropicais, é capaz de proporcionar informações valiosas acerca da aplicabilidade e otimização dos sistemas de painéis flutuantes. Essa análise geográfica abrangente é útil para determinar locais propícios à instalação de painéis flutuantes, maximizando, assim, a eficiência energética e viabilidade econômica dessas instalações.

# Referências

- ALPHASOLAR. *Placa Solar: Conheça os Preços e Modelos das Placas Solares*. 2023. Disponível em: <<https://alphasolar.com.br/placa-solar-conheca-os-precos-e-modelos-das-placas-solares/>>. Citado 2 vezes nas páginas iii e 7.
- ALY, S. P. *Numerical models development for simulating optical, thermal and electrical performance, as well as structural degradation of PV modules*. 2019. Citado 2 vezes nas páginas iii e 18.
- AMELIA, A. et al. Technologies of solar tracking systems: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 767, p. 012052, 03 2020. Citado 2 vezes nas páginas iii e 13.
- BUERHOP-LUTZ, C. et al. Pv modules and their backsheets - a case study of a multi-mw pv power station. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 231, p. 111295, October 2021. Citado na página 7.
- BÜHLER, A. J. *Estudo de técnicas de determinação experimental e pós-processamento de curvas características de módulos fotovoltaicos*. 2023. <<https://www.ufrgs.br>>. Citado 3 vezes nas páginas iii, 20 e 21.
- CHAPIN, D. M.; FULLER, C. S.; PEARSON, G. L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of Applied Physics*, v. 25, n. 5, p. 676–677, May 1954. Citado na página 3.
- CORKISH, R. et al. *Applied Photovoltaics*. 1st. ed. [S.l.]: Routledge, 2006. Citado na página 5.
- COSTA, I. F. D.; MAROJA, A. D. M. Astronomia diurna: medida da abertura angular do sol e da latitude local. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 40, June 2017. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- DU, Y.; WANG, L.; TAO, W. Modeling, imaging and resistance analysis for crystalline silicon photovoltaic modules failure on thermal cycle test. *Engineering Failure Analysis*, v. 118, p. 104818, December 2020. Citado na página 7.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4. ed. John Wiley & Sons, Inc., 2013. ISBN 9780470873663. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/9781118671603>>. Citado 9 vezes nas páginas 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 17 e 19.
- EPE. *BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL*. 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 3.

- EVANS, D. L. Simplified method for predicting photovoltaic array output. *Solar Energy*, v. 27, p. 555–560, 1981. Citado na página 33.
- GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (version 45). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 23, n. 1, p. 1–9, December 2014. Citado na página 5.
- GREENIOT. *Solar Panel Output*. 2023. Disponível em: <<https://www.greeniot.com.au/how-much-output-solar-panels>>. Citado 2 vezes nas páginas iii e 6.
- GUPTA, N.; MATHEW, A.; KHANDELWAL, S. Analysis of cooling effect of water bodies on land surface temperature in nearby region: A case study of ahmedabad and chandigarh cities in india. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, v. 22, n. 1, p. 81–93, apr 2019. Citado na página 34.
- HERNÁNDEZ-MORO, J.; MARTÍNEZ-DUART, J. M. Empirical assessment on factors promoting the use of solar photovoltaic energy. *Energy & Environmental Science*, v. 6, n. 7, p. 2076–2086, 2013. Citado na página 1.
- HILL, R. D.; BRAUN, M. J. Geolocation by light level. *Reviews: Methods and Technologies in Fish Biology and Fisheries*, p. 315–330, 2001. Citado na página 8.
- LIMA, A. M. C. *Balanço de Energia em Painel Fotovoltaico – Um Estudo Experimental*. Dissertação de Mestrado — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília – DF, 2019. Citado 3 vezes nas páginas iii, 24 e 29.
- LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The long term average performance flat plate solar energy collectors. *Solar Energy*, v. 7, p. 53–74, 1963. Citado na página 18.
- MA, T.; YANG, H.; LU, L. Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 36, p. 304–315, August 2014. Citado na página 12.
- PARIDA, B.; INYAN, S.; GOIC, R. A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 3, p. 1625–1636, April 2011. Citado na página 3.
- PEREIRA, E. et al. *Atlas brasileiro de energia solar*. s.l.: Universidade Federal de São Paulo, 2017. Citado na página 1.
- RANJBARAN, P. et al. A review of studies and research on power generation using floating photovoltaic systems in the world. *Journal of Renewable and New Energy*, v. 6, n. 1, p. 131–141, March 2019. Citado na página 3.
- SAHU, A.; YADAV, N.; SUDHAKAR, K. Floating photovoltaic power plant: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 66, p. 815–824, December 2016. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 3.
- SAIFULLAH, M.; GWAK, J.; YUN, J. H. Comprehensive review on material requirements, present status, and future prospects for building-integrated semitransparent photovoltaics (bistpv). *Journal of Materials Chemistry A*, v. 4, n. 22, p. 8512–8540, 2016. Citado na página 7.
- SANTOS, C. F. d. *Projeto e implementação de um sistema seguidor solar de 2 eixos para painel fotovoltaico*. Trabalho de Conclusão de Curso, Curitiba, 2015. Citado na página 14.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, v. 83, n. 5, p. 614–624, May 2009. Citado na página 3.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, v. 83, n. 5, p. 614–624, may 2009. Citado na página 33.

STULL, R. B. (Ed.). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1988. Citado na página 34.

TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. et al. Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. *Solar Energy*, v. 72, n. 3, p. 217–234, March 2002. Citado na página 13.

WENHAM, S. R. *Applied Photovoltaics*. [s.l.]: Earthscan, 2007. Citado na página 3.

ZONDAG, H. A. et al. The yield of different combined pv-thermal collector designs. *Solar Energy*, v. 74, p. 253–269, 2003. Citado na página 33.



# Apêndices

# A Código MATLAB: Modelo para estimar a geração e eficiência em painéis solares fixos e flutuantes com base em sua localização geográfica.

```
1 % Modelo Geração Painel Fotovoltaico
2 %
3 % Esse Modelo estima geração de painel solar fotovoltaico a partir de
4 % sua
5 % localização geografica e posição de instalação, e de dados de
6 % Irradi ncia
7 % Solar Global horizontal, temperatura e umidade do ar e velocidade do
8 % vento.
9 %
10 % Calcula temperaturas dos componentes do Painel (vidro, célula,
11 % backsheet)
12 % por balanço de energia considerando a geração como função de
13 % temperatura
14 % da célula estimado por par metros especificados pelo fabricante.
15 % O balanço de energia é baseado na formulação apresentada na dissertaçã
16 % o
17 % de mestrado de Ariane Martins Caponi Lima:
18 % "BALANÇO DE ENERGIA EM PAINEL FOTOVOLTAICO UM ESTUDO EXPERIMENTAL".
19 %
20 % O termo convectivo foi ajustado para de acordo com o exposto na
21 % disserta-
22 % ção da Ariane.
23 %
24 %
25 %
26 %
27 %
28 %
29 %
30 %
31 %
32 %
33 %
34 %
35 %
36 %
37 %
38 %
39 %
40 %
41 %
42 %
43 %
44 %
45 %
46 %
47 %
48 %
49 %
50 %
51 %
52 %
53 %
54 %
55 %
56 %
57 %
58 %
59 %
60 %
61 %
62 %
63 %
64 %
65 %
66 %
67 %
68 %
69 %
70 %
71 %
72 %
73 %
74 %
75 %
76 %
77 %
78 %
79 %
80 %
81 %
82 %
83 %
84 %
85 %
86 %
87 %
88 %
89 %
90 %
91 %
92 %
93 %
94 %
95 %
96 %
97 %
98 %
99 %
100 %
clear
% Constantes
g=9.8069; % [m/s2] Aceleração da gravidade
pi=3.14159;
sb=5.67e-8; % [W/m2.K4] Constante de Stefan-Boltamann
```

```

23 GS=1366; % [kW/m2] Constante Solar
24 % Propriedades do ar (par metros)
25 % Propriedades do Ar (Tref=285.15K; 12C) vide arquivo: Ar_propriedades
    com temperatura.xlsx
26 Tref=285.15;
27 %ceterm=0.000979; % [1/K] Coeficiente de expansão térmica do ar (
    assumida como constante)
28 cc_ajj_max=3.905; % [] Constante da Equação de Nusselt ajustada para
    Painei PV (vide dissertação Ariane e Balanço_de_Energia_PV_v81.m)
29 pp_max=0.5; % [] Potencia da Equação de Nusselt ajustada para Painei PV
    (vide dissertação Ariane e Balanço_de_Energia_PV_v81.m)
30
31 flag_Nu_aj=0;
32 if flag_Nu_aj==1
33     'Usando Número de Nusselt para convecção forçada ajustado, baseado
    na dissertação Ariane '
34 else
35     'Usando Número de Nusselt para convecção forçada padrão '
36 end
37
38 % Localização Geográfica Brasília
39 lat=-15.8; % [grau] Latitude
40 long=-47.9; % [grau] Longitude
41 time_lag=-3; % [horas] Fuso horário
42 lat_rad=lat*pi/180; % latitude em radianos
43 long_rad=long*pi/180; % longitude em radianos
44
45 Dados_solarimetricos; % Rotina de leitura de dados meteorológicos e gera
    ção de dados solarimetricos (extraído da rotina do Jose Cesar)
46 Tamb=Tamb+273.15; % [K] Convertendo Tamb (lidos acima) para [K]
47 Press=Press*1e2; % [Pa] Convertendo de [mB] para [Pa], como usado em
    propriedades_ar_umido.m
48 doy=n; % n é definido na rotina Dados_solarimétricos
49 doy_c=[0:1/24:365-1/24]'; % [dia] doy contínuo
50 hora=repmat([0:1:23]',365,1); % [hora] horas durante o ano
51 [Td,e_sky]=Td_eps_sky_Berdahl_Martin(Tamb-273.15,RH,doy,hora); % Td [C]
    é temperatura de Orvalho e e_sky é a emissividade do céu
52 Td=Td+273.15; % [K] convertendo para Kelvin
53 %CF_h=zeros(size(Tamb))+min(1,(max(0.3,1.4286*Id./(glob+1e-5))-0.3)
    .^0.5); % Cloudiness factor, see On the Sky Temp-review , Evangelist
    et al, En and Buildings (2019)
54 flagRH50=sign(sign(RH-50)+1); % 0 se RH<50, 1 se RH>=50
55 %CF_h=flagRH50.*min(1,(max(0.3,1.4286*Id./(glob+1e-5))-0.3).^0.5); %
    Cloudiness factor, see On the Sky Temp-review , Evangelist et al, En
    and Buildings (2019), condicionando presença de nuvens quando RH>50
56 CF_h=flagRH50.*(1-Ib./(Ib_cc+1e-5)); % Assumindo uma relação linear
    entre CF e a razão Ib modelado por kt e Ib por modelo de céu claro
57 CF=CF_h;
58 % CF noturno (assumindo média de CF da tarde do dia anterior e manhã do

```

```

    dia posterior)
59 for i=1:365-1
60     CF_avg=mean(CF(doy_c>i-0.5&doy_c<i+0.5&zenite>0.5));
61     CF(doy_c>=i-0.5&doy_c<i+0.5&zenite<=0.5)=CF_avg;
62 end
63
64 % CF=[];
65 % for i=1:365
66 %     CF_avg=(max(0.3,1.4286*mean(Id(hora>=10&hora<=14&doy==i))./mean(
        glob(hora>=10&hora<=14&doy==i)))-0.3).^0.5; % Cloudiness factor, see
        On the Sky Temp-review , Evangelist et al, En and Buildings (2019)
67 %     CF_d=[CF;CF_avg*ones(24,1)];
68 % end
69
70
71 T_sky=Tamb.*(e_sky+0.8*(1-e_sky).*CF).^0.25; % [K] same as TRNSYS, see
        On the Sky Temp-review , Evangelist et al, En and Buildings (2019)
72 dt=60*60; % [s] período de cada passo no tempo (compatível com os dados
        meteorológicos)
73
74 % Especificações Paineis FV
75 T_ref_PV=25+273.15; % [K] Temperatura da célula na Standard Test
        Condition (STC) (vide PG Jaqueline)
76 eff_cel_ref=0.1771; % [] Eficiência de conversão do Paineis PV (vide PG
        Jaqueline)
77 gamma_T=0.0039; % [1/C] coeficiente de redução de eficiência
78 NOCT = 45;
79
80 Beta=abs(lat); % [graus] Inclinação do Paineis fixo. Se for rastreado,
        beta deve ser igual zenite solar
81 Beta_rad=Beta*pi/180; % [rad]
82 gamma=0; % [graus] ngulo de azimute do Paineis fixo (virado para o
        norte). Se for rastreado, beta deve ser igual azimute solar
83 gamma_rad=gamma*pi/180; % [rad]
84
85 % Propriedades físicas dos materiais
86 % Vidro
87 %alpha_vd=0.02; % Hammami et al (=0.02) (KoppGlass=0,04)
88 rho_vd=0.1; % Hammami et al , Calculado em função de angulo de
        incidencia por KL (Duffie and Beckman 1a Ed, pag 175)
89 tal_vd=0.88; % Hammami et al (=0,88) (KoppGlass=0,75 , media pelo
        espectro, media visual)
90 alpha_vd=1-tal_vd-rho_vd;
91 % KK_vd=32; % [1/m] fator de extinção (Duffie and Beckman 1a Ed, pag
        175)
92 % irefr_vd=1.526; % índice de refração vidro
93 % irefr_ar=1.000; % índice de refração do ar
94 e_vd=0.91; % Hammami et al (e_vd=0.91)
95 cp_vd=500; % [J/kgK] Calor específico (Jones et al.=500 ; KoppGlass=750)

```

```

96 den_vd=3000; % [kg/m3] (Jones et al.=3000 ; KoppGlass=2230~2860)
97 %k_vd=1.8; % [W/mK] condutividade térmica (Hammami et al.=1.8 ;
    KoppGlass=1)
98 k_vd=0.8; % [W/mK] condutividade térmica (https://www.fisica.net/
    constantes/condutividade-termica-\(k\).php)
99 rho_cp_vd=den_vd*cp_vd; % [J/m3K] produto densidade por calor específico
    vidro
100
101 % Célula PV
102 alpha_cel=0.95; % Hammami et al (=1),
103 rho_cel=0.05; % Parreta et al
104 e_cel=0.9; % emissividade
105 den_cel=2330; % [kg/m3] densidade PV (Jones et al)
106 cp_cel=677; % [J/kgK] calor específico Backsheet (Jones et al)
107 k_cel=150; % [W/mK] Condutividade Térmica (Hammami et al)
108 rho_cp_cel=den_cel*cp_cel; % [J/m3K] produto densidade por calor especí
    fico célula fotovoltaica
109
110 % Backsheet Polyester / Tedlar Trilaminata
111 alpha_bs=1; % Hammami et al
112 rho_bs=0; % Hammami et al
113 e_bs=0.87; % Hammami et al
114 cp_bs=1250; % [J/kgK] calor específico Backsheet (Jones et al)
115 den_bs=1200; % [kg/m3] densidade Backsheet (Jones et al)
116 k_bs=0.3; % [W/mK] Condutividade Térmica (Hammami et al)
117 d_bs=0.0003; % [m] espessura do Backsheet (Hammami et al)
118 rho_cp_bs=den_bs*cp_bs; % [J/m2K] produto densidade por calor específico
    backsheet
119
120 % EVA Ethylene Vinyl Acetate
121 k_eva=0.35; % [W/mK] Condutividade Térmica EVA (Hammami et al)
122 d_eva=0.0004; % [m] espessura do EVA (Hammami et al)
123 r_eva=d_eva/k_eva; % [Km2/W] resistência térmica EVA
124
125 % Concreto
126 alpha_sup=0.6;
127 rho_sup=0.1;
128 e_sup=0.85;
129 %p_dTsup=[0.0105 22.7454]; % coeficientes para diferença de temperatura
    da superfície (solo) e do ar (assumindo variação linear com radiação
    global). Valores obtidos analisando dados da dissertação Arine
130 p_dTsup=[34/1000 0]; % coeficientes para diferença de temperatura da
    superfície (solo) e do ar (assumindo variação linear com radiação
    global). Valores obtidos analisando dados da dissertação Arine
131 p_dTsup_sombra=[34/1000 0]; % coeficientes para diferença de temperatura
    da superfície (solo) e do ar (assumindo variação linear com radiação
    global). Valores obtidos analisando dados da dissertação Arine
132
133 T_sup = Tamb + max([zeros(size(glob)) polyval(p_dTsup, glob)], [], 2); % [K

```

```

] temperatura do superfície função da radiação global. Assumindo mí
nimo temperatura do ar
134 T_sup_sombra=(Tamb+T_sup)/2; % [K] temperatura do superfície sombreada.
Assumida com a média da temperatura do ar e da superfície sob sol.
135
136 % Atencao as caracteristicas geometricas
137 % Caracteristicas Geométricas do Painel
138 % Vidro
139 L_vd=0.64; % [m] Descontado a modura alumínio (medido)
140 H_vd=0.61; % [m] Descontado a modura alumínio (medido)
141 A_vd=L_vd*H_vd; % [m2] área do vidro
142 %d_vd=0.0032; % [m] espessura do Vidro
143 d_vd=0.004; % [m] espessura do Vidro
144 Vol_vd=A_vd*d_vd; % [m3] Volume do Vidro
145 m_vd=den_vd*Vol_vd; % [kg] massa do Vidro
146 L_char=A_vd/(4*L_vd); % [m] dimensão característica para números
adimensionais
147 r_vd=d_vd/2/k_vd; % [Km2/W] resistência térmica do vidro (metade para a
celula e metade para o ar)
148
149 % Painel Células PV
150 L_cel=0.62; % [m] Coberto pelas células (medido)
151 H_cel=0.58; % [m] Coberto pelas células (medido)
152 A_cel=L_cel*H_cel; % [m2] área de Células
153 d_cel=0.00025; % [m] espessura da Célula
154 Vol_cel=A_cel*d_cel; % [m3] Volume do Células
155 m_cel=den_cel*Vol_cel; % [kg] massa do Células
156
157 % Painel Backsheet
158 L_bs=0.64; % [m] Descontado a modura alumínio (medido)
159 H_bs=0.61; % [m] Descontado a modura alumínio (medido)
160 A_bs=L_bs*H_bs; % [m2] área do Backsheet
161 d_bs=0.0003; % [m] espessura do Backsheet (Hammami et al)
162 Vol_bs=A_bs*d_bs; % [m3] Volume do Backsheet
163 m_bs=den_bs*Vol_bs; % [kg] massa do Backsheet
164 r_bs=d_bs/2/k_bs; % [Km2/W] resistência térmica do vidro (metade para a
celula e metade para o ar)
165
166 A_p=L_cel*H_cel; % [m2] Área do Painel, considerada como a área das cé
lulas pois é o que importa para a geração
167 h_painel=0.5; % [m] Altura do painel em relação ao solo (centro do
painel, confirmar)
168
169 %Gsky=LW_Brutsaert_simple(Tamb-273.15,RH/100);% [W/m2] Radiação Térmica
da Atmosfera (Estimada considerando céu claro - modelo Brutsaert)
170 F_sky_vd=(1+cos(Beta_rad))/2; % fator de forma (configuration factor or
view factor) do céu para o vidro
171 F_surf=1-F_sky_vd; % fator de forma (configuration factor or view factor
) da superfície para o vidro

```

```

172 F_sky_bs=F_surf; % fator de forma (configuration factor or view factor)
      do céu para o backsheet (invertido do que para o vidro)
173 F_surf_bs=1-F_sky_bs; % fator de forma (configuration factor or view
      factor) do céu para o backsheet (invertido do que para o vidro)
174 %senbeta=abs(sin(Beta_rad-pi/2)); % valores para Nusselt
175 %cosbeta=cos(Beta_rad-pi/2); % valores para Nusselt
176
177 % Zenite e Azimute
178 [zen,azi]=zenite_azimute(doy,hora,lat_rad,long_rad,time_lag);
179 flagzen=(sign(90*pi/180-zen)+abs(sign(90*pi/180-zen)))/2; % =1 se zen<90
      o (dia) ; =0 se zen>=90o (noite)
180 % Angulo de Incidencia de DNI
181 theta=angle_sun_tilted_surface(doy,hora,lat_rad,long_rad,time_lag,
      Beta_rad,gamma_rad); % para painel rastreado, theta=0
182
183 % Area Sombreada pelo Painel
184 % calculada pela posição dos vértices e centro (p1-SO ; p2-NO ; p3-NE ;
      p4-SO)
185 % A origem das coordenadas é p1
186 dd=L_vd/2*sin(Beta_rad); % [m] elevação (ou rebaixamento) dos pontos em
      relação ao centro do painel
187 zp1=h_painel+dd; % [m] altura em relação ao solo do ponto p1
188 zp2=h_painel-dd; % [m] altura em relação ao solo do ponto p2
189 zp3=zp2; % [m] altura em relação ao solo do ponto p3
190 zp4=zp1; % [m] altura em relação ao solo do ponto p4
191 zpc=h_painel;
192 xp1=0;
193 xp2=0;
194 xp3=L_vd;
195 xp4=xp3;
196 xpc=L_vd/2;
197 yp1=0;
198 yp2=yp1+L_vd*cos(Beta_rad);
199 yp3=yp2;
200 yp4=yp1;
201 ypc=L_vd/2*cos(Beta_rad);
202 %Posição da sombra dos pontos (4 vértices e centro)
203 xs_p1=xp1-zp1*tan(zen).*sin(azi);
204 xs_p2=xp2-zp2*tan(zen).*sin(azi);
205 xs_p3=xp3-zp3*tan(zen).*sin(azi);
206 xs_p4=xp4-zp4*tan(zen).*sin(azi);
207 xs_pc=xpc-zpc*tan(zen).*sin(azi);
208 ys_p1=yp1-zp1*tan(zen).*cos(azi);
209 ys_p2=yp2-zp2*tan(zen).*cos(azi);
210 ys_p3=yp3-zp3*tan(zen).*cos(azi);
211 ys_p4=yp4-zp4*tan(zen).*cos(azi);
212 ys_pc=ypc-zpc*tan(zen).*cos(azi);
213
214 % Área Sombra

```

```

215 A_sombra=A_vd*ones(size(doy));
216 for i=1:length(xs_p1)
217     x_sombra=[xs_p1(i);xs_p2(i);xs_p3(i);xs_p4(i);xs_p1(i)];
218     y_sombra=[ys_p1(i);ys_p2(i);ys_p3(i);ys_p4(i);ys_p1(i)];
219     A_sombra(i)=polyarea(x_sombra,y_sombra);
220 %     if mod(i-1,60)==0 % plotando a sombra de hora em hora (somente
para checagem, comentar)
221 %         figure(1000)
222 %         clf
223 %         plot([xp1 xp2 xp3 xp4 xp1],[yp1 yp2 yp3 yp4 yp1])
224 %         hold on
225 %         plot(x_sombra,y_sombra,'r')
226 %         hold on
227 %         plot([xpc xs_pc(i)],[ypc ys_pc(i)],'g')
228 %         axis image
229 %     end
230 end
231 A_sombra=flagzen.*A_sombra+(1-flagzen)*A_vd; % assumindo sombra durante
a noite como A_vd
232 % Dist cia média do painel-sombra (centro-centro)
233 S_sombra=sqrt((xpc-xs_pc).^2+(ypc-ys_pc).^2+zpc^2); % Dist ncia entre
centros do Painel e da sua sombra
234 S_sombra=flagzen.*S_sombra+(1-flagzen)*h_painel; % assumindo dist ncia
da sombra igual a dist ncia do painel do solo durante a noite
235 F_surf_bs_sb=max(A_sombra.*cos(zen).*cos(theta)./(pi*S_sombra.^2),0); %
Fator de forma da sombra
236 F_surf_bs=F_surf_bs-F_surf_bs_sb; % considerando sombra somente para o
backsheet
237
238 % Termos de SW
239 RRb=RB_isotropico(doy,hora,lat_rad,long_rad,time_lag,Beta_rad); % Fator
Rb: Razão entre radiação direta horizontal e do plano inclinado
240 nt=length(doy);
241
242 TT=[Tamb(1);Tamb(1);Tamb(1)]; % [K] Inicialização do Vetor Temperatura
243 TT_ff=[Tamb(1);Tamb(1);Tamb(1)]; % [K] Inicialização do Vetor
Temperatura para painel flutuante
244 Tar=Tamb(1);
245 % Variáveis painel fixo
246 Tvd=zeros(size(Tamb)); % [K] Alocação de memória para temperatura do
Vidro
247 Tcel=zeros(size(Tamb)); % [K] Alocação de memória para temperatura da Cé
lula
248 Tbs=zeros(size(Tamb)); % [K] Alocação de memória para temperatura do
Backsheet
249 E_pv=zeros(size(Tamb)); % [kJ] Alocação de memória para a energia gerada
no passo no tempo
250 eff_c=zeros(size(Tamb));
251 % Variáveis painel flutuante

```



```

252 Tvd_ff=zeros(size(Tamb)); % [K] Alocação de memória para temperatura do
    Vidro
253 Tcel_ff=zeros(size(Tamb)); % [K] Alocação de memória para temperatura da
    Célula
254 Tbs_ff=zeros(size(Tamb)); % [K] Alocação de memória para temperatura do
    BBacksheet
255 E_pv_ff=zeros(size(Tamb)); % [kJ] Alocação de memória para a energia
    gerada no passo no tempo
256 eff_c_f=zeros(size(Tamb));
257 tol_max=1e-3; % [W] tolerância máxima ao erro no Balanço de Energia (
    EBE)
258 maxits=500; % número máximo de iterações na solução de EBE
259 urf=1;
260 % Passo no tempo
261 % Painel em Terra
262 for it=1:size(Tamb)
263     Tar=Tamb(it); % [K] Temperatura do Ar ambiente no passo no tempo
    atual
264     Gh=glob(it); % [W/m2] Radiação Global no passo no tempo atual
265     Gd=Id(it); % [W/m2] Radiação Difusa no passo no tempo atual
266     Gb=Ib(it); % [W/m2] Radiação Direta Normal no passo no tempo atual
267     Gt=Ib(it)*cos(zen(it))*RRb(it)+Id(it); % [W/m2] Radiação Global no
    plano do painel no passo no tempo atual (considerando irradiação
    difusa isotrópica)
268     Tvd_a=TT(1); % [K] Temperatura inicial do Vidro no passo no tempo
269     Tcel_a=TT(2); % [K] Temperatura inicial da Célula no passo no tempo
270     Tbs_a=TT(3); % [K] Temperatura inicial do Backsheet no passo no
    tempo
271     VV=Vento(it);
272
273     % Termo Convectivo
274     % Propriedades do ar úmido
275     Tf=(Tvd_a+Tar)/2; % [K] Temperatura de película
276     % rho_ar=a_rho_ar+(Tf-Tref)*b_rho_ar; % [kg/m3] densidade do HTF
277     % visc_ar=a_visc_ar+(Tf-Tref)*b_visc_ar; % [m2/s] viscosidade do ar
278     % k_ar=a_k_ar+(Tf-Tref)*b_k_ar; % [W/m.K] condutividade térmica do
    ar
279     % cp_ar=a_cp_ar+(Tf-Tref)*b_cp_ar; % [J/kg.K] calor específico do ar
280     [rho_ar, visc_ar, cp_ar, k_ar]=propriedades_ar_umido(Tf-273.15, RH(it),
    Press(it));
281     Pr_ar=visc_ar.*rho_ar.*cp_ar./k_ar; % [] Número de Prandtl ar
282     Re=L_char*VV./visc_ar; % número de Reynolds (baseado no comprimento
    característico)
283     ReL=L_vd*VV./visc_ar; % número de Reynolds (baseado no comprimento
    do lado do vidro)
284     ceterm=1/Tf;
285     Gr=abs(g*ceterm*(Tvd_a-Tar)*L_char^3./visc_ar.^2); % Número de
    Grashof, definição pag 300 Holman
286     Indicador_conv=Gr./Re.^2;

```

```

287 Ra=Gr.*Pr_ar;
288 GrL=abs(g*ceterm*(Tvd_a-Tar)*L_vd^3./visc_ar.^2);
289 RaL=GrL.*Pr_ar;
290 senbeta=abs(sin(Beta_rad-pi/2)); % valores para Nusselt
291 cosbeta=cos(Beta_rad-pi/2); % valores para Nusselt
292 Nu_93=(0.825+(0.387*(RaL*cosbeta).^(1/6))./((1+(0.492./Pr_ar)
.^(9/16)).^(8/27))).^2; % [] https://people.csail.mit.edu/jaffer/
SimRoof/Convection/#Inclined%20Plate
293 Nu_HHT=(0.65+0.36*(Ra*senbeta).^(1/6)).^2; % [] https://people.csail
.mit.edu/jaffer/SimRoof/Convection/#Inclined%20Plate
294 h_nat=k_ar.*max(Nu_HHT./L_char,Nu_93./L_vd); % [W/m2K] coeficiente
de transferência de calor por convecção natural, vide https://people.
csail.mit.edu/jaffer/SimRoof/Convection/#Inclined%20Plate
295 Nu_forc_l=0.664*ReL.^0.5.*Pr_ar.^(1/3); % [] Número de Nusselt para
placa horizontal (laminar) https://people.csail.mit.edu/jaffer/
SimRoof/Convection/#Inclined%20Plate
296 h_forc_l=k_ar.*Nu_forc_l/L_vd; % [W/m2K] coeficiente de transferê
ncia de calor por convecção forçada laminar
297 Nu_forc_t=0.037*ReL.^(4/5).*Pr_ar.^(1/3); % [] Número de Nusselt
para placa horizontal (turbulent) https://people.csail.mit.edu/jaffer
/SimRoof/Convection/#Inclined%20Plate
298 Nu_aj=cc_ajj_max*ReL.^pp_max.*Pr_ar.^(1/3); % [] Número de Nusselt
ajustado para placa PV (turbulent) (vide dissertação Ariane e Balanç
o_de_Energia_PV_v81.m)
299 h_forc_t=flag_Nu_aj*k_ar.*Nu_aj/L_vd+(1-flag_Nu_aj)*k_ar.*Nu_forc_t/
L_vd; % [W/m2K] coeficiente de transferência de calor por convecção
forçada turbulenta
300
301
302 %h_forc_t=20*ones(size(h_forc_t));
303
304 % Indicador de Convecção Forçada ou Natural
305 Indicador_conv=Gr./Re.^2;
306 % Gr/Re2 << 1 -convecção forçada predominante (Hamami et al)
307 h=h_forc_t;
308 h_vd2at=h_forc_t; % [W/m2K] coeficiente de transferência de calor
por convecção forçada turbulenta (considerada predominante)
309 h_bs2at=h_forc_t; % [W/m2K] coeficiente de transferência de calor
por convecção forçada turbulenta (considerada predominante)
310 r_vd2at=1/h_vd2at; % colocado na forma de resistência
311 r_bs2at=1/h_bs2at; % colocado na forma de resistência
312
313 % Solução do sistema de equação
314
315 % Derivadas que são constantes em relação as variáveis
316 dQinercia_vd_dTvd=-Vol_vd*rho_cp_vd/dt; % [W/K] Derivada do termo de
inércia térmica do Vidro em relação Temp Vidro
317 dQinercia_cel_dTcel=-Vol_cel*rho_cp_cel/dt; % [W/K] Derivada do
termo de inércia térmica do Célula em relação Temp Célula

```

```

318     dQinercia_bs_dTbs=-Vol_bs*rho_cp_bs/dt; % [W/K] Derivada do termo
de inércia térmica do Backsheet em relação Temp Backsheet
319     %dQ_cond_cel2vd_dTvd=-A_p/r_eva; % [W/K] Derivada do termo de conduç
ão para o vidro em relação a Tvd
320     %dQ_cond_cel2vd_dTcel=A_p/r_eva; % [W/K] Derivada do termo de conduç
ão para o vidro em relação a Tcel
321     %dQ_cond_cel2bs_dTcel=A_p/r_eva; % [W/K] Derivada do termo de conduç
ão para o backsheet em relação a Tcel
322     %dQ_cond_cel2bs_dTbs=-A_p/r_eva; % [W/K] Derivada do termo de conduç
ão para o backsheet em relação a Tbs
323
324     dQ_cond_cel2vd_dTvd=-A_p/(r_eva+r_vd); % [W/K] Derivada do termo de
condução para o vidro em relação a Tvd
325     dQ_cond_cel2vd_dTcel=A_p/(r_eva+r_vd); % [W/K] Derivada do termo de
condução para o vidro em relação a Tcel
326     dQ_cond_cel2bs_dTcel=A_p/(r_eva+r_bs); % [W/K] Derivada do termo de
condução para o backsheet em relação a Tcel
327     dQ_cond_cel2bs_dTbs=-A_p/(r_eva+r_bs); % [W/K] Derivada do termo de
condução para o backsheet em relação a Tbs
328
329     deff_cel_dTcel=-eff_cel_ref*gamma_T;
330     dP_gen_dTcel=deff_cel_dTcel;
331     ebe_sum=1;
332     nits=0;
333     while ebe_sum>tol_max && nits<maxits
334
335
336         % Termos do Balanço de Energia
337         % Vetor Temperaturas para sistema de equações
338         % TT(1): Vidro
339         % TT(2): Célula
340         % TT(3): Backsheet
341         %
342
343         % Vidro
344         Qinercia_vd=-Vol_vd*rho_cp_vd/dt*(TT(1)-Tvd_a); % [W] Inércia té
rmica do vidro
345         SW_vd_1=Gt*(1-rho_vd)*alpha_vd; % [W/m2] Radiação incidente
absorvida pelo vidro
346         %SW_vd_2=((Gb*cos(zen(it))+Gd)*rho_sup*F_surf)*(1-rho_vd)*
alpha_vd; % [W/m2] Radiação refletida na superfície e absorvida pelo
vidro
347         SW_vd_2=Gh*rho_sup*F_surf*(1-rho_vd)*alpha_vd; % [W/m2] Radiação
refletida na superfície e absorvida pelo vidro
348         %SW_vd_3=(Gt+(Gb*cos(zen(it))+Gd)*rho_sup*F_surf)*(1-rho_vd)*(1-
alpha_vd)*rho_cel*(1-tal_vd); % [W/m2] Radiação refletida pela célula
e absorvida
349         SW_vd_3=(Gt+Gh*rho_sup*F_surf)*(1-rho_vd)*(1-alpha_vd)*rho_cel
*(1-tal_vd); % [W/m2] Radiação refletida pela célula e absorvida

```

```

350     Q_SW_vd=(SW_vd_1+SW_vd_2+SW_vd_3)*A_p; % [W] Calor total devido
a radiação solar absorvida pelo vidro
351     LW_vd_1=-e_vd*sb*TT(1)^4; % [W/m2] Radiação térmica emitida pela
superfície externa vidro
352     LW_vd_2=e_sup*sb*F_surf*T_sup(it)^4; % [W/m2] Radiação térmica
emitida pelo solo (no caso do vidro foi desconsiderada a diferença de
sol e sombra da superfície
353     %LW_vd_3=Gsky(it)*F_sky_vd; % [W/m2] Radiação térmica emitida
pela atmosfera (essa formulação de Brutsaert só válida para céu claro
)
354     LW_vd_3=e_vd*sb*F_sky_vd*T_sky(it)^4; % [W/m2] Radiação térmica
emitida pela atmosfera
355     Q_LW_vd=(LW_vd_1+LW_vd_2+LW_vd_3)*A_p; % [W] Calor total devido
as trocas por radiação térmica
356     dQ_LW_vd_dTvd=-4*e_vd*A_p*sb*TT(1)^3; % [W/K] Derivada da radiaç
ão térmica emitida pela superfície externa vidro em relação a Temp
vidro
357     %Qconv_vd2at=h_vd2at*A_p*(TT(1)-Tar); % [W] Calor por convecção
entre vidro e atmosfera
358     %dQconv_vd2at_dTvd=h_vd2at*A_p; % [W/K] Derivada do calor por
convecção entre vidro e atmosfera em relação a Temp vidro
359     Qconv_vd2at=A_p*(TT(1)-Tar)/(r_vd+r_vd2at); % [W] Calor por
convecção entre vidro e atmosfera (no caso foi adicionado a condução
por metade do vidro)
360     dQconv_vd2at_dTvd=A_p/(r_vd+r_vd2at); % [W/K] Derivada do calor
por convecção entre vidro e atmosfera em relação a Temp vidro
361     %Q_cond_cel2vd=(TT(2)-TT(1))*A_p/r_eva; % [W] Calor por condução
da célula para o vidro (essa equação é diferente da Dissertação
Ariane mas o sinal está consistente)
362     Q_cond_cel2vd=(TT(2)-TT(1))*A_p/(r_eva+r_vd); % [W] Calor por
condução da célula para o vidro (essa equação é diferente da Disserta
ção Ariane mas o sinal está consistente)
363
364     % Célula
365     Qinercia_cel=-Vol_cel*rho_cp_cel/dt*(TT(2)-Tcel_a); % [W] Iné
rcia térmica da célula
366     SW_cel_1=Gt*(1-rho_vd)*(1-alpha_vd)*alpha_cel; % [W/m2] Radiação
incidente absorvida pela célula
367     %SW_cel_2=((Gb*cos(zen(it))+Gd)*rho_sup*F_surf)*(1-rho_vd)*(1-
alpha_vd)*alpha_cel; % [W/m2] Radiação refletida na superfície e
absorvida pela célula
368     SW_cel_2=(Gh*rho_sup*F_surf)*(1-rho_vd)*(1-alpha_vd)*alpha_cel;
% [W/m2] Radiação refletida na superfície e absorvida pela célula
369     Q_SW_cel=(SW_cel_1+SW_cel_2)*A_p; % [W] Irradiação total devido
a radiação solar absorvida pela célula
370     %Q_cond_cel2bs=(TT(2)-TT(3))*A_p/r_eva; % [W] Calor por condução
da célula para o vidro (essa equação é diferente da Dissertação
Ariane mas o sinal está consistente)
371     Q_cond_cel2bs=(TT(2)-TT(3))*A_p/(r_eva+r_bs); % [W] Calor por

```

```

condução da célula para o vidro (essa equação é diferente da Disserta
ção Ariane mas o sinal está consistente)
372     eff_cel=eff_cel_ref*(1-gamma_T*(TT(2)-T_ref_PV)); % [] eficiê
ncia de conversão como função da teperatura da célula (Skoplaki and
Palyvos, 2009)
373     P_gen=eff_cel*Q_SW_cel; % [W] Potência elétrica gerada pela cé
lula
374
375     % Backsheet
376     Qinercia_bs=-Vol_bs*rho_cp_bs/dt*(TT(3)-Tbs_a); % [W] Inércia té
rmica da célula
377     SW_bs_1=Gd*F_sky_bs*alpha_bs; % [W/m2] Radiação incidente
absorvida pelo backsheet (somente radiação difusa atinge o backsheet)
378     SW_bs_2=Gh*rho_sup*F_surf_bs(it)*alpha_bs; % [W/m2] Radiação
refletida na superfície e absorvida pela célula
379     Q_SW_bs=(SW_bs_1+SW_bs_2)*A_p; % [W] Calor total devido a radiaç
ão solar absorvida pelo backsheet
380     %LW_bs_1=Gsky(it)*F_sky_bs; % [W/m2] Radiação térmica da
atmosfera absorvida pelo backsheet (essa formulação de Brutsaert só v
álida para céu claro)
381     LW_bs_1=-e_bs*sb*TT(3)^4; % [W/m2] Radiação térmica emitida pelo
backsheet
382     LW_bs_2=e_sup*sb*T_sup(it)^4*F_surf_bs(it); % [W/m2] Radiação té
rmica emitida pelo solo e absorvida pelo backsheet
383     LW_bs_2sb=e_sup*sb*T_sup_sombra(it)^4*F_surf_bs_sb(it); % [W/m2]
Radiação térmica emitida pelo solo (que está com sombra) e absorvida
pelo backsheet
384     LW_bs_3=e_bs*sb*F_sky_bs*T_sky(it)^4; % [W/m2] Radiação térmica
da atmosfera absorvida pelo backsheet
385     Q_LW_bs=(LW_bs_1+LW_bs_2+LW_bs_2sb+LW_bs_3)*A_p; % [W] Calor
total devido as trocas por radiação térmica
386     dQ_LW_bs_dTbs=-4*e_bs*A_p*sb*TT(3)^3; % [W/K] Derivada da radiaç
ão térmica emitida pela superfície externa vidro em relação a Temp
vidro
387     %Qconv_bs2at=h_bs2at*A_p*(TT(3)-Tar); % [W] Calor por convecção
entre backsheet e atmosfera
388     %dQconv_bs2at_dTbs=h_bs2at*A_p; % [W/K] Derivada do calor por
convecção entre vidro e atmosfera em relação a Temp vidro
389     Qconv_bs2at=A_p*(TT(3)-Tar)/(r_bs+r_bs2at); % [W] Calor por
convecção entre backsheet e atmosfera
390     dQconv_bs2at_dTbs=A_p/(r_bs+r_bs2at); % [W/K] Derivada do calor
por convecção entre vidro e atmosfera em relação a Temp vidro
391
392
393     % Erros nos Balanços de Energia para cada volume de controle (
EBE)
394     EBE_vd=Qinercia_vd+Q_SW_vd+Q_LW_vd-Qconv_vd2at+Q_cond_cel2vd;
395     EBE_cel=Qinercia_cel+Q_SW_cel-Q_cond_cel2vd-Q_cond_cel2bs-P_gen;
396     EBE_bs=Qinercia_bs+Q_SW_bs+Q_LW_bs-Qconv_bs2at+Q_cond_cel2bs;

```

```

397
398     % Derivadas dos EBE em relação as temperaturas dos VC s
399     dEBE_vd_dTvd=dQinercia_vd_dTvd+dQ_LW_vd_dTvd-dQconv_vd2at_dTvd+
dQ_cond_cel2vd_dTvd;
400     dEBE_vd_dTcel=dQ_cond_cel2vd_dTcel;
401     dEBE_vd_dTbs=0;
402     dEBE_cel_dTvd=-dQ_cond_cel2vd_dTvd;
403     dEBE_cel_dTcel=dQinercia_cel_dTcel-dQ_cond_cel2vd_dTcel-
dQ_cond_cel2bs_dTcel-dP_gen_dTcel;
404     dEBE_cel_dTbs=-dQ_cond_cel2bs_dTbs;
405     dEBE_bs_dTvd=0;
406     dEBE_bs_dTcel=dQ_cond_cel2vd_dTcel;
407     dEBE_bs_dTbs=dQinercia_bs_dTbs+dQ_LW_bs_dTbs-dQconv_bs2at_dTbs+
dQ_cond_cel2bs_dTbs;
408
409     % Construindo as matrices
410
411     EBE=[EBE_vd ; EBE_cel ; EBE_bs];
412
413     dEBEdT=[dEBE_vd_dTvd dEBE_vd_dTcel 0 ;
414             dEBE_cel_dTvd dEBE_cel_dTcel dEBE_cel_dTbs ;
415             0 dEBE_bs_dTcel dEBE_bs_dTbs];
416
417     dumT=dEBEdT\EBE;
418     dTT=dumT*urf;
419     TT=TT-dTT;
420     dum=isreal(TT);
421
422     % if a seguir é só para debug
423     %             if dum==0
424     %             TT
425     %             end
426
427     ebe_sum_a=ebe_sum;
428     ebe_sum=sum(abs(EBE));
429     nits=nits+1;
430
431     % if a seguir é só para debug
432     %             if ebe_sum>ebe_sum_a
433     %             ebe_sum
434     %             end
435
436     if nits==maxits-2
437         nits
438     end
439
440     end
441     Tvd(it)=TT(1); % [K] atualizando valor da temperatura do Vidro para
o valor calculado no passo no tempo

```

```

442 Tcel(it)=TT(2); % [K] atualizando valor da temperatura da Célula
para o valor calculado no passo no tempo
443 Tbs(it)=TT(3); % [K] atualizando valor da temperatura do Backsheet
para o valor calculado no passo no tempo
444 E_pv(it)=P_gen*dt/1000; % [kJ] Energia gerada no passo no tempo
445 E_pv_max(it)=eff_cel_ref*Q_SW_cel*dt/1000; % [kJ] Energia máxima que
poderia ser gerada no passo no tempo sem o efeito da temperatura
446 eff_c(it)= eff_cel;
447 end
448
449 % Painel Flutuante
450 for it=1:size(Tamb)
451 %Tar=(Tamb(it)+Td(it))/2; % [K] assumindo temperatura do ar acima do
água como média de temperatura do ar e da temperatura de orvalho
452 %Tar=Td(it); % [K] assumindo temperatura do ar acima do água como a
temperatura de orvalho
453 Tar = temperatura_acima_agua(Tamb(it), RH(it)/100, satvap(Tamb(it)
-273.15), Press(it)); %[K] Modelagem temperatura virtual
454 Tar_values(it) = Tar-273.15; % Armazenando o valor no vetor
455 Gh=glob(it); % [W/m2] Radiação Global no passo no tempo atual
456 Gd=Id(it); % [W/m2] Radiação Difusa no passo no tempo atual
457 Gb=Ib(it); % [W/m2] Radiação Direta Normal no passo no tempo atual
458 Gt=Ib(it)*cos(zen(it))*RRb(it)+Id(it); % [W/m2] Radiação Global no
plano do painel no passo no tempo atual (considerando irradiação
difusa isotrópica)
459 Tvd_a=TT(1); % [K] Temperatura inicial do Vidro no passo no tempo
460 Tcel_a=TT(2); % [K] Temperatura inicial da Célula no passo no tempo
461 Tbs_a=TT(3); % [K] Temperatura inicial do Backsheet no passo no
tempo
462 VV=Vento(it);
463
464 % Termo Convectivo
465 % Propriedades do ar úmido
466 Tf=(Tvd_a+Tar)/2; % [K] Temperatura de película
467 % rho_ar=a_rho_ar+(Tf-Tref)*b_rho_ar; % [kg/m3] densidade do HTF
468 % visc_ar=a_visc_ar+(Tf-Tref)*b_visc_ar; % [m2/s] viscosidade do ar
469 % k_ar=a_k_ar+(Tf-Tref)*b_k_ar; % [W/m.K] condutividade térmica do
ar
470 % cp_ar=a_cp_ar+(Tf-Tref)*b_cp_ar; % [J/kg.K] calor específico do ar
471 % [rho_ar, visc_ar, cp_ar, k_ar]=propriedades_ar_umido(Tf-273.15, RH(it),
Press(it));
472 [rho_ar, visc_ar, cp_ar, k_ar]=propriedades_ar_umido(Tf-273.15, 90, Press
(it)); % assumindo 90% para RH do ar acima da água (precisa calcular
corretamente)
473 Pr_ar=visc_ar.*rho_ar.*cp_ar./k_ar; % [] Número de Prandtl ar
474 Re=L_char*VV./visc_ar; % número de Reynolds (baseado no comprimento
característico)
475 ReL=L_vd*VV./visc_ar; % número de Reynolds (baseado no comprimento
do lado do vidro)

```

```

476   ceterm=1/Tf;
477   Gr=abs(g*ceterm*(Tvd_a-Tar)*L_char^3./visc_ar.^2); % Número de
Grashof, definição pag 300 Holman
478   Indicador_conv=Gr./Re.^2;
479   Ra=Gr.*Pr_ar;
480   GrL=abs(g*ceterm*(Tvd_a-Tar)*L_vd^3./visc_ar.^2);
481   RaL=GrL.*Pr_ar;
482   senbeta=abs(sin(Beta_rad-pi/2)); % valores para Nusselt
483   cosbeta=cos(Beta_rad-pi/2); % valores para Nusselt
484   Nu_93=(0.825+(0.387*(RaL*cosbeta).^(1/6))./((1+(0.492./Pr_ar)
.^(9/16)).^(8/27))).^2; % [] https://people.csail.mit.edu/jaffer/SimRoof/Convection/#Inclined%20Plate
485   Nu_HHT=(0.65+0.36*(Ra*senbeta).^(1/6)).^2; % [] https://people.csail.mit.edu/jaffer/SimRoof/Convection/#Inclined%20Plate
486   h_nat=k_ar.*max(Nu_HHT./L_char,Nu_93./L_vd); % [W/m2K] coeficiente
de transferência de calor por convecção natural, vide https://people.csail.mit.edu/jaffer/SimRoof/Convection/#Inclined%20Plate
487   Nu_forc_l=0.664*ReL.^0.5.*Pr_ar.^(1/3); % [] Número de Nusselt para
placa horizontal (laminar) https://people.csail.mit.edu/jaffer/SimRoof/Convection/#Inclined%20Plate
488   h_forc_l=k_ar.*Nu_forc_l/L_vd; % [W/m2K] coeficiente de transferê
ncia de calor por convecção forçada laminar
489   Nu_forc_t=0.037*ReL.^(4/5).*Pr_ar.^(1/3); % [] Número de Nusselt
para placa horizontal (turbulent) https://people.csail.mit.edu/jaffer/SimRoof/Convection/#Inclined%20Plate
490   Nu_aj=cc_ajj_max*ReL.^pp_max.*Pr_ar.^(1/3); % [] Número de Nusselt
ajustado para placa PV (turbulent) (vide dissertação Ariane e Balanç
o_de_Energia_PV_v81.m)
491   h_forc_t=flag_Nu_aj*k_ar.*Nu_aj/L_vd+(1-flag_Nu_aj)*k_ar.*Nu_forc_t/
L_vd; % [W/m2K] coeficiente de transferência de calor por convecção
forçada turbulenta
492
493
494   %h_forc_t=20*ones(size(h_forc_t));
495
496   % Indicador de Convecção Forçada ou Natural
497   Indicador_conv=Gr./Re.^2;
498   % Gr/Re2 << 1 -convecção forçada predominante (Hamami et al)
499   h=h_forc_t;
500   h_vd2at=h_forc_t; % [W/m2K] coeficiente de transferência de calor
por convecção forçada turbulenta (considerada predominante)
501   h_bs2at=h_forc_t; % [W/m2K] coeficiente de transferência de calor
por convecção forçada turbulenta (considerada predominante)
502   r_vd2at=1/h_vd2at; % colocado na forma de resistência
503   r_bs2at=1/h_bs2at; % colocado na forma de resistência
504
505   % Solução do sistema de equação
506
507   % Derivadas que são constantes em relação as variáveis

```



```

508     dQinercia_vd_dTvd=-Vol_vd*rho_cp_vd/dt; % [W/K] Derivada do termo de
        inércia térmica do Vidro em relação Temp Vidro
509     dQinercia_cel_dTcel=-Vol_cel*rho_cp_cel/dt; % [W/K] Derivada do
        termo de inércia térmica do Célula em relação Temp Célula
510     dQinercia_bs_dTbs=-Vol_bs*rho_cp_bs/dt; % [W/K] Derivada do termo
        de inércia térmica do Backsheet em relação Temp Backsheet
511     %dQ_cond_cel2vd_dTvd=-A_p/r_eva; % [W/K] Derivada do termo de conduç
        ão para o vidro em relação a Tvd
512     %dQ_cond_cel2vd_dTcel=A_p/r_eva; % [W/K] Derivada do termo de conduç
        ão para o vidro em relação a Tcel
513     %dQ_cond_cel2bs_dTcel=A_p/r_eva; % [W/K] Derivada do termo de conduç
        ão para o backsheet em relação a Tcel
514     %dQ_cond_cel2bs_dTbs=-A_p/r_eva; % [W/K] Derivada do termo de conduç
        ão para o backsheet em relação a Tbs
515
516     dQ_cond_cel2vd_dTvd=-A_p/(r_eva+r_vd); % [W/K] Derivada do termo de
        condução para o vidro em relação a Tvd
517     dQ_cond_cel2vd_dTcel=A_p/(r_eva+r_vd); % [W/K] Derivada do termo de
        condução para o vidro em relação a Tcel
518     dQ_cond_cel2bs_dTcel=A_p/(r_eva+r_bs); % [W/K] Derivada do termo de
        condução para o backsheet em relação a Tcel
519     dQ_cond_cel2bs_dTbs=-A_p/(r_eva+r_bs); % [W/K] Derivada do termo de
        condução para o backsheet em relação a Tbs
520
521     deff_cel_dTcel=-eff_cel_ref*gamma_T;
522     dP_gen_dTcel=deff_cel_dTcel;
523     ebe_sum=1;
524     nits=0;
525     while ebe_sum>tol_max && nits<maxits
526
527
528         % Termos do Balanço de Energia
529         % Vetor Temperaturas para sistema de equações
530         % TT(1): Vidro
531         % TT(2): Célula
532         % TT(3): Backsheet
533         %
534
535         % Vidro
536         Qinercia_vd=-Vol_vd*rho_cp_vd/dt*(TT(1)-Tvd_a); % [W] Inércia té
        rmica do vidro
537         SW_vd_1=Gt*(1-rho_vd)*alpha_vd; % [W/m2] Radiação incidente
        absorvida pelo vidro
538         %SW_vd_2=((Gb*cos(zen(it))+Gd)*rho_sup*F_surf)*(1-rho_vd)*
        alpha_vd; % [W/m2] Radiação refletida na superfície e absorvida pelo
        vidro
539         SW_vd_2=Gh*rho_sup*F_surf*(1-rho_vd)*alpha_vd; % [W/m2] Radiação
        refletida na superfície e absorvida pelo vidro
540         %SW_vd_3=(Gt+(Gb*cos(zen(it))+Gd)*rho_sup*F_surf)*(1-rho_vd)*(1-

```

```

alpha_vd)*rho_cel*(1-tal_vd); % [W/m2] Radiação refletida pela célula
e absorvida
541     SW_vd_3=(Gt+Gh*rho_sup*F_surf)*(1-rho_vd)*(1-alpha_vd)*rho_cel
*(1-tal_vd); % [W/m2] Radiação refletida pela célula e absorvida
542     Q_SW_vd=(SW_vd_1+SW_vd_2+SW_vd_3)*A_p; % [W] Calor total devido
a radiação solar absorvida pelo vidro
543     LW_vd_1=-e_vd*sb*TT(1)^4; % [W/m2] Radiação térmica emitida pela
superfície externa vidro
544     LW_vd_2=e_sup*sb*F_surf*T_sup(it)^4; % [W/m2] Radiação térmica
emitida pelo solo (no caso do vidro foi desconsiderada a diferença de
sol e sombra da superfície
545     %LW_vd_3=Gsky(it)*F_sky_vd; % [W/m2] Radiação térmica emitida
pela atmosfera (essa formulação de Brutsaert só válida para céu claro
)
546     LW_vd_3=e_vd*sb*F_sky_vd*T_sky(it)^4; % [W/m2] Radiação térmica
emitida pela atmosfera
547     Q_LW_vd=(LW_vd_1+LW_vd_2+LW_vd_3)*A_p; % [W] Calor total devido
as trocas por radiação térmica
548     dQ_LW_vd_dTvd=-4*e_vd*A_p*sb*TT(1)^3; % [W/K] Derivada da radiaç
ão térmica emitida pela superfície externa vidro em relação a Temp
vidro
549     %Qconv_vd2at=h_vd2at*A_p*(TT(1)-Tar); % [W] Calor por convecção
entre vidro e atmosfera
550     %dQconv_vd2at_dTvd=h_vd2at*A_p; % [W/K] Derivada do calor por
convecção entre vidro e atmosfera em relação a Temp vidro
551     Qconv_vd2at=A_p*(TT(1)-Tar)/(r_vd+r_vd2at); % [W] Calor por
convecção entre vidro e atmosfera (no caso foi adicionado a condução
por metade do vidro)
552     dQconv_vd2at_dTvd=A_p/(r_vd+r_vd2at); % [W/K] Derivada do calor
por convecção entre vidro e atmosfera em relação a Temp vidro
553     %Q_cond_cel2vd=(TT(2)-TT(1))*A_p/r_eva; % [W] Calor por condução
da célula para o vidro (essa equação é diferente da Dissertação
Ariane mas o sinal está consistente)
554     Q_cond_cel2vd=(TT(2)-TT(1))*A_p/(r_eva+r_vd); % [W] Calor por
condução da célula para o vidro (essa equação é diferente da Disserta
ção Ariane mas o sinal está consistente)
555
556     % Célula
557     Qinercia_cel=-Vol_cel*rho_cp_cel/dt*(TT(2)-Tcel_a); % [W] Iné
rcia térmica da célula
558     SW_cel_1=Gt*(1-rho_vd)*(1-alpha_vd)*alpha_cel; % [W/m2] Radiação
incidente absorvida pela célula
559     %SW_cel_2=((Gb*cos(zen(it))+Gd)*rho_sup*F_surf)*(1-rho_vd)*(1-
alpha_vd)*alpha_cel; % [W/m2] Radiação refletida na superfície e
absorvida pela célula
560     SW_cel_2=(Gh*rho_sup*F_surf)*(1-rho_vd)*(1-alpha_vd)*alpha_cel;
% [W/m2] Radiação refletida na superfície e absorvida pela célula
561     Q_SW_cel=(SW_cel_1+SW_cel_2)*A_p; % [W] Irradiação total devido
a radiação solar absorvida pela célula

```

```

562     %Q_cond_cel2bs=(TT(2)-TT(3))*A_p/r_eva; % [W] Calor por condução
da célula para o vidro (essa equação é diferente da Dissertação
Ariane mas o sinal está consistente)
563     Q_cond_cel2bs=(TT(2)-TT(3))*A_p/(r_eva+r_bs); % [W] Calor por
condução da célula para o vidro (essa equação é diferente da Disserta
ção Ariane mas o sinal está consistente)
564     eff_cel=eff_cel_ref*(1-gamma_T*(TT(2)-T_ref_PV)); % [] eficiê
ncia de conversão como função da teperatura da célula (Skoplaki and
Palyvos, 2009)
565     P_gen=eff_cel*Q_SW_cel; % [W] Potência elétrica gerada pela cé
lula
566
567     % Backsheet
568     Qinercia_bs=-Vol_bs*rho_cp_bs/dt*(TT(3)-Tbs_a); % [W] Inércia té
rmica da célula
569     SW_bs_1=Gd*F_sky_bs*alpha_bs; % [W/m2] Radiação incidente
absorvida pelo backsheet (somente radiação difusa atinge o backsheet)
570     SW_bs_2=Gh*rho_sup*F_surf_bs(it)*alpha_bs; % [W/m2] Radiação
refletida na superfície e absorvida pela célula
571     Q_SW_bs=(SW_bs_1+SW_bs_2)*A_p; % [W] Calor total devido a radiaç
ão solar absorvida pelo backsheet
572     %LW_bs_1=Gsky(it)*F_sky_bs; % [W/m2] Radiação térmica da
atmosfera absorvida pelo backsheet (essa formulação de Brutsaert só v
álida para céu claro)
573     LW_bs_1=-e_bs*sb*TT(3)^4; % [W/m2] Radiação térmica emitida pelo
backsheet
574     LW_bs_2=e_sup*sb*T_sup(it)^4*F_surf_bs(it); % [W/m2] Radiação té
rmica emitida pelo solo e absorvida pelo backsheet
575     LW_bs_2sb=e_sup*sb*T_sup_sombra(it)^4*F_surf_bs_sb(it); % [W/m2]
Radiação térmica emitida pelo solo (que está com sombra) e absorvida
pelo backsheet
576     LW_bs_3=e_bs*sb*F_sky_bs*T_sky(it)^4; % [W/m2] Radiação térmica
da atmosfera absorvida pelo backsheet
577     Q_LW_bs=(LW_bs_1+LW_bs_2+LW_bs_2sb+LW_bs_3)*A_p; % [W] Calor
total devido as trocas por radiação térmica
578     dQ_LW_bs_dTbs=-4*e_bs*A_p*sb*TT(3)^3; % [W/K] Derivada da radiaç
ão térmica emitida pela superfície externa vidro em relação a Temp
vidro
579     %Qconv_bs2at=h_bs2at*A_p*(TT(3)-Tar); % [W] Calor por convecção
entre backsheet e atmosfera
580     %dQconv_bs2at_dTbs=h_bs2at*A_p; % [W/K] Derivada do calor por
convecção entre vidro e atmosfera em relação a Temp vidro
581     Qconv_bs2at=A_p*(TT(3)-Tar)/(r_bs+r_bs2at); % [W] Calor por
convecção entre backsheet e atmosfera
582     dQconv_bs2at_dTbs=A_p/(r_bs+r_bs2at); % [W/K] Derivada do calor
por convecção entre vidro e atmosfera em relação a Temp vidro
583
584
585     % Erros nos Balanços de Energia para cada volume de controle (

```

```

EBE)
586     EBE_vd=Qinercia_vd+Q_SW_vd+Q_LW_vd-Qconv_vd2at+Q_cond_cel2vd;
587     EBE_cel=Qinercia_cel+Q_SW_cel-Q_cond_cel2vd-Q_cond_cel2bs-P_gen;
588     EBE_bs=Qinercia_bs+Q_SW_bs+Q_LW_bs-Qconv_bs2at+Q_cond_cel2bs;
589
590     % Derivadas dos EBE em relação as temperaturas dos VC s
591     dEBE_vd_dTvd=dQinercia_vd_dTvd+dQ_LW_vd_dTvd-dQconv_vd2at_dTvd+
dQ_cond_cel2vd_dTvd;
592     dEBE_vd_dTcel=dQ_cond_cel2vd_dTcel;
593     dEBE_vd_dTbs=0;
594     dEBE_cel_dTvd=-dQ_cond_cel2vd_dTvd;
595     dEBE_cel_dTcel=dQinercia_cel_dTcel-dQ_cond_cel2vd_dTcel-
dQ_cond_cel2bs_dTcel-dP_gen_dTcel;
596     dEBE_cel_dTbs=-dQ_cond_cel2bs_dTbs;
597     dEBE_bs_dTvd=0;
598     dEBE_bs_dTcel=dQ_cond_cel2vd_dTcel;
599     dEBE_bs_dTbs=dQinercia_bs_dTbs+dQ_LW_bs_dTbs-dQconv_bs2at_dTbs+
dQ_cond_cel2bs_dTbs;
600
601     % Construindo as matrices
602
603     EBE=[EBE_vd ; EBE_cel ; EBE_bs];
604
605     dEBEdT=[dEBE_vd_dTvd dEBE_vd_dTcel 0 ;
606             dEBE_cel_dTvd dEBE_cel_dTcel dEBE_cel_dTbs ;
607             0 dEBE_bs_dTcel dEBE_bs_dTbs];
608
609     dumT=dEBEdT\EBE;
610     dTT=dumT*urf;
611     TT=TT-dTT;
612     dum=isreal(TT);
613
614     % if a seguir é só para debug
615     %             if dum==0
616     %             TT
617     %             end
618
619     ebe_sum_a=ebe_sum;
620     ebe_sum=sum(abs(EBE));
621     nits=nits+1;
622
623     % if a seguir é só para debug
624     %             if ebe_sum>ebe_sum_a
625     %             ebe_sum
626     %             end
627
628     if nits==maxits-2
629         nits
630     end

```

```

631
632     end
633     Tvd_ff(it)=TT(1); % [K] atualizando valor da temperatura do Vidro
para o valor calculado no passo no tempo
634     Tcel_ff(it)=TT(2); % [K] atualizando valor da temperatura da Célula
para o valor calculado no passo no tempo
635     Tbs_ff(it)=TT(3); % [K] atualizando valor da temperatura do
Backsheet para o valor calculado no passo no tempo
636     E_pv_ff(it)=P_gen*dt/1000; % [kJ] Energia gerada no passo no tempo
637     E_pv_max_ff(it)=eff_cel_ref*Q_SW_cel*dt/1000; % [kJ] Energia máxima
que poderia ser gerada no passo no tempo sem o efeito da temperatura
638     eff_c_f(it)= eff_cel;
639 end
640
641
642 figure(1)
643 clf
644 plot(doy_c , Tamb -273.15 , 'b')
645 hold on
646 plot(doy_c , Tcel -273.15 , 'r')
647 plot(doy_c , Tvd -273.15 , 'g')
648 plot(doy_c , Tbs -273.15 , 'm')
649 legend('ar' , 'célula' , 'vidro' , 'backsheet')
650
651 figure(2)
652 clf
653 plotyy(doy_c , E_pv , doy_c , (Ib.*cos(zen) .*RRb+Id)*dt/1000)
654 legend('E_{PV}' , 'G_t')
655
656 figure(3)
657 clf
658 plot((Ib.*cos(zen) .*RRb+Id)*A_p*dt/1000 , E_pv , '.' )
659 hold on
660 plot((Ib.*cos(zen) .*RRb+Id)*A_p*dt/1000 , (Ib.*cos(zen) .*RRb+Id)*A_p*dt
/1000*eff_cel_ref)
661 xlabel('G_t [J]')
662 ylabel('E_{PV} [J]')
663
664 figure(4)
665 clf
666 plot(doy_c , E_pv , 'b' , doy_c , E_pv_max , 'r')
667 legend('E_{PV}' , 'E_{PV,max}')
668
669 figure(5)
670 clf
671 plot(Tamb(cos(zen) > 0.1) -273.15 , Tcel(cos(zen) > 0.1) -273.15 , '.' )
672 xlabel('T_{amb} [C]')
673 ylabel('T_{cel} [C]')
674

```

```

675 figure(6)
676 clf
677 plot(Tamb(cos(zen)>0.1)-273.15,Tcel_ff(cos(zen)>0.1)-273.15,'.')
678 xlabel('T_{amb} [C]')
679 ylabel('T_{Tcel_ff} [C]')
680
681 figure(7)
682 clf
683 plot(glob(cos(zen)>0.1)-273.15,Tcel(cos(zen)>0.1)-273.15,'.')
684 xlabel('I [W/m^2]')
685 ylabel('T_{cel} [C]')
686
687 figure(8)
688 clf
689 plot(Tcel(Ib>10)-273.15,Tcel_ff(Ib>10)-273.15,'.')
690 hold on
691 plot(Tcel(Ib>10)-273.15,Tcel(Ib>10)-273.15,'r')
692 xlabel('T_{cel,terra} [C ]')
693 ylabel('T_{cel,flutuante} [C ]')
694
695 figure(9)
696 clf
697 plot(E_pv,E_pv_ff,'.')
698 hold on
699 plot(E_pv,E_pv,'r')
700 xlabel('E_{terra} [kJ]')
701 ylabel('E_{flutuante} [kJ]')
702
703 E_terra_anual=sum(E_pv)/1000 % [MJ] geração anual de Energia, Painel em
704 Terra
705 E_flutuante_anual=sum(E_pv_ff)/1000 % [MJ] geração anual de Energia,
706 Painel Flutuante
707 Ganho=(E_flutuante_anual-E_terra_anual)/E_terra_anual
708
709 %%%
710 % Plotando o gráfico após o loop
711 figure(10); % Cria uma nova figura
712
713 % Plota as temperaturas
714 plot(Td-273, 'r-', 'LineWidth', 1.5); % Temperatura de bulbo úmido
715 em vermelho
716 hold on; % Mantém a figura atual para sobrepor outros gráficos
717 plot(Tamb-273, 'g-', 'LineWidth', 1.5); % Temperatura ambiente em
718 verde
719 plot(Tar_values, 'b-', 'LineWidth', 1.5); % Temperatura acima da água
720 em azul
721
722 % Legendas e títulos
723 xlabel('Iteração');

```

```

719 ylabel('Temperatura ( C )');
720 title('Comparação entre Temperaturas');
721 legend('Td (bulbo úmido)', 'Tamb (ambiente)', 'Tar (acima da água)');
722 grid on;
723
724 hold off; % Libera a figura para novos gráficos
725
726 #####
727 % PG Michel Gráfico mensal painel solo
728 dates = datetime(2014, 1, 1) + days(doy_c); % Convertendo para datas
729 months = month(dates); % Obtendo os meses
730 E_pv_monthly = accumarray(months, E_pv, [], @sum); % Soma de E_pv para
    cada mês
731
732 % Obtendo o número de dias em cada mês
733 numDaysInMonth = accumarray(months, 1, [], @sum);
734
735 % Inicializando um array para armazenar desvios padrões diários
736 daily_std = zeros(size(doy_c));
737
738 % Calculando o desvio padrão diário
739 for month = 1:12
740     daysInMonth = (months == month);
741     daily_std(daysInMonth) = std(E_pv(daysInMonth));
742 end
743
744 % Média dos desvios padrões diários por mês
745 monthly_avg_std = accumarray(months, daily_std, [], @mean);
746
747 figure(11); % Cria uma nova figura
748
749 bar(E_pv_monthly, 'b') % Gráfico de barras para E_pv mensal
750 hold on
751 errorbar(1:12, E_pv_monthly, monthly_avg_std, '.k') % Barras de erro
752 set(gca, 'xtick', 1:12, 'xticklabel', {'Jan', 'Fev', 'Mar', 'Abr', 'Mai',
    , 'Jun', 'Jul', 'Ago', 'Set', 'Out', 'Nov', 'Dez'})
753 ylabel('E_{PV} em KJ')
754 xlabel('Meses')
755 title('Energia PV por Mês com Variabilidade Diária')
756 hold off
757
758 #####
759 %Painel Flutuante Energia mensal
760 E_pv_ff_monthly = accumarray(months, E_pv_ff, [], @sum); % Soma de
    E_pv_ff para cada mês
761
762 % Inicializando um array para armazenar desvios padrões diários de
    E_pv_ff
763 daily_std_ff = zeros(size(doy_c));

```

```

764
765 % Calculando o desvio padrão diário para E_pv_ff
766 for month = 1:12
767     daysInMonth = (months == month);
768     daily_std_ff(daysInMonth) = std(E_pv_ff(daysInMonth));
769 end
770
771 % Média dos desvios padrões diários por mês para E_pv_ff
772 monthly_avg_std_ff = accumarray(months, daily_std_ff, [], @mean);
773
774 figure(12); % Cria uma nova figura
775
776 bar(E_pv_ff_monthly, 'b') % Gráfico de barras para E_pv_ff mensal
777 hold on
778 errorbar(1:12, E_pv_ff_monthly, monthly_avg_std_ff, '.k') % Barras de
    erro
779 set(gca, 'xtick', 1:12, 'xticklabel', {'Jan', 'Fev', 'Mar', 'Abr', 'Mai',
    , 'Jun', 'Jul', 'Ago', 'Set', 'Out', 'Nov', 'Dez'})
780 ylabel('E_{PV\ff} em KJ')
781 xlabel('Meses')
782 title('Energia PV Flutuante por Mês com Variabilidade Diária')
783 hold off
784
785 #####
786 %Gráfico das diferenças de geração de energia
787 RH_monthly_avg = accumarray(months, RH, [], @mean); % Média de RH para
    cada mês
788 E_pv_diff = E_pv_ff_monthly - E_pv_monthly; % Diferença mensal
789 figure(13); % Cria uma nova figura
790
791 % Criando o gráfico de barras para a diferença de energia
792 yyaxis left
793 bar(E_pv_diff, 'b') % Gráfico de barras da diferença mensal
794 ylabel('Diferença em KJ')
795
796 % Adicionando a linha para a média da umidade relativa
797 yyaxis right
798 plot(RH_monthly_avg, '-r', 'LineWidth', 2) % Linha vermelha para a mé
    dia de RH
799 ylabel('Umidade Relativa Média (%)')
800
801 % Configurações gerais do gráfico
802 set(gca, 'xtick', 1:12, 'xticklabel', {'Jan', 'Fev', 'Mar', 'Abr', 'Mai',
    , 'Jun', 'Jul', 'Ago', 'Set', 'Out', 'Nov', 'Dez'})
803 xlabel('Meses')
804 title('Diferença Mensal entre E_{PV} e E_{PV\ff} com Média de RH')
805
806 #####
807 %Gráfico de eficiências - Painel solo

```



```

808
809 G_t = (Ib.*cos(zen).*RRb + Id) .* A_p .* dt ./ 1000;
810 % Convertendo temperatura para Celsius
811
812 % Criando o gráfico scatter
813 figure(14); % Cria uma nova figura
814
815 scatter(G_t, eff_c, [], Tcel-273, 'filled'); % A cor dos pontos é
      determinada pela temperatura ambiente
816 colorbar; % Adiciona uma barra de cores ao gráfico para mostrar a
      correspondência entre a cor e a temperatura ambiente
817 xlabel('Energia Recebida no plano do painel (J)'); % Define o rótulo do
      eixo x
818 ylabel('Eficiência do Módulo no Solo(%)'); % Define o rótulo do eixo y
819 title('Energia Recebida pelo Painel no Solo x Eficiência do Módulo no
      Solo'); % Define o título do gráfico
820 grid on; % Adiciona uma grade ao gráfico
821
822 #####
823 %Gráfico de eficiências - Painel solo
824
825 G_t = (Ib.*cos(zen).*RRb + Id) .* A_p .* dt ./ 1000;
826 % Convertendo temperatura para Celsius
827
828 % Criando o gráfico scatter
829 figure(15); % Cria uma nova figura
830
831 scatter(G_t, eff_c_f, [], Tcel_ff-273, 'filled'); % A cor dos pontos é
      determinada pela temperatura ambiente
832 colorbar; % Adiciona uma barra de cores ao gráfico para mostrar a
      correspondência entre a cor e a temperatura ambiente
833 xlabel('Energia Recebida no plano do painel (J)'); % Define o rótulo do
      eixo x
834 ylabel('Eficiência do Módulo Flutuante (%)'); % Define o rótulo do eixo
      y
835 title('Energia Recebida pelo Painel Flutuante x Eficiência do Módulo
      Flutuante'); % Define o título do gráfico
836 grid on; % Adiciona uma grade ao gráfico
837
838 #####
839 %Diferença de eficiências
840 mean_eff_c = mean(eff_c);
841 std_eff_c = std(eff_c);
842
843 mean_eff_c_f = mean(eff_c_f);
844 std_eff_c_f = std(eff_c_f);
845
846 figure (16); % Cria uma nova figura
847 bar([1, 2], [mean_eff_c, mean_eff_c_f], 0.4); % Cria barras para as mé

```

```
    dias
848 hold on;
849
850 % Adicionando barras de erro
851 errorbar([1, 2], [mean_eff_c, mean_eff_c_f], [std_eff_c, std_eff_c_f], '
    .k');
852
853 % Configurações do gráfico
854 set(gca, 'xtick', [1, 2], 'xticklabel', {'Painel Fixo do Solo', 'Painel
    Flutuante'});
855 ylabel('Eficiência Média (%)');
856 title('Comparação da Eficiência Média entre Painel Fixo do Solo e Painel
    Flutuante');
857 hold off;
```

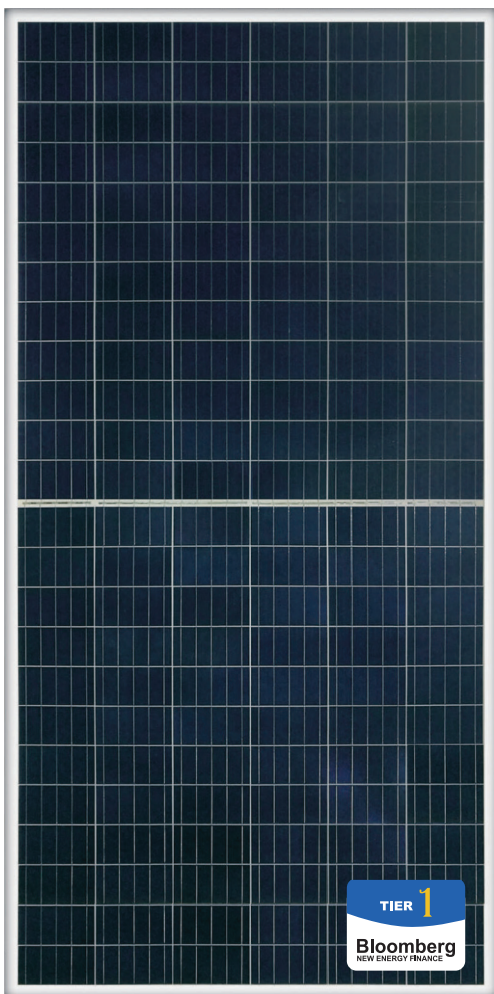
## A Anexos: Datasheet da placa solar utilizada no projeto.

# BYD

## POLICRISTALINO HALF-CELL

### PHK-36-SÉRIE-5BB

### 325-350W



- ▶ BYD325-PHK-36-5B
- ▶ BYD330-PHK-36-5B
- ▶ BYD335-PHK-36-5B
- ▶ BYD340-PHK-36-5B
- ▶ BYD345-PHK-36-5B
- ▶ BYD350-PHK-36-5B



#### Potência nominal

325-350W



#### Eficiência do módulo

até 17,71%



#### Tolerância positiva

de 0 a 5W



#### Garantia

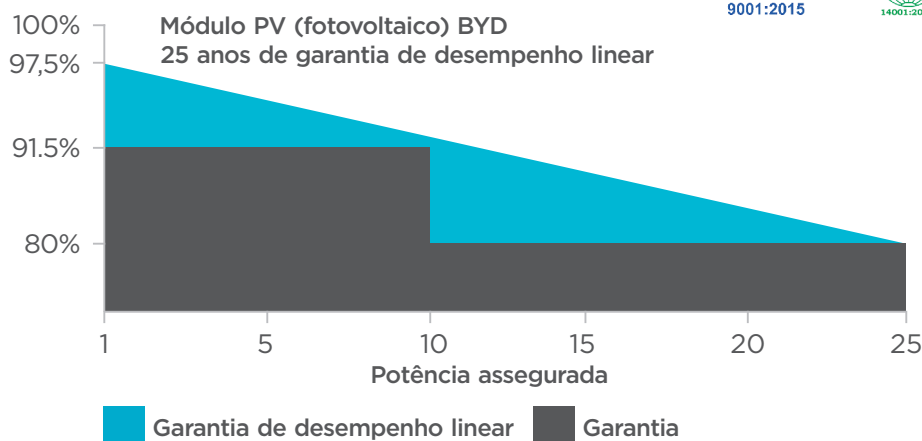
10 anos para o produto  
25 anos de desempenho linear



#### Aplicações

- ▶ Sistemas residenciais, comerciais, industriais e geração remota
- ▶ Aplicações on grid e off grid

\*imagem ilustrativa



**BYD:**  
Um sonho real

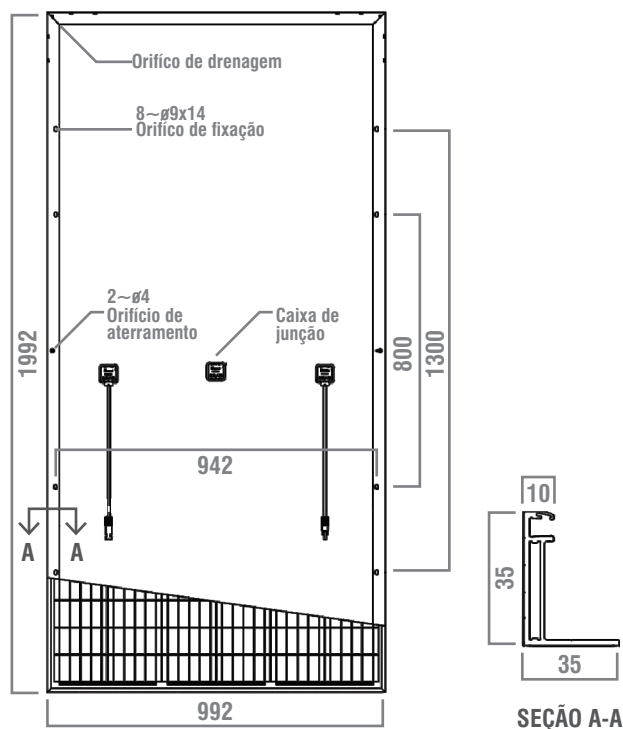
O sonho da BYD vai ao encontro do que a humanidade precisa: mudar a dependência humana de energias não renováveis para energia limpa. Nossa missão é ajudar países e pessoas a superarem a crise energética e reduzirem a poluição ambiental por meio da utilização de fontes renováveis de energia. Nossos sonhos verdes: usinas e fazendas solares, estações de armazenamento de energia, veículos elétricos e soluções de mobilidade urbana estão em pleno funcionamento, e atendem públicos de diversos segmentos, abrangendo aplicações residenciais, comerciais e industriais, de pequeno, médio e grande porte. Isso é um sonho? Esses são os "sonhos verdes" da BYD diariamente sendo transformados em realidade.

# BYD

## POLICRISTALINO HALF-CELL

### PHK-36-SÉRIE-5BB

# 325-350W



#### FICHA TÉCNICA

CÉLULA	156.75×78.40mm
NÚMERO DE CÉLULAS	144 (12×12) unidades
DIMENSÕES DO MÓDULO	1992mm×992mm×35mm
PESO	22.2kg
VIDRO FRONTAL	Vidro temperado de 3.2mm com revestimento AR
ESTRUTURA	Liga de alumínio anodizado
CAIXA DE JUNÇÃO	IP67(3 Diodos)
TIPO DE CONECTOR	Compatível com MC4
ÁREA DE SEÇÃO DO CABO	4,0mm <sup>2</sup> ×450mm

#### COEFICIENTES DE TEMPERATURA

COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	0.07% / °C
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO	-0.31% / °C
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DA POTÊNCIA DE PICO	-0.39% / °C

#### INFORMAÇÕES SOBRE A EMBALAGEM

EMBALAGEM	40' HQ
UNIDADES / PALLET	30
PALLET / CONTAINER	22
UNIDADES / CONTAINER	660

#### ESPECIFICAÇÃO ELÉTRICA

TIPO DE MÓDULO	325PHK-36	330PHK-36	335PHK-36	340PHK-36	345PHK-36	350PHK-36
POTÊNCIA MÁXIMA (P <sub>máx</sub> )	325Wp	330Wp	335Wp	340Wp	345Wp	350Wp
TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO (V <sub>oc</sub> )	44.94V	45.19V	45.44V	45.69V	45.94V	46.19V
CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO (I <sub>sc</sub> )	9.14A	9.20A	9.25A	9.31A	9.36A	9.42A
TENSÃO MÁXIMA DE FUNCIONAMENTO (V <sub>mp</sub> )	37.57V	37.83V	38.10V	38.36V	38.62V	38.87V
CORRENTE DE POTÊNCIA DE PICO (I <sub>mp</sub> )	8.65A	8.72A	8.79A	8.86A	8.93A	9.00A
EFICIÊNCIA DO MÓDULO	16.45%	16.70%	16.95%	17.21%	17.46%	17.71%
TEMPERATURA DE OPERAÇÃO	-40°C~85°C					
TENSÃO MÁXIMA DO SISTEMA	1500VDC					
VALOR NOMINAL DA CORRENTE MÁXIMA DO FUSÍVEL	15A					
SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO	Classe C					
TOLERÂNCIA DE SAÍDA DE POTÊNCIA	0-5W					
VENTO / CARGA DE NEVE	2400 Pa / 5400 Pa					

STC: IRRADIAÇÃO 1000W/m<sup>2</sup>, Temperatura do Módulo 25°C AM=1.5

\*A BYD reserva-se o direito de modificar projetos, características e parâmetros técnicos dos seus produtos a qualquer momento, sem aviso prévio, uma vez que os mesmos estão sujeitos a atualizações contínuas, com a missão de sempre oferecer produtos da mais alta qualidade.

#### BYD ENERGY DO BRASIL

Avenida Antonio Buscato, 230 - Campinas / São Paulo  
Brasil | CEP 13069-119 | Tel.: +55 19 3514-2550



[www.byd.com/br](http://www.byd.com/br) +55 19 3514.2550 vendas@byd.com

Versão 1.0.2019

