

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

Ariane Martins Caponi Lima

**BALANÇO DE ENERGIA EM PAINEL FOTOVOLTAICO – UM ESTUDO
EXPERIMENTAL**

Brasília – DF

2019

Ariane Martins Caponi Lima

**BALANÇO DE ENERGIA EM PAINEL FOTOVOLTAICO – UM ESTUDO
EXPERIMENTAL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas da Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Mario Siqueira

Brasília – DF

2019

Ariane Martins Caponi Lima

**BALANÇO DE ENERGIA EM PAINEL FOTOVOLTAICO – UM ESTUDO
EXPERIMENTAL**

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Mario Benjamim Baptista de Siqueira, Prof. Dr., UnB
(Orientador)

Antônio Cesar Pinho Brasil Junior, Prof. Dr., UnB
(Examinador interno)

Rafael Amaral Shayani, Prof. Dr., UnB
(Examinador externo)

Taygoara Felamino de Oliveira, Prof. Dr., UnB
(Examinador suplente)

Brasília, 06 de dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo apoio incondicional.

Aos amigos, pela ajuda e suporte.

Ao professor Mario Benjamim Baptista de Siqueira, pela orientação, apoio e confiança.

À Universidade de Brasília pela oportunidade de realizar o mestrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, num ambiente criativo e amigável.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Pela bolsa de estudos e auxílio financeiro.

Pelo suporte, dado pelo projeto de P&D ANEEL intitulado “HIBRIDIZAÇÃO DE FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COMO ALTERNATIVA TECNOLÓGICA DE REMEDIAÇÃO AMBIENTAL DE ÁREAS DEGRADADAS POR RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – ESTUDO DE CASO: ATERRO CONTROLADO DO JOCKEY CLUBE (LIXÃO DA ESTRUTURAL – BRASÍLIA-DF)” financiado pela CEB Geração S.A. e CEB Lajeado S.A. em parceria com a Secretaria de Meio Ambiente do Distrito Federal – SEMA.

Se nosso cérebro fosse tão simples a ponto de entendê-lo, seríamos tão tolos que continuaríamos sem entendê-lo.
Jostein Gaarder.

RESUMO

O uso da energia solar se mostra como uma alternativa para diminuir o consumo de combustíveis fósseis. Este trabalho tem o objetivo de realizar um balanço de energia, através dos parâmetros coletados de um aparato experimental e fazer uma análise térmica de um painel solar fotovoltaico. A importância de tal estudo reside no fato de que a eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica é função da temperatura da célula. A metodologia é baseada na coleta de dados em um projeto experimental, em que se mediu temperaturas dos componentes do painel. Construiu-se um painel fotovoltaico onde foram instalados termopares atrás das células solares, em cima do vidro e sob o backsheet para a medição de suas temperaturas. Os demais dados foram coletados através da estação meteorológica compacta e de dois piranômetros que mediram a temperatura ambiente, a velocidade do vento, a irradiância global horizontal e a irradiância global no plano inclinado com inclinação do painel, igual a latitude de Brasília virada para o Norte. Adicionalmente, uma estação solarimétrica próxima ao local dos experimentos, onde as componentes da radiação solar, a saber, irradiância global horizontal, irradiância direta normal e irradiância difusa foram medidos. Para registrar os dados de voltagem utilizou-se um circuito resistivo ligado diretamente ao datalogger. Três dias de medições foram coletados. Com os dados foi possível estudar os mecanismos de transferência de calor que ocorrem em um painel fotovoltaico durante o seu funcionamento em dias de céu claro. Os resultados demonstraram que, termicamente, os componentes têm dinâmicas diferentes, ou seja, para a determinação mais precisa da eficiência de um painel fotovoltaico se faz necessário a modelagem térmica do painel considerando seus componentes individualmente. Outra descoberta relevante é a inabilidade das formulações conhecidas para trocas de calor por convecção em capturar os fluxos entre o painel e atmosfera. Os resultados sugerem que as discrepâncias são devidas ao fato de ser o escoamento atmosférico turbulento em diversas escalas o que não é reproduzido nos experimentos nos quais tais relações foram baseadas. Sendo assim, estudos mais específicos são necessários para construção de relações mais adequadas.

Palavras-chave: Balanço de energia, Painel fotovoltaico, Eficiência de Conversão, Transferência de Calor.

ABSTRACT

The use of solar energy is an alternative to reduce the consumption of fossil fuels. This work aims to perform an energy balance, through the parameters collected from an experimental apparatus and to perform a thermal analysis of a photovoltaic solar panel. The importance of such a study lies in the fact that the efficiency of converting solar energy into electrical energy by a photovoltaic solar panel is a function of the cell's temperature. The methodology is based on data collection in an experimental project, in which temperatures of the panel components were measured. A photovoltaic panel was built where thermocouples were installed behind the solar cells, on top of the glass and underneath the backsheet to measure their temperatures. The other data were collected through the compact meteorological station and two pyranometers that measured the ambient temperature, the wind speed, the global horizontal irradiance and the global irradiance in the inclined plane with panel inclination, equal to Brasilia's latitude facing North. In addition, a solarimetric station near the site of the experiments, where the components of solar radiation, namely, horizontal global irradiance, normal direct irradiance and diffuse irradiance were measured. To record the voltage data, a resistive circuit connected directly to the datalogger was used. Three days of measurements were collected. With the data, it was possible to study the mechanisms of heat transfer that occur in a photovoltaic panel during its operation on clear days. The results showed that, thermally, the components have different dynamics. As a consequence, for the more precise determination of the efficiency of a photovoltaic panel, it is necessary to model the panel considering its components individually. Another relevant finding is the inability of known formulations for heat exchanges by convection to capture heat transfer between the panel and the atmosphere. The results suggest that the discrepancies are due to the fact that the atmospheric flow is turbulent at different scales, which is not reproduced in the experiments on which such relationships were based. Therefore, more specific studies are needed to build more appropriate relationships.

Keywords: Energy balance. Photovoltaic panel. Conversion Efficiency, Heat Transfer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Energia renovável brasileira - TWh, adaptado de BP (2019).....	17
Figura 2 – Curva padrão evidenciando uma constante solar de 1366,1 W/m ² e sua posição no espectro de irradiação eletromagnética, retirado de Kalogirou (2016)....	21
Figura 3 - Movimento anual da Terra em torno do Sol, adaptado de Kalogirou (2016).	22
Figura 4 - Variação anual da declinação solar, adaptado de Kalogirou (2016).....	23
Figura 5 – Ângulos solares, adaptado de Masters (2004).	24
Figura 6 - Variação do ângulo zenital em diferentes latitudes, considerando-se o dia de Equinócio e as 12h (passagem meridiana do Sol), retirado de Galvani (2016)....	27
Figura 7 - Junção P-N, retirado de Oliveira (2008).	29
Figura 8 - Circuito de uma célula fotovoltaica, retirado de Brasil Junior (2016).	29
Figura 9 - Componentes de um painel fotovoltaico, retirado de Portalsolar (2014). .	30
Figura 10 - Esquema mostrando os efeitos da radiação incidente, retirado de Prado e Kuga (2001).	35
Figura 11 - Moldura de alumínio.....	42
Figura 12 - Processos de soldagem	43
Figura 13 - Finalização do processo de montagem	44
Figura 14 - Suporte e o projeto finalizado.....	44
Figura 15 - Posições dos termopares nas células solares, respectivamente com vista frontal e traseira.	45
Figura 16 – Circuito resistivo.....	47
Figura 17 - Diagrama do aparato experimental.	49
Figura 18 - Aparato experimental montado para aquisição de dados	50
Figura 19 – Esquema detalhado dos tipos de energia em um painel fotovoltaico.....	51
Figura 20 - Relação entre valores medidos pelo Sonda - 2014 e estimados pelos modelos de Liu e Jordan (1960); Klucher (1979), Hay-Davies (1980) e Reindl et al. (1990) de irradiação global incidente em superfície horizontal.	60
Figura 21 - Comparação entre irradiância global horizontal (G) da estação solarimétrica e a do aparato experimental (gráfico a, ambas medidas) e a irradiância no plano inclinado (G_t) da estação solarimétrica (modelo de Reindl (1990)) e o medido no aparato experimental.....	61

Figura 22 - Irradiância durante a realização dos experimentos. Os dados de irradiância no plano do painel (G_t , linha laranja) foram medidos pelo piranômetro do aparato experimental. Os dados de irradiância direta normal (G_B , linha vermelha) e de difusa (G_D , linha azul) foram obtidas da estação solarimétrica em prédio adjacente.	63
Figura 23 - Velocidade do vento e direção do vento no período dos experimentos. Os ângulos são em relação ao Norte geográfico.....	64
Figura 24 - Temperatura do ar nos dias dos experimentos. As linhas horizontais marcam as temperaturas máximas nos dias 17, 18 de junho.....	65
Figura 25 - Temperaturas medidas dos componentes do painel, Vidro (gráfico a), Células (gráfico b) e Backsheet (gráfico c). Os termopares seguem a nomenclatura da Figura 15.	66
Figura 26 - Médias espaciais de temperatura (gráfico b) e irradiância incidente no plano inclinado G_t (gráfico a). Temperatura Média representa a temperatura média ponderada pela capacidade térmica de cada componente. As linhas horizontais no gráfico (a) marcam as temperaturas médias máximas nos dias 17, 18 de junho.....	67
Figura 27 - Irradiância global no plano do painel (G_t , gráfico a) e potência elétrica gerada pelo painel (PV, gráfico b).....	69
Figura 28 - Termos do balanço de energia (BE) para as células fotovoltaicas.	70
Figura 29 - Termos do balanço de energia para o backsheet.....	71
Figura 30 - Termos do balanço de energia para o vidro. O Resíduo representa o erro na equação do balanço de energia.....	72
Figura 31 - Comparação entre o termo convectivo e a diferença de temperatura da célula e do backsheet. A linha representa a reta do ajuste linear	74
Figura 32 - Termos do balanço de energia para o backsheet, mesmo que a Figura 29, mas com termo convectivo ajustado.	75
Figura 33 - Termos do balanço de energia para o vidro, mesmo que a Figura 30, mas com termo convectivo ajustado.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características entre o Sol e a Terra	23
Tabela 2 – Definições dos ângulos solares	24
Tabela 3 - Componentes do modulo solar e descrição dos materiais	41
Tabela 4 - Propriedades físicas dos materiais	45
Tabela 5 – Características geométricas	46
Tabela 6 - Descrição dos instrumentos.....	48
Tabela 7 - Coeficiente de correlação, coeficiente de determinação e a interpretação do tamanho de um coeficiente de correlação de modelos teóricos	61

LISTA DE SÍMBOLOS

\dot{Q}_{cond}	Fluxo de calor por condução	W
F'	Índice de claridade	
G_{Bn}	Irradiância direta normal	W/m ²
G_{Bt}	Irradiância direta em superfície inclinada	W/m ²
G_{Dt}	Irradiância difusa em superfície inclinada	W/m ²
G_{Gt}	Irradiância refletida do solo	W/m ²
G_t	Irradiância total em superfície inclinada	W/m ²
R_B	Fator de inclinação	
ρ_G	Albedo do solo	
A_s	Área da superfície	m ²
$F_{céu}$	Fator de forma do céu	
F_{sup}	Fator de forma da superfície	
G_B	Irradiância Normal Direta Horizontal	W/m ²
G_D	Irradiância Difusa Horizontal	W/m ²
G_H	Irradiância global horizontal	W/m ²
G_s	Constante solar	W/m ²
G_{sky}	Modelo de Brutsaert para ondas longas	W/m ²
L_{LOC}	Longitude do local	grau
L_{ST}	Longitude padrão	grau
L_c	Comprimento característico, no caso é o lado do painel	m
$L_{sol,terra}$	Distância entre o centro do sol e a Terra	km
$Nu_{nat,inf}$	Número de Nusselt para convecção natural para a superfície inferior com temperatura inferior à do ar	
$Nu_{nat,sup}$	Número de Nusselt para convecção natural para a superfície superior com temperatura superior à do ar	
\dot{Q}	Fluxos de calor por convecção, condução e/ou irradiância	W
R_T	Resistência a transferência de calor por condução	
T_∞	Temperatura no ambiente	K
T_a	Temperatura ambiente	K
T_s	Temperatura da superfície	K

T_s	Temperatura da superfície	K
T_{sol}	Temperatura do sol	K
\dot{W}	Potência	W
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura (taxa de variação da temperatura com a espessura)	K/m
d_{sombra}	Distância entre centros do painel e da sua sombra	m
e_0	Pressão de vapor	Pa
r_{sol}	Raio do sol	km
t_s	Tempo solar	min
t_{ST}	Tempo padrão	min
β_v	Coefficiente de expansão volumétrica	1/K
γ_s	Azimute	grau
θ_p	Ângulo de inclinação do painel	grau
θ_z	Zênite	grau
ΔT	Diferença de temperatura	K
A'	Índice de anisotropia	
G	Irradiância incidente sobre a atmosfera terrestre	W/m ²
h	Coefficiente de transferência de calor (por convecção)	W/m ² K
β	Ângulo de inclinação	grau
δ	Declinação solar	grau
ϕ	Latitude	grau
ω	Hora angular	grau
A	Área de transferência de calor	m ²
B	Função do dia do ano	grau
E_0	Correção da órbita	min
E	Energia total do sistema	J
L	Dimensão característica do problema	m
N	Dia do ano	dia
P	Potência gerada	W
Pr	Número de Prandtl;	
Ra	Número de Rayleigh em que g é a gravidade	
Res	Resistência equivalente do circuito resistivo	Ω
V	Tensão	V

c	Calor específico do material	J/kg.K
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
k	Condutividade térmica	W/m.K
m	Massa do sistema	kg
t	Tempo	s
ϕ	Latitude	grau
β	Inclinação	grau
δ	Declinação	grau
ε	Emissividade do material	
θ	Ângulo zenital	grau
ν	Viscosidade cinemática	m ² /s
σ	Constante de Stefan Boltzmann	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1.1	Posição do sol.....	21
3.2	Energia solar fotovoltaica	28
3.2.1	Célula solar	28
3.2.2	Modulo fotovoltaico.....	30
3.3	Transferência de calor em painéis solares	32
3.3.1	Modos de transferência.....	32
3.3.2	Propriedades radiativas.....	34
3.4	Balanco de energia	36
4	METODOLOGIA	37
4.1	Base de dados	37
4.2	Estimativa da irradiação solar	38
4.3	Painel Solar instrumentado.....	41
4.4	Aparato Experimental	46
4.5	Balanco de energia dos componentes do painel solar	50
4.5.1	Célula solar	55
4.5.2	Vidro	56
4.5.3	Backsheet.....	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1	Análise dos modelos de irradiação em superfície inclinada	59
5.2	Experimentos	62

5.2.1	Condições Experimentais	62
5.2.2	Temperaturas dos Componentes do Painel	65
5.3	Análise do balanço de energia	69
5.3.1	Balanço de energia	69
5.3.2	Ajuste do Termo Convectivo	73
6	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS	79
	APÊNDICE 1	83
	ANEXO A – Eficiência das células fotovoltaicas	85

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

A perspectiva do crescimento populacional mundial tem como consequência o aumento da demanda energética. Sob esse panorama, a produção de energia através do uso de fontes não renováveis torna-se prejudicial, pois elas são responsáveis, em grande parte, por danos diretos e indiretos ao meio ambiente e para a sociedade como um todo.

Uma das maneiras de gerar eletricidade de fonte renovável é através da radiação solar. O sol converte energia pelo processo termonuclear e transforma, em calor e radiação eletromagnética. O calor mantém a reação termonuclear e a radiação eletromagnética propaga-se no espaço, sendo somente uma fração muito pequena que atinge a Terra (GUNEY, 2016).

A energia solar renovável é subdividida de acordo com a sua utilização. Ela é proveniente na forma direta ou indireta do sol (GUNEY, 2016). A energia indireta é quando depende do sol de forma passiva através das marés, dos ventos, da biomassa, do ciclo hidrológico e até da absorção de radiação solar nas janelas das edificações. Denomina-se energia solar renovável direta quando há conversão em energia térmica, através de coletores/concentradores solares ou energia elétrica com o uso de painéis fotovoltaicos.

A conversão da energia solar em energia elétrica é realizada através do efeito fotovoltaico. A luz solar é composta por partículas denominadas de fótons, esses contêm uma quantidade de energia e ao atingirem uma célula fotovoltaica fornecem energia para os elétrons. Com essa energia, os elétrons mudam de sua posição original para uma barreira de potencial, que atua sobre esses elétrons para produzir uma diferença de potencial / uma corrente elétrica (PARIDA, INIYAN, & GOIC, 2011).

O Brasil apresenta uma elevada incidência de irradiação solar, insolação e elevada temperatura, principalmente na região próxima da linha do equador. Esse ambiente propicia um amplo desenvolvimento para a energia solar. Assim, a matriz energética brasileira de energia solar, entre 2017 e 2018, apresentou um crescimento de 387,5% como mostrado na Figura 1 (BP, 2019). Porém, o aumento da irradiação solar propicia um aumento da temperatura no Módulo fotovoltaico.

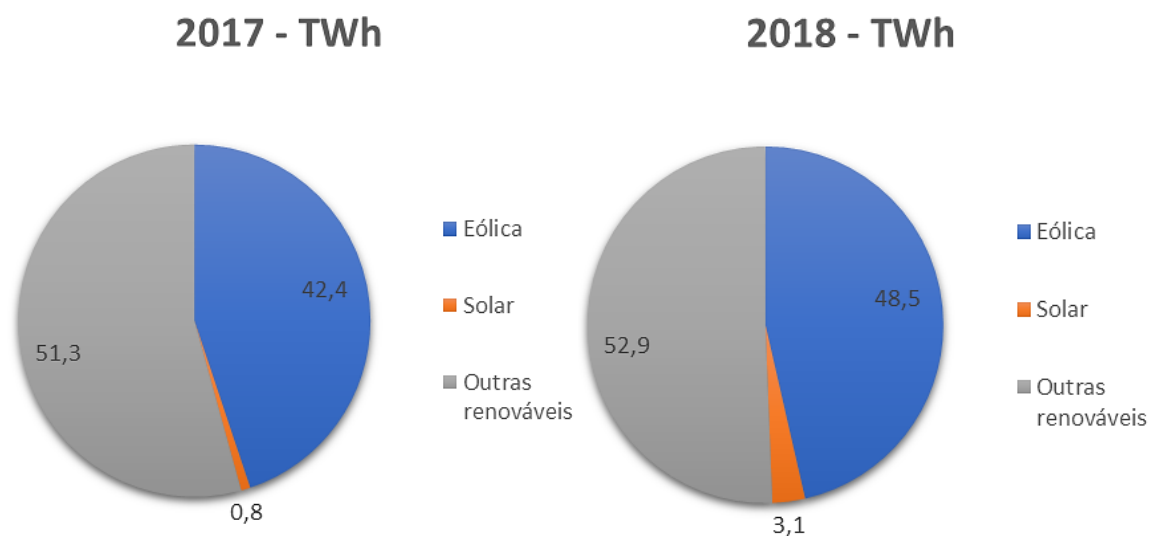


Figura 1 - Energia renovável brasileira - TWh, adaptado de BP (2019).

O aumento da temperatura operacional do painel fotovoltaico, é causado pelo calor residual gerado devido à absorção da irradiância solar, ou seja, a maior parte da energia absorvida é convertida em energia interna do próprio painel. O aumento da temperatura do painel provoca redução na tensão de saída e, conseqüentemente, sua potência e eficiência (RAZAK, et al., 2016).

Alguns pesquisadores utilizam um sistema híbrido PV/T, que além de gerar eletricidade, produz água ou ar quente, aproveitando a conversão da energia térmica de um painel PV. Na literatura, existem muitas relações do comportamento térmico de um sistema híbrido PV/T (TOFIGHI, 2013). Neste sentido, a remoção de calor tem dupla finalidade, manter a eficiência do painel em níveis aceitáveis e aproveitamento do calor para outra atividade em que ele seja requerido.

Assim, uma melhor compreensão do comportamento térmico de um painel fotovoltaico típico se faz necessário para desenvolvimento de modelos de conversão de radiação solar em energia elétrica por meio de fotovoltaico. Dentro deste cenário, determinam-se duas questões científicas:

- Quais os mecanismos de troca de energia são mais relevantes para modelagem de desempenho de painéis fotovoltaicos?
- Quais os termos do balanço de energia mais importantes para as estimativas de temperatura de operação de um painel fotovoltaico?

1.2 Objetivos

Com o intuito de elucidar em parte essas questões, o objetivo geral dessa dissertação é determinar os diversos termos do balanço de energia para cada componente.

Os objetivos específicos para se atingir o objetivo geral podem ser listados como:

- Projetar e construir um protótipo de painel fotovoltaico instrumentado, que permita medir as temperaturas dos componentes de painel fotovoltaico típico e dos forçamentos exógenos, tais como irradiância, temperatura do ar e velocidade do vento;
- Conceber um aparato experimental capaz de medir as variáveis necessárias para a estimativa dos diversos termos do balanço de energia;
- Realizar experimentos de campo para se determinar o comportamento térmico do painel.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O primeiro módulo de silício foi fabricado em 1955 com uma eficiência de 6%, pelo *Bell Laboratories*, depois da demonstração de um painel solar, usado para alimentar uma pequena roda gigante de brinquedo e um transmissor de rádio em 1954, marcando assim, o início do desenvolvimento e aperfeiçoamento da tecnologia de energia solar (GREEN, 2005). A partir de então, diversos pesquisadores se dedicaram a modelagem térmica de módulos fotovoltaicos. Alguns deles valem ser citados aqui para o posicionamento deste estudo neste contexto.

Fuentes (1987), derivou um modelo térmico de um balanço de energia. Ele considerou um módulo fotovoltaico como um único pedaço de material sólido a uma temperatura uniforme. O módulo recebe calor na forma de insolação, perde calor na forma de convecção para o ambiente, e irradiância para o céu e o solo. Apresentou análises do coeficiente convectivo na superfície do módulo, perda de calor na parte traseira do módulo, a velocidade do vento, a temperatura do céu, absorvidade, emissividade e a massa térmica do módulo.

Jones e Underwood, (2001), desenvolveu um modelo dinâmico de uma equação diferencial da variação da temperatura do módulo fotovoltaico com o tempo, de acordo com as condições climáticas. Envolveu-se os processos de irradiação, convecção e geração de energia. Esse modelo é mais preciso em condições de céu nublado com dados de séries temporais em intervalos curtos. Contudo, considera-se a temperatura de um módulo solar, não especificando cada componente de um painel fotovoltaico.

Armstrong e Hurley (2010), propôs um modelo térmico apresentando resultados experimentais, que verificaram o comportamento de um painel fotovoltaico para velocidades de ventos baixos a fortes sob condições atmosféricas variadas, efeitos da composição do material do módulo e estrutura de montagem. O modelo foi validado por medições da velocidade do vento, irradiância global, temperatura da superfície traseira e temperatura ambiente, para determinar a perda de calor por convecção e por radiação.

Bardhi, Grandi e Premuda (2011), desenvolveu um balanço de energia em estado estacionário, cujo objetivo, foi fornecer um equilíbrio térmico, para obter a temperatura operacional e os processos de troca de calor: irradiação (ondas curtas e longas), convecção e potência, para quatro casos diferentes, observando que a

irradiação de ondas longas possui uma maior contribuição entre o módulo e o céu, e com o aumento da irradiação solar incidente, a troca de convecção térmica aumenta.

Tofighi (2013), determinou um modelo térmico dinâmico para um painel fotovoltaico, com suas respectivas camadas do módulo fotovoltaico, sendo vidro, célula e vidro. Suas análises foram baseadas em um circuito elétrico, considerando a capacidade térmica dos materiais, a potência e as trocas de calor. Os dados de entrada foram a irradiação solar, a temperatura ambiente e a velocidade do vento.

Duffie e Beckman (2013) e Howell, Mengüç e Siegel (2016), apresentaram relações de absorvidade, transmissividade e refletividade na superfície de um coletor solar (vidro).

Brasil Junior (2016), desenvolveu um modelo térmico e elétrico, considerando a radiação, convecção e o efeito da inércia térmica. Apresentou uma comparação entre o modelo dinâmico e de estado estacionário.

Hammami, Torretti, *et al.* (2017), verificou o aumento das temperaturas nas células fotovoltaicas, estimando a temperatura das baterias acopladas na superfície da parte de trás do módulo fotovoltaico, propondo um balanço térmico de estado estacionário. A temperatura da célula foi considerada uniforme e as trocas térmicas entre as camadas do módulo fotovoltaico foram desconsideradas.

Jaszczur, Hassan, *et al.*(2018), avaliaram a distribuição de temperatura no módulo fotovoltaico sob diferentes condições ambientais. Foi considerado a geometria e os principais componentes de transferência de calor.

Ghosh, Sundaram e Mallick (2018), analisaram o desempenho térmico e elétrico de vidros semitransparente PV-vácuo à base de silício multicristalino, material que reduz o ganho de calor. O balanço de energia foi desenvolvido para o vidro e para a célula, considerando a absorção, reflexão e transmissão.

Diante disso, espera-se adicionar aos estudos citados, principalmente as análises feitas por Fuentes (1987), Tofighi (2013), Duffie e Beckman (2013) e Hammami, Torretti, *et al.* (2017), mais informações a respeito do comportamento térmico de painéis, avaliando através de medição de temperaturas dos componentes e os forçamentos externos, quais termos do balanço de energia para cada componente são mais relevantes a serem considerados em modelos para a simulação operacional de painéis fotovoltaicos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1.1 Posição do sol

Para as aplicações em energia, a irradiação solar é aquela emitida entre 0,15 μm e 3,0 μm , ou seja, compreende nas faixas do espectro ultravioleta, visível (entre 0,38 μm e 0,72 μm) e infravermelho. A irradiação térmica é a transmissão que depende da temperatura, sendo compreendida entre 0,2 μm e 1000 μm , como mostrada na Figura 2. A irradiação solar tem um espectro que se aproxima a de um corpo negro (absorve e emite o máximo de irradiação) a uma temperatura efetiva de 5777 K (DUFFIE & BECKMAN, 2013).

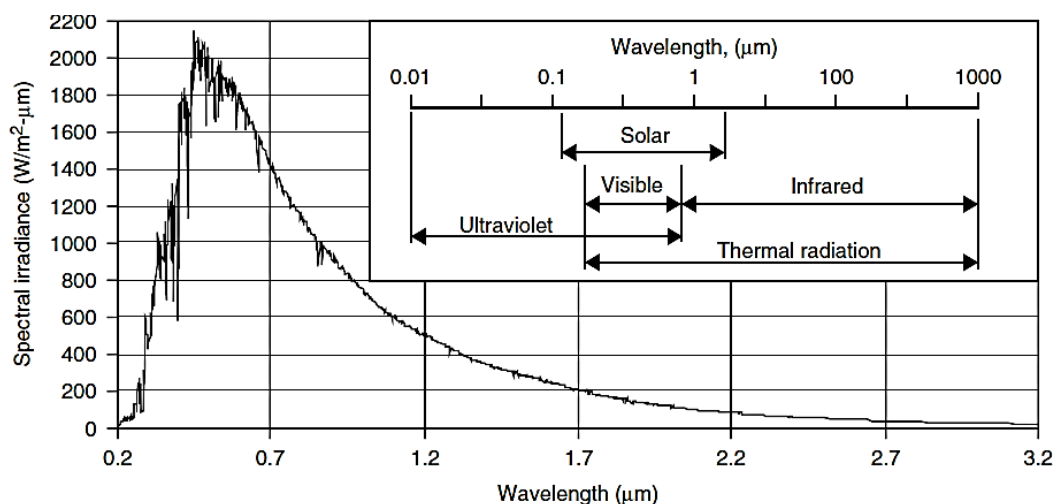


Figura 2 – Curva padrão evidenciando uma constante solar de 1366,1 W/m² e sua posição no espectro de irradiação eletromagnética, retirado de Kalogirou (2016).

É denominado como constante solar a energia do sol incidente na atmosfera da Terra, ou seja, essa energia é expressa pelo fluxo de irradiação luminosa em uma superfície perpendicular, acima da atmosfera. Pode ser estimada pela equação (1) (GÓMEZ, CARLESSO, VIEIRA, & SILVA, 2018).

$$G_s = \sigma \cdot T_{sol}^4 \cdot \left(\frac{r_{sol}}{L_{sol,terra}} \right)^2 \quad (1)$$

Onde,

G_s = Constante solar [W/m^2];

σ = Constante de Stefan Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$);

T_{sol} = Temperatura do sol [K];

$L_{sol,terra}$ = Distância entre o centro do sol e a Terra [km];

r_{sol} = Raio do sol [km].

A energia solar na atmosfera varia através de uma órbita elíptica durante o ano, ou seja, o movimento anual da Terra em torno do sol é caracterizado pelo movimento de translação, essa variação representa as estações do ano, a Figura 3, mostra a órbita elíptica da Terra (KALOGIROU, 2016).

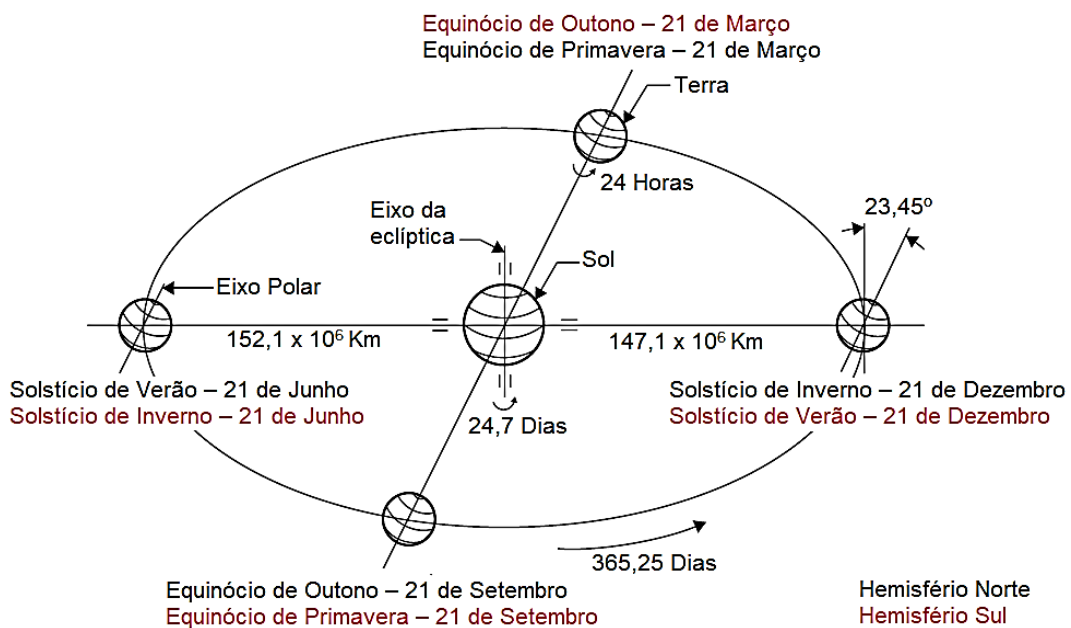


Figura 3 - Movimento anual da Terra em torno do Sol, adaptado de Kalogirou (2016).

Para determinar a constante solar é necessário verificar as características entre o Sol e a Terra. Como a distância entre o Sol e a Terra varia ao longo do ano, geralmente é utilizado uma média entre as distâncias dos solstícios. Na Tabela 1 é representado o raio do sol, a média da distância entre o Sol e a Terra e a temperatura efetiva do Sol. A constante solar calculada é de 1367 W/m^2 , substituindo os valores da Tabela 1 na equação (1).

Tabela 1 – Características entre o Sol e a Terra

	Características
Raio do sol	696 000 km
Distância entre o centro do sol e a Terra	149 600 000 km
Temperatura do sol	5777 K

Fonte: (ClassAction Tables List, 2019)

Outro fator que influencia a quantidade de energia incidente na Terra de acordo com a posição é a sua declinação. A declinação da Terra é ocasionada pelo seu eixo, que inclina-se com $23,45^\circ$, é uma distância angular em relação ao norte do equador e os raios do sol. No solstício a declinação representada é de $23,45^\circ$ e no equinócio é de 0° (KALOGIROU, 2016), como mostrado na Figura 4.

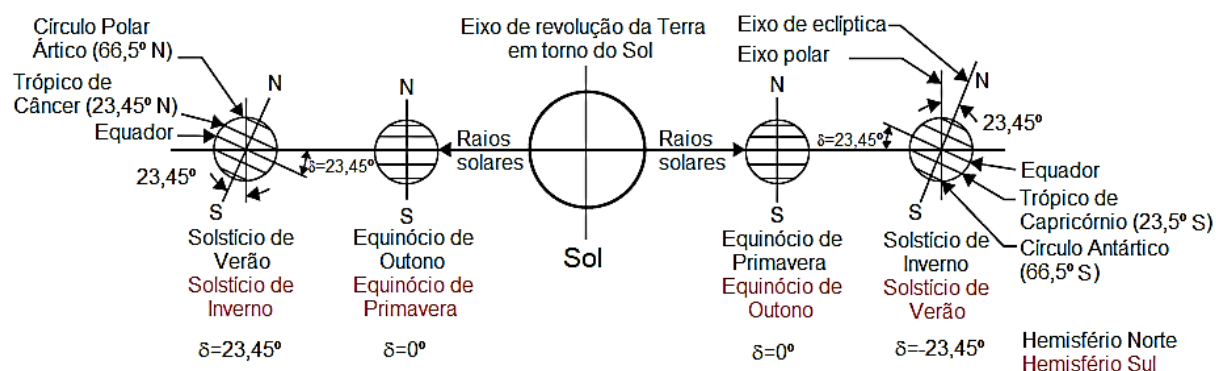


Figura 4 - Variação anual da declinação solar, adaptado de Kalogirou (2016).

As relações geométricas, entre uma superfície e a irradiação incidente, foram determinadas através de ângulos (DUFFIE & BECKMAN, 2013), ou seja, para determinar a posição do sol é preciso considerar a posição dos ângulos solares, que caracterizam a trajetória dos raios solares. Os ângulos são descritos na Tabela 2 e na Figura 5, é caracterizado os ângulos solares.

Tabela 2 – Definições dos ângulos solares

Ângulo	Definição
ϕ	Latitude
δ	Declinação
β	Inclinação
ω	Hora angular
θ_z	Zênite
α_s	Altitude solar
γ_s	Azimute

Fonte: DUFFIE e BECKMAN, 2013

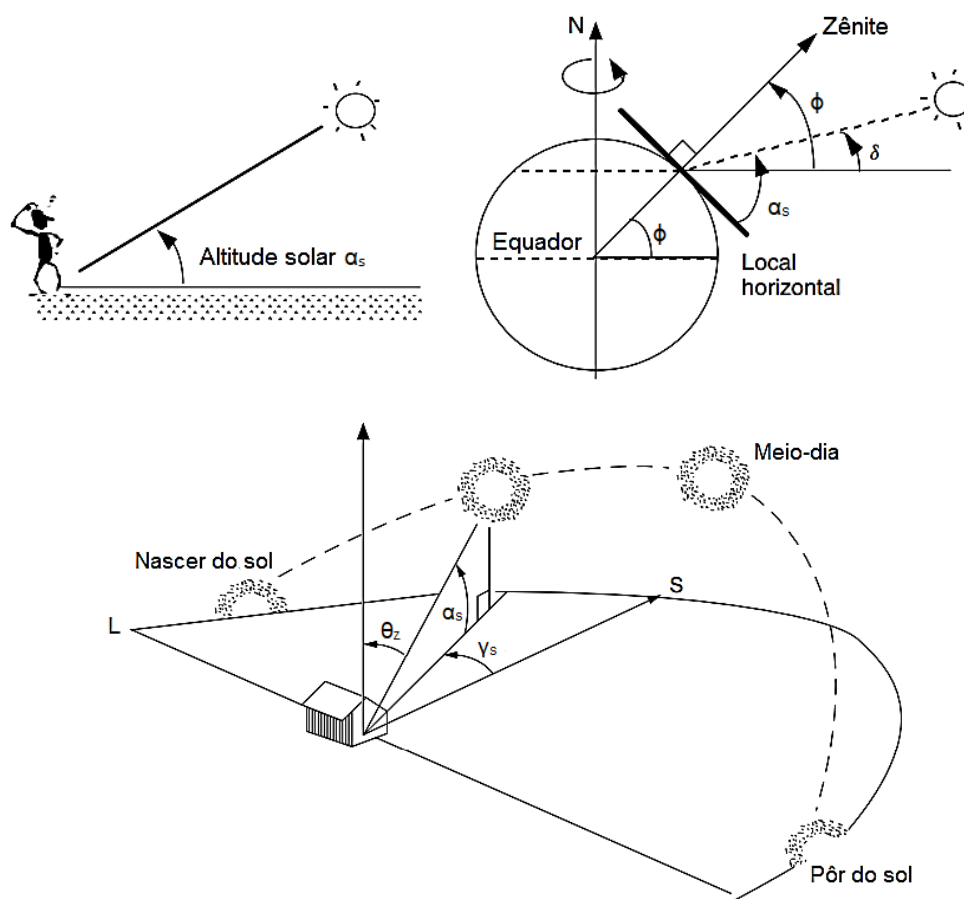


Figura 5 – Ângulos solares, adaptado de Masters (2004).

Os passos para determinar os elementos da posição do sol pode ser descrito como: posição do observador, tempo solar, declinação, zênite e azimute.

- Posição do observador: É determinado pelas características do local, como a latitude e a longitude.
- Tempo solar: O tempo solar é determinado para indicar a hora do dia. “... é o número de horas antes ou depois do meio dia solar (quando o sol está diretamente sobre o meridiano local)” (MASTERS, 2004, p. 396, tradução do autor).

Kalogirou (2016) afirma que:

Nos cálculos de energia solar, o tempo solar aparente (TSA) deve ser utilizado para expressar a hora do dia. O TSA se baseia no movimento angular aparente do Sol no céu. O momento em que o sol cruza o meridiano do observador consiste no meio-dia solar local. Ele geralmente não coincide com as 12 h de uma localidade. Para converter o tempo padrão local (TPL) para TSA, duas alterações são aplicadas: a equação do tempo (ET) e a correção da longitude (KALOGIROU, 2016, p. 54).

Na equação (2) determina-se o tempo solar, a equação (3) a correção da órbita e a equação (4) a função do dia do ano (KALOGIROU, 2016).

$$t_s = t_{ST} + 4 * (L_{ST} - L_{LOC}) + E_o \quad (2)$$

$$E_o = 9,87 * \text{sen}2B - 7,53\text{cos}B - 1,5\text{sen}B \quad (3)$$

$$B = \frac{(N - 81) * 360}{364} \quad (4)$$

Onde,

t_s = Tempo solar [min];

t_{ST} = Tempo padrão [min];

L_{ST} = Longitude padrão [grau];

L_{LOC} = Longitude do local [grau];

E_o = Correção da órbita [min];

B = Função do dia do ano [grau];

N = Dia do ano [dia].

A hora angular pode ser determinada pela equação (5) (KALOGIROU, 2016).

$$\omega = (t_s - 12) * 15^\circ \quad (5)$$

Onde,

ω = Hora angular [grau].

- Declinação: É a posição angular do sol. Pode ser determinada através da equação (6) (DUFFIE & BECKMAN, 2013) (KALOGIROU, 2016).

$$\delta = 23,45 * \text{sen} \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (6)$$

Onde:

δ = Declinação [grau].

- Zênite e azimute: O zênite é o ângulo entre o raio solar e a superfície. O azimute é a projeção do raio solar com o plano horizontal. Pode ser determinado através das equações (7) e (8) (DUFFIE & BECKMAN, 2013) (KALOGIROU, 2016).

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen} \delta \text{sen} \phi \quad (7)$$

$$\text{sen} \gamma_s = \frac{\cos \delta \text{sen} \omega}{\cos (90 - \theta_z)} \quad (8)$$

Onde,

θ_z = Zênite [grau];

ϕ = Latitude [grau];

γ_s = Azimute [grau].

A variação do zênite influencia na quantidade de energia recebida. Na Figura 6, observa-se a variação do ângulo zenital em diferentes latitudes. Para um ângulo zenital igual a 0°, como apresenta-se perto do equador e nos trópicos, a área recebe 100% a quantidade máxima de energia possível. E assim, com um ângulo zenital de 30° a superfície recebe aproximadamente 50% de luz solar em uma área, pois os raios solares estão espalhados por uma área maior. O cálculo do zênite solar é importante para determinar as irradiações incidentes no local estudado.

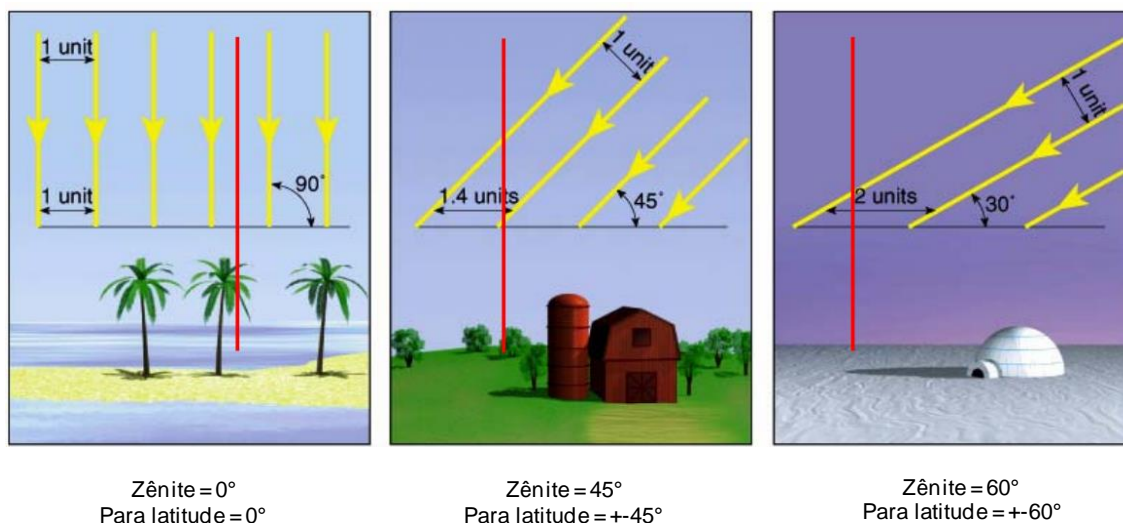


Figura 6 - Variação do ângulo zenital em diferentes latitudes, considerando-se o dia de Equinócio e as 12h (passagem meridiana do Sol), retirado de Galvani (2016).

Ao atravessar a atmosfera terrestre, a irradiação solar que não foi absorvida por agentes presentes, como por exemplo ozônio, água, CO₂, particulados, dentre outros (BARBOSA, 2014), é decomposta em direta e difusa. A radiação direta é a parte da radiação solar que atinge a superfície da terra, sem ser absorvida ou dispersa. Já a radiação difusa é aquela que atinge a superfície oriunda de todas as direções após sofrer o processo de espalhamento.

A irradiância global horizontal é dada pela soma das irradiações difusa e direta no plano horizontal, dado na equação (9):

$$G_H = G_D + G_B \cdot \cos\theta \quad (9)$$

Onde,

G_H = Irradiância global horizontal [W/m²];

G_D = Irradiância Difusa Horizontal [W/m²];

G_B = Irradiância Normal Direta Horizontal [W/m²];

θ = Ângulo zenital [grau].

Os modelos para a estimativa da irradiação solar em superfície horizontal e inclinada podem ser encontrados na literatura, como os descritos por Kalogirou (2016). Para céu claro, Hottel (1976) empregou um modelo de transmitância para

irradiação direta normal e difusa, que dependem intrinsecamente do ângulo zenital, descrito anteriormente, no cálculo de G_H . Ele estabeleceu coeficientes empíricos para a transmitância da irradiação direta através de fatores de correções pela altitude do local em relação ao nível do mar. A transmitância da irradiação difusa é função da transmitância da irradiação direta. Assim, a irradiação global em superfície horizontal é determinada através das transmitâncias, do ângulo zenital e da irradiação solar extraterrestre.

Porém, os coletores solares normalmente não são instalados horizontalmente, mas sim em um ângulo que otimiza a radiação interceptada e reduza as perdas de reflexão ao longo do ano. Sendo assim, existe a necessidade de modelos com capacidade de converter a irradiância global horizontal em irradiância no plano inclinado. O modelo teórico para céu isotrópico é de Liu e Jordan (1960) e os anisotrópicos são baseados em Klucher (1979), Hay-Davies (1980) e Reindl et al. (1990), que apresentam correções em função do ângulo de inclinação de um painel fotovoltaico.

3.2 Energia solar fotovoltaica

3.2.1 Célula solar

A energia solar é captada e convertida, para energia elétrica pelas células fotovoltaicas. As células fotovoltaicas são compostas por materiais semicondutores modificados que criam um campo elétrico. A eficiência de cada célula fotovoltaica depende do tipo de tecnologia utilizada (CGEE, 2010).

As tecnologias empregadas são: Células de Heterojunção (HJT); Células de Silício cristalino, que podem ser de Silício monocristalino (mono-Si) e de Silício policristalino (multi-Si); Células de filme fino (Thin-Film) de Índio e Gálio (CIGS), Telureto de Cádmio (CdTe) e Semicondutores Orgânicos. Padrões de eficiência de células fotovoltaicas de diversas tecnologias são mostradas no ANEXO A – Eficiência das células fotovoltaicas (NREL, 2019).

O processo de conversão de radiação solar em energia elétrica ocorre a partir da excitação dos elétrons da banda de valência para a banda de condução de um semicondutor P-N, provocada pelos fótons contidos na luz solar ao atingir a célula. Ou seja, ocorre na união dos materiais que produz um semicondutor P-N, em que se

forma um deslocamento de elétrons para a região N e as lacunas para a região P, gerando um campo elétrico interno (V_0) na presença da luz solar, como mostra na Figura 7 (OLIVEIRA, 2008).

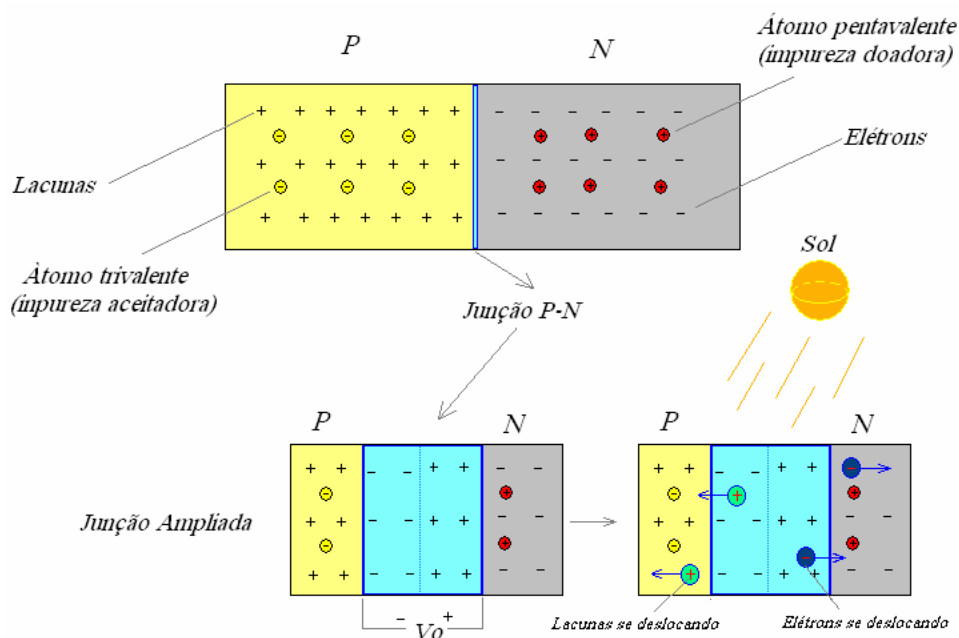


Figura 7 - Junção P-N, retirado de Oliveira (2008).

Segundo Oliveira (2008, pag. 37), “se um fio for ligado a este dispositivo, haverá um fluxo de corrente elétrica, chamado de fotocorrente. Sua intensidade é proporcional à irradiância que incidir sobre a junção”. A célula fotovoltaica é analisada através de um circuito como mostrado na Figura 8.

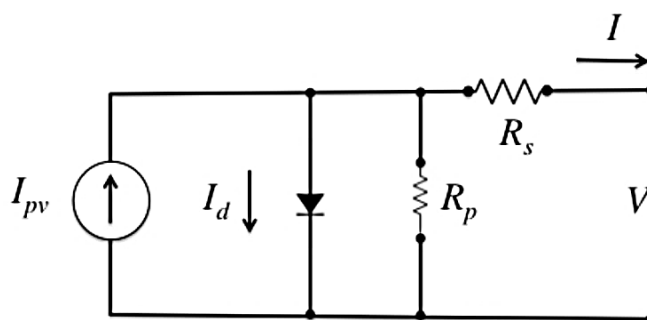


Figura 8 - Circuito de uma célula fotovoltaica, retirado de Brasil Junior (2016).

A potência gerada por um painel fotovoltaico está relacionada com a quantidade de irradiação incidente e a temperatura. A potência de saída decresce com o aumento da temperatura, mas aumenta com o aumento da irradiação incidente. A tensão diminui com a temperatura e a corrente aumenta variando linearmente com a irradiação incidente (vide apêndice 1).

3.2.2 Módulo fotovoltaico

As células são agrupadas em série ou em paralelo para formar um módulo fotovoltaico. Os módulos fotovoltaicos são fabricados a partir de componentes básicos que auxiliam em uma determinada função e montados na forma de um “sanduiche”, como mostrado na Figura 9. A seguir, são apresentadas as especificações de cada componente.

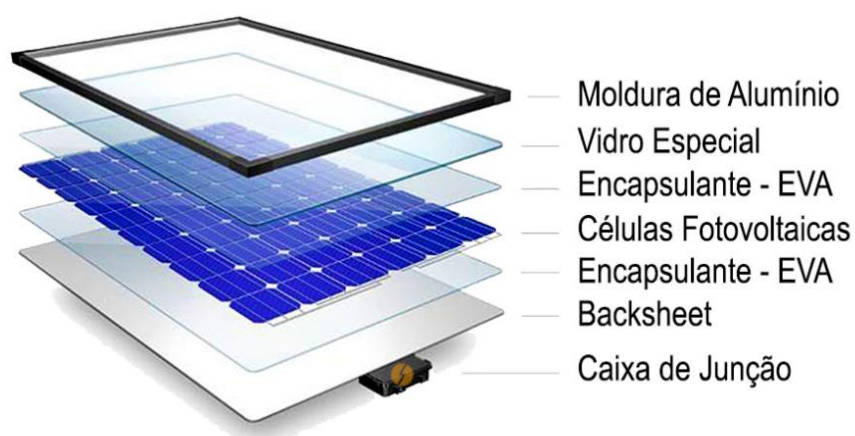


Figura 9 - Componentes de um painel fotovoltaico, retirado de Portalsolar (2014).

- Moldura, que suporta todo o conjunto, protege contra as intempéries, e para evitar trincas nas células, ocasionadas pela “torção” do painel. Uma alternativa que atende a esses requisitos é o uso de uma estrutura de alumínio extrudado, pois apresenta um menor custo e flexibilidade em comparação com a estrutura de aço. Essa sendo resistente a ferrugem e corrosão, fácil instalação e menor custo durante a sua vida útil (HYDROSOLAR, 2012).

- Vidro, oferece resistência, rigidez, transmissividade e baixo custo. Porém para a energia solar é necessário um vidro especial com baixo teor de ferro, cuja função é reduzir a reflexão e maximizar a transmissão dos raios solares, ou seja, é um vidro temperado revestido com uma substância antirreflexiva. A transmissividade de um vidro comum é de cerca de 85% e um vidro com baixo teor de ferro pode estar acima de 91%. Esse tem um alto custo de fabricação, no entanto, o aumento da transmissividade compensa o aumento de seu valor (BURROWS & FTHENAKIS, 2015).
- Encapsulante de EVA, que significa acetato-vinilo de etileno (que deriva do inglês: *Ethylene Vinyl Acetat*), é um material que protege as células fotovoltaicas, possui excelente durabilidade contra temperatura e umidade; impede a perda de radiação nos módulos, com propriedades encapsulantes e de alta flexibilidade; de alta aderência ao vidro, célula e verso; excelente transmissão e transparência; ou seja, é especificamente projetado para os painéis fotovoltaicos (CHEN, PENG, CHO, & PORTER, 2015).
- Células fotovoltaicas, cuja função é converter a energia solar captada para energia elétrica. É a parte principal de um painel fotovoltaico. Esse processo requer um material que aumente a eficiência do módulo solar, como foi discutido anteriormente (BAGHER, VAHID, & MOHSEN, 2015).
- Backsheet, é um “filme branco de plástico grosso” que vai na parte de trás do painel solar, sua função é proteger os componentes internos e agir como um isolante elétrico para proteger as baterias (MATSUNAGA, ITO, SHIROKURA, KAWASHIMA, & MAKINO, 2016).
- Caixa de junção, fica na parte de trás do painel solar, é onde estão conectados eletricamente.

3.3 Transferência de calor em painéis solares

3.3.1 Modos de transferência

A transferência de calor ocorre quando há um diferencial de temperatura e cessa quando os meios atingiram um equilíbrio térmico. Existem três modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação (INCROPERA, DEWITT, BERGMAN, & LAVINE, 2008).

A condução é a transferência de energia entre uma região de alta temperatura para a de baixa temperatura, através de um gradiente que é proporcional por uma unidade de área. A taxa de condução depende do tipo de material, geometria, espessura e diferença de temperatura na qual o meio está submetido. A lei de Fourier, equação (10) em sua forma diferencial descreve a transferência de calor por condução (HOLMAN, 2010):

$$\dot{Q}_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (10)$$

Onde,

\dot{Q}_{cond} = Fluxo de calor por condução [W]

k = Condutividade térmica [W/m.K];

A = Área de transferência de calor [m²];

$\frac{dT}{dx}$ = Gradiente de temperatura (taxa de variação da temperatura com a espessura) [K/m].

É comum em problemas de transferência de calor por condução através de uma superfície sólida, o uso da analogia a circuito elétrico, obtida pela integração da equação (11), entre os dois lados de uma parede. Neste caso, a diferença de potencial é representada pela diferença de temperatura e a corrente pelo fluxo:

$$\Delta T = R_T \cdot \dot{Q}_{cond} \quad (11)$$

Onde,

ΔT = Diferença de temperatura entre os lados da superfície [K]

R_T = Resistência a transferência de calor por condução, $R_T = \frac{d}{k.A}$, d é a espessura da parede.

A convecção envolve a condução e um movimento de um fluido, ou seja, é a transferência entre uma superfície sólida e um fluido (líquido ou gasoso), ou dois fluidos com uma diferença de temperatura. Quanto maior a velocidade do movimento, maior será a transferência de calor. A convecção é classificada em convecção natural ocasionados pela estratificação da densidade, decorrentes da variação da temperatura do fluido; e convecção forçada, quando o movimento do fluido é por um meio externo (HOLMAN, 2010). A taxa de convecção é expressa pela lei de Newton do resfriamento, na equação (12):

$$\dot{Q}_{conv} = h.A_s.(T_s - T_\infty) \quad (12)$$

Onde,

h = Coeficiente de transferência de calor (por convecção) [W/m²K];

A_s = Área da superfície [m²];

T_s = Temperatura da superfície [K];

T_∞ = Temperatura no ambiente [K].

Como mencionado, dois mecanismos de transferência de calor por convecção, com características dinâmicas distintas, são possíveis, por convecção natural ou forçada. No primeiro, o movimento do fluido é consequência de diferença de densidade (empuxo térmico) gerada pela própria transferência de calor por convecção. Já, na convecção forçada o movimento é causado por fatores externos, tal ventilador ou escoamento atmosférico. O coeficiente de transferência de calor reflete essas diferenças e é estimado através do número de Nusselt (Nu) definido pela equação (13):

$$Nu = \frac{h.L}{k} \quad (13)$$

Onde,

L = dimensão característica do problema [m].

Diversas relações para o Nu em função de outros números adimensionais que caracterizam cada problema, a saber, número de Prandtl, Reynolds, Rayleigh e Grashof, são propostas na literatura. As relações de interesse para as situações típicas em painéis fotovoltaicos serão apresentadas no capítulo 4 desta dissertação, onde a Metodologia é descrita.

A radiação térmica é a propagação da radiação eletromagnética com uma diferença de temperatura. Emite energia a uma taxa proporcional a quarta potência da temperatura absoluta e diretamente proporcional a área de sua superfície (HOWELL, MENGÜÇ, & SIEGEL, 2016), como mostrado na equação (14).

$$\dot{Q}_{emit. max} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \quad (14)$$

Onde,

ε = Emissividade do material;

σ = Constante de Stefan Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$);

A_s = Área da superfície [m²];

T_s = Temperatura da superfície [K];

3.3.2 Propriedades radiativas

Para efeito ilustrativo, considera-se um módulo fotovoltaico como um único pedaço de material sólido, como mostrado na Figura 10. O módulo recebe energia na forma de radiação incidente, desta, uma parte é refletida e emitida, respectivamente, pela superfície e pelo corpo do material para o meio ambiente. Uma outra parte é absorvida através das características físicas do material. Porém, um componente da energia é transmitido através das superfícies (HOLMAN, 2010).

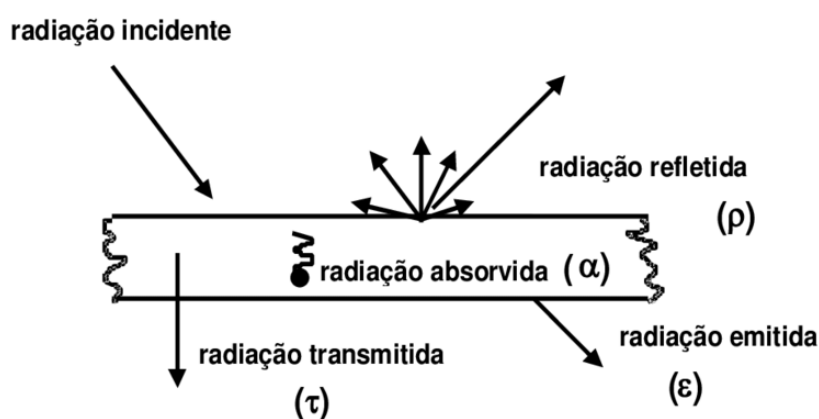


Figura 10 - Esquema mostrando os efeitos da radiação incidente, retirado de Prado e Kuga (2001).

A emissividade e absorvidade são consideradas propriedades de superfície (HOWELL, MENGÜÇ, & SIEGEL, 2016). A emissividade é a razão da emissão de radiação por um corpo em relação a radiação emitida de um corpo negro. E absorvidade é uma parte da radiação que é absorvida por esse corpo (HOLMAN, 2010).

A refletividade depende do ângulo de incidência da radiação ao atingir a superfície e da direção da energia. Existem dois fenômenos de reflexão que são chamados de especular, quando o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, e difuso, quando a energia é distribuída em todas as direções (DUFFIE & BECKMAN, 2013) (HOLMAN, 2010).

A transmissividade é uma parte da radiação que é transmitida através das superfícies, sendo diretamente relacionada com a refletividade. Quando a radiação atravessa uma superfície, a radiação transmitida pode retornar por refletividade em uma superfície próxima (HOWELL, MENGÜÇ, & SIEGEL, 2016).

Segundo Duffie e Beckman (2013), a transmissão, a reflexão e a absorção da radiação solar através dos componentes de um painel fotovoltaico são importantes para determinar o seu desempenho.

3.4 Balanço de energia

O balanço de energia aplicada a sistemas, que no presente estudo são os componentes de um painel fotovoltaico, é regido pela 1ª Lei da termodinâmica. Na ausência de trocas de massa, a equação de balanço de energia é dada pela equação (15):

$$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{Q} - \sum \dot{W} \quad (15)$$

Onde,

t = Tempo [s];

E = Energia total do sistema [J];

\dot{Q} = Fluxos de calor por convecção, condução e/ou radiação [W]

\dot{W} = Potência [W]

Vale esclarecer que a potência é trabalho por unidade de tempo, e pode ser, por exemplo, de eixo, de fronteira ou elétrica. No problema aqui estudado, este termo é restrito a potência elétrica. Na equação (15), é adotada uma convenção de que calor transferido para o sistema é positivo e vice-versa. Já para potência, o inverso é assumido, o trabalho exercido pelo sistema é positivo.

O termo transiente, termo do lado esquerdo na equação (16), representa a variação da energia no sistema ao longo do tempo. Para sistemas incompressíveis, no caso dos componentes de painel solar (por serem sólidos), é dado por:

$$\frac{dE}{dt} = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (16)$$

Onde,

m = Massa do sistema [kg];

c = Calor específico do material [J/kg.K].

4 METODOLOGIA

Para se atingir os objetivos delineados, o trabalho desenvolvido nessa dissertação foi dividido em duas etapas. A primeira constitui em se verificar modelos de conversão de irradiância horizontal para o plano do painel (inclinado). Para tal, utilizou-se dados do sistema SONDA para a comparação entre diferentes modelos que fazem a conversão. O modelo de melhor desempenho foi então utilizado para se verificar a consistência entre os dados de irradiância solar medidos nos experimentos (descritos a seguir) e uma estação solarimétrica em local adjacente. Em uma segunda etapa, medidas de temperatura e forçamentos ambientais foram realizadas em um aparato experimental que inclui um protótipo de um painel solar construído no próprio Laboratório de Energia e Ambiente. Os dados obtidos foram usados para análise do comportamento térmico de um painel fotovoltaico através de considerações a respeito da variação temporal e espacial da temperatura dos componentes do protótipo e dos seus balanços de energia.

4.1 Base de dados

O local de testes do experimento foi realizado em Brasília-DF. Brasília apresenta um clima tropical de altitude, característico de planaltos e serras, a região tem regime de precipitação bem definido. A estação chuvosa tem início em outubro e estende-se até março. A estação seca acontece no restante do ano, desde abril até setembro (SONDA, 2018).

A base de dados foi fundamentada no Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA), para as análises dos modelos teóricos de irradiação. Foram coletados em janeiro de 2014 a dezembro de 2014 na estação de Brasília, em Brasília, DF (15° 36' 03" S, 47° 42' 47" O, 1023 m).

Está disponível também, os dados de uma estação solarimétrica completa instalada no Laboratório de Energia e Ambiente na Universidade de Brasília, de onde foram coletados no dia 17 de junho, 18 de junho e 28 de agosto de 2019 para validar os componentes da irradiação global.

E por fim, a utilização dos dados coletados pelo projeto experimental nos testes do dia 17 de junho, 18 de junho e 28 de agosto de 2019, a fim de verificar as variações das variáveis do balanço de energia.

4.2 Estimativa da irradiação solar

Painéis fotovoltaicos são instalados com um ângulo de inclinação em relação a horizontal. Essa estratégia tem duas finalidades. Uma delas é para minimizar perdas de eficiência devido ao acúmulo de poeira na superfície superior, que podem ser significativas (FRONTIN, BRASIL JR, CARNEIRO, & GODOY, 2017). A inclinação do painel, além de reduzir a deposição de particulados, ainda potencializa a lavagem do painel pela ação da água da chuva. A segunda, e mais relevante, é a maximização da geração de energia anual. Para tal, a regra geral, apesar de não ser oriunda de otimização matemática nem para céu claro, é a instalação de painéis com inclinação correspondente a latitude local voltada para o hemisfério oposto. Como as medidas mais comuns de irradiação são na posição horizontal, modelos de transformação de irradiação global horizontal em irradiação global no plano inclinado se torna relevante.

Como mencionado anteriormente, a radiação solar pode ser dividida em Irradiância Direta Normal e Irradiação Difusa Horizontal. A Irradiância Global Horizontal é dada pela Eq. (9) como a soma das energias difusa e direta e a Irradiância global em superfície inclinada é dada pela equação (17).

$$G_t = G_{Bt} + G_{Dt} + G_{Gt} \quad (17)$$

Onde,

G_t = Irradiância total em superfície inclinada [W/m²];

G_{Bt} = Irradiância direta em superfície inclinada [W/m²];

G_{Dt} = Irradiância difusa em superfície inclinada [W/m²];

G_{Gt} = Irradiância refletida do solo [W/m²].

A equação (18) representa a irradiação solar direta sobre uma superfície inclinada, que depende da irradiação solar direta horizontal e na equação (19) o fator de inclinação.

$$G_{Bt} = G_B \cdot R_B \quad (18)$$

$$R_B = \frac{\cos(\phi \pm \beta) \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin(\phi \pm \beta) \cdot \sin\delta}{\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega + \sin\phi \cdot \sin\delta} \quad (19)$$

Onde,

R_B = Fator de inclinação;

ϕ = Latitude [grau];

β = Ângulo de inclinação [grau];

δ = Declinação solar [grau];

ω = Hora angular [grau].

O desenvolvimento de modelos teóricos permite estimar a irradiação solar difusa no plano inclinado. Uma comparação dos diversos modelos é de suma importância para determinar um correto dimensionamento em um sistema fotovoltaico. A seguir são apresentados alguns modelos teóricos para determinar de forma objetiva uma estimativa da irradiação solar em uma superfície inclinada.

- Modelo do céu isotrópico

O modelo do céu isotrópico foi desenvolvido por Hottel e Woertz (1942) e aperfeiçoado por Liu e Jordan (1960) (DUFFIE & BECKMAN, 2013). O modelo na equação (20) e equação (21) é simples e assume que a irradiação difusa esta uniformemente distribuída em todas as direções da cúpula celeste.

$$R_d = \frac{(1 + \cos\beta)}{2} \quad (20)$$

$$G_t = R_B \cdot G_B + G_D \cdot R_d + (G_B + G_D) \rho_G \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (21)$$

Onde,

ρ_G = Albedo do solo.

- Modelo de Klucher

Klucher (1979) observou o momento em que a irradiância aumenta de intensidade perto do horizonte que é mais intensa do que no zênite do sol (brilho

horizontal) e o brilho do céu próximo do sol (circunsolar). Portanto, a parcela da radiação difusa de Liu e Jordan é modificada para incluir o comportamento anisotrópico. O modelo de Klucher introduz um índice de claridade para ajustar a variação de céu claro a nublado. Para o céu está nublado o índice de claridade tende 0 e modelo reverte ao comportamento isotrópico.

Klucher propõe um bom resultado para o céu nublado, porém apresenta uma menor eficiência de irradiação em condições de céu limpo e parcialmente nublado. O modelo desenvolvido para a irradiação solar é descrito na equação (22) e na equação (23) o índice de claridade (KALOGIROU, 2016).

$$G_t = R_B \cdot G_B + G_D \cdot R_d \cdot \left[1 + F' \cdot \text{sen}^3\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] \left[1 + F' \cdot \text{cos}^2(\beta) \cdot \text{sen}^3(\phi) \right] + (G_B + G_D) \rho_G \left[\frac{1 - \text{cos}(\beta)}{2} \right] \quad (22)$$

$$F' = 1 - \left(\frac{G_D}{G_D + G_B} \right)^2 \quad (23)$$

Onde,

F' = Índice de claridade.

- Modelo de Hay-Davies

O modelo de Hay-Davies foi desenvolvido em 1980 e divide a irradiação difusa do céu, em componentes isotrópicos e circunsolares. Introduce o índice de anisotropia (A') definido pela razão entre irradiância direta normal e irradiância global, equação (24). A irradiância global no plano inclinado na equação (25) é, então, calculada (KALOGIROU, 2016).

$$A' = \frac{G_{Bn}}{G} \quad (24)$$

$$G_t = R_B \cdot (G_B + G_D \cdot A') + G_D \cdot R_d \cdot (1 - A') + (G_B + G_D) \rho_G \left[\frac{1 - \text{cos}(\beta)}{2} \right] \quad (25)$$

Onde,

A' = Índice de anisotropia.

G_{Bn} = Irradiância direta normal [W/m²];

G = Irradiância incidente sobre a atmosfera terrestre [W/m²].

- Modelo de Reindl

O modelo de Reindl expande o modelo de Hay-Davies para representar a contribuição circunsolar para a irradiação difusa e a irradiação difusa isotrópica corrigida pelo brilho horizontal. Como descrito na equação (26), a irradiação total sobre a superfície inclinada (KALOGIROU, 2016).

$$G_t = R_B(G_B + G_D \cdot A') + G_D \cdot R_d \cdot (1 - A') \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{G_B}{G_B + G_D}} \cdot \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] + (G_B + G_D) \rho_G \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (26)$$

4.3 Painel Solar instrumentado

Para um melhor entendimento do comportamento térmico de um painel, objetivo deste trabalho, construiu-se um protótipo de um painel fotovoltaico com os componentes descritos na Figura 9, instrumentado com termopares capazes de fornecer os dados necessários a aplicação do balanço de energia, que serão posteriormente analisados e interpretados. Os materiais empregados para a construção e a análise do protótipo são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 - Componentes do módulo solar e descrição dos materiais

Componentes do módulo solar	Descrição
Células fotovoltaicas	Célula solar de silício monocristalino, com dimensão de 156x156mm potência de 4.8W, grau A e eficiência de 19.8%. Especificações em condições nominais: Potência máxima: 4,932W; Corrente de curto circuito: 9,436A; Voltagem de circuito aberto: 0,667V; Corrente no ponto de máxima potência: 8,951A; Voltagem no ponto de máxima potência: 0,551V.
Vidro	Condições nominais: 1000W/m ² , 25°C (assumidas). O vidro utilizado possui 4 milímetros de espessura e alta

	transparência. Sua densidade, expressa no sistema de unidades oficial, é de 3000 kg/m ³ .
Filme Encapsulante para o Painel Solar – EVA	Ethylene Vinyl Acetat é um material que protege as células fotovoltaicas.
Backsheet	É um “filme branco de plástico grosso” que vai na parte de trás do painel solar.
Caixa de Junção	Parte essencial, cuja função é conectar eletricamente o painel fotovoltaico.
Moldura	A moldura, em geral, permanece exposta às intempéries. O contato direto com a água da chuva exige maior atenção na escolha do material a ser utilizado. O alumínio anodizado possui como vantagens, dentro do campo dos coletores solares, sua alta resistência à corrosão, o que acaba conferindo a esse material um maior tempo de vida útil, permite conformação, possui ótimo acabamento e garante robustez ao painel solar.

Para a montagem do painel fotovoltaico, a moldura foi fabricada a partir de 4 perfis em “L” de alumínio com dimensão 4x4x550mm. O processo de união dos perfis foi realizado através de rebites (Figura 11).



Figura 11 - Moldura de alumínio

Nove células foram soldadas em série em uma matriz 3x3 utilizando fita de estanho “tab wire” de 20 mm. A figura 15 mostra o processo de solda das células em série.



Figura 12 - Processos de soldagem

Antes da montagem final do painel, foram instalados na parte inferior das células fotovoltaicas três termopares tipo K revestidos modelo SA1-K, da marca Ômega, como mostrado na figura 13a. O processo de montagem foi finalizado com o encapsulamento das células pelo EVA entre o vidro e as células, e entre as células e o backsheet. Para a conclusão do processo de montagem utilizou-se um aspirador, para criar um vácuo e evitar bolhas durante a etapa do encapsulamento do EVA através de um secador térmico (figura 13b).

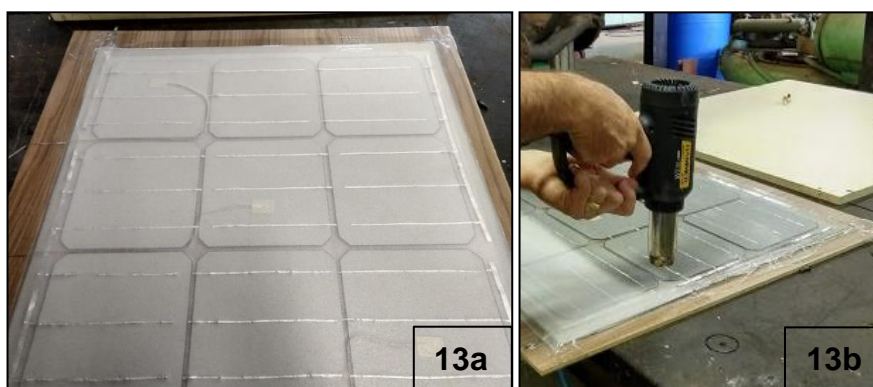


Figura 13 - Finalização do processo de montagem

Após a colocação da moldura, dois termopares do mesmo tipo dos anteriores foram colocados na parte superior do vidro, posicionados na mesma diagonal dos termopares das células aproximadamente no meio entre eles. Dois termopares adicionais, do tipo K, modelo 5TC-GG-K-36-36, da marca Ômega, foram instalados no backsheet na mesma posição dos instalados no vidro. O painel foi então fixado no suporte ajustável em dois eixos, Figura 14.



Figura 14 - Suporte e o projeto finalizado

A Figura 15, mostra as posições dos termopares instalados no vidro, na célula solar e no backsheet. A vista frontal, é representado nas duas primeiras imagens, à esquerda. A última imagem, do lado direito, representa a parte traseira do painel fotovoltaico.

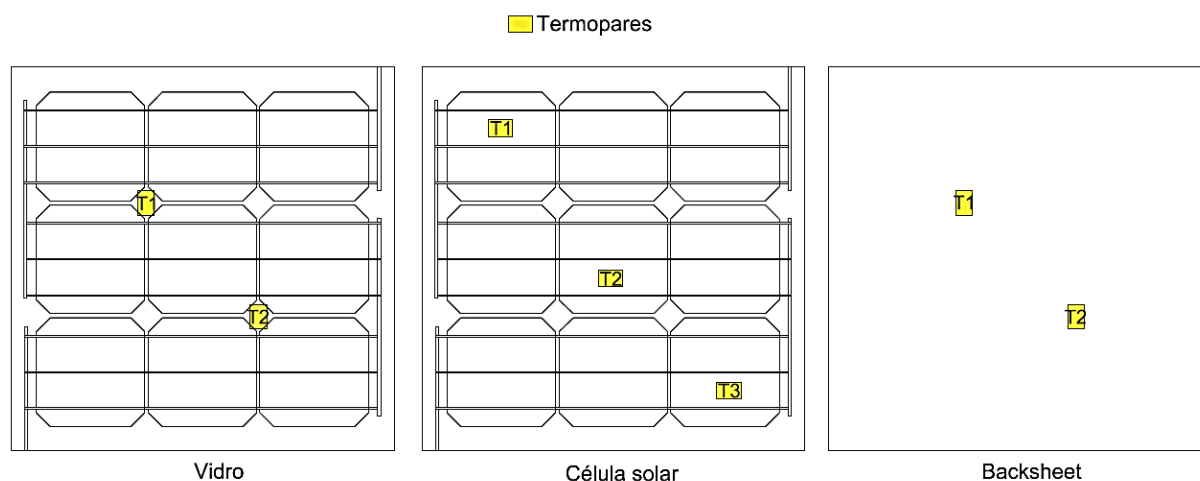


Figura 15 - Posições dos termopares nas células solares, respectivamente com vista frontal e traseira.

Para desenvolver o modelo matemático do balanço de energia, é necessário identificar as propriedades físicas dos materiais, como mostrado na Tabela 4 e as características geométricas do painel fotovoltaico construído na Tabela 5.

Tabela 4 - Propriedades físicas dos materiais

	α	ρ	τ	ε	cp (J/KgK)	Densidade (Kg/m ³)	K (W/mK)
Vidro	^a 0,12	^a 0,1	^a 0,88	^a 0,91	^c 500	^c 3000	^a 1,8
Célula solar	^d 0,9	^d 0,1	-	^b 0,9	^c 677	^c 2330	^a 150
Backsheet	^a 1	-	-	^a 0,85	^c 1250	^c 1200	^a 0,3
Concreto	0,6	0,1	-	^c 0,95	-	-	-

Fonte: ^a Hammami, Torretti, Grimaccia, e Grandi (2017); ^b GUARRACINO, MELLOR, et al.(2016); ^c Jones e Underwood (2001); ^d PARRETTA, SARNO, et al. (1999)

Tabela 5 – Características geométricas

	Espessura (m)	Largura (m)
Vidro	0,004	0,55
Célula solar	0,00025	0,155
Backsheet	0.0003	0,55

4.4 Aparato Experimental

Concomitantemente às temperaturas do painel solar, medidas de irradiância global horizontal, irradiância global no plano do painel e irradiância refletida foram obtidas por piranômetros fotovoltaicos calibrados do modelo LI200 da marca Li-cor. Foi também utilizada uma estação meteorológica GMX-600 da marca Gill para a medição de temperatura e umidade do ar, e velocidade e direção do vento, estas últimas obtidas por meio de um anemômetro sônico bidimensional do próprio instrumento.

Medições de temperatura da superfície de concreto, durante os experimentos, foram realizadas com termopares tipo J, fabricados pela empresa Baed Automação Industrial com transdutor de sinal modelo MTI-TT01, da marca Meganotti Technology. Esses termopares foram calibrados no laboratório antes da realização dos experimentos. Dois desses termopares foram posicionados no concreto cobertos por uma fita isolante branca para minimizar a carga radiativa. Um deles foi instalado na superfície sob a ação do sol e outra em superfície sombreada. Desse modo foi possível estimar com maior precisão as trocas de radiação térmica entre o painel e a superfície.

Além dessas medidas locais, as componentes da irradiância solar, a saber, irradiância global horizontal (G_H), irradiância direta normal (G_{Bn}), e irradiância difusa, são continuamente medidas no prédio adjacente ao local dos experimentos. Essas medidas são realizadas por uma estação solarimétrica configurada numa plataforma Solys 2 (com rastreamento solar) na qual dois piranômetros CMP-6, um deles sombreado por esfera para medição de irradiância difusa, e um pireliômetro CHP-1 foram montados. Todos esses instrumentos, incluindo a plataforma Solys 2, são da marca Kipp & Zonen,

Para a dissipação da energia gerada pelo painel fotovoltaico, um circuito resistivo composto por duas resistências elétricas de 2Ω nominal cada ligadas em paralelo foi construído, Figura 16.

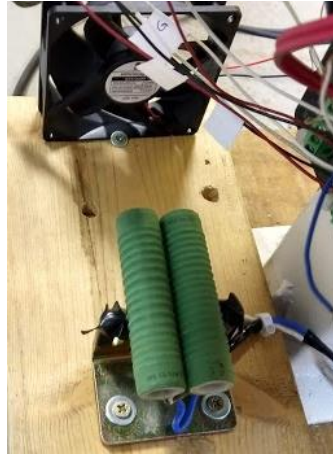


Figura 16 – Circuito resistivo

A medição da potência, gerada pelo painel fotovoltaico, foi então calculada com a medição da tensão entre as extremidades do circuito e a aplicação da equação (27).

$$P = \frac{V^2}{Res} \quad (27)$$

Onde:

P = Potência gerada [W]

V = Tensão [V]

Res = Resistência equivalente do circuito resistivo [Ω].

Um experimento específico foi realizado para determinar a resistência equivalente do circuito e verificar a influência da temperatura das resistências na resistividade. Os resultados deste teste são apresentados no APÊNDICE 1. Chegou-se à conclusão de que as variações de resistência com a sua temperatura podem ser tratadas como incertezas de medição. O valor apurado da resistência foi $Res = 1,15\Omega \pm 0,05\Omega$. Para se minimizar a influência da temperatura com as variações de

geração fotovoltaica, um ventilador foi posicionado na frente do circuito promovendo sua refrigeração, tal que não interfere no aparato experimental.

Dois dataloggers modelo CR1000 da Campbell Scientific, programados para coletar todos os dados do experimento, foram utilizados. A instrumentação utilizada na coleta de dados é descrita na Tabela 6.

Tabela 6 - Descrição dos instrumentos

Instrumento	Descrição
Termopares: Tipo K, SA1-K - Ômega	5 termopares instalados: 3 por baixo da célula solar e 2 na superfície do vidro.
Termopares: tipo K, 5TC-GG-K-36-36 - Ômega	2 termopares instalados no backsheet.
Termopares: Tipo J – Baed Automação Industrial	2 termopares: Medir a temperatura na superfície do concreto, 1 termopar no sol e 1 termopar na sombra.
Transdutor de sinal: MTI-TT01 - Meganotti Technology	Transmissor de temperatura.
Piranômetro: LI200 -Li-cor	3 piranômetros: 1 para medir a irradiância global horizontal, 1 para medir a irradiância global inclinada, 1 para medir a irradiância difusa.
Datalogger: CR1000 - Campbell Scientific	2 Datalogger para armazenar os dados.
Estação solarimétrica portátil: GMX600 - Gill	Para determinar principalmente a temperatura ambiente e a velocidade do vento.
Resistência elétrica	Resistência de 2Ω , circuito em paralelo.
Piranômetros: CMP-6 - Kipp & Zonen	2 piranômetros para medir a irradiância difusa e a global.
Plataforma Solys 2: Kipp & Zonen	Plataforma com rastreamento solar.
Pireliômetro: CHP-1 - Kipp & Zonen	Medir a irradiação direta do sol.

A

Figura 17, mostra o diagrama de ligação do aparato experimental com a sua instrumentação para a coleta de dados. Além dessas, está disponível próximo ao local dos testes dados uma estação solarimétrica completa, descrita acima, instalada no Laboratório de Energia e Ambiente.

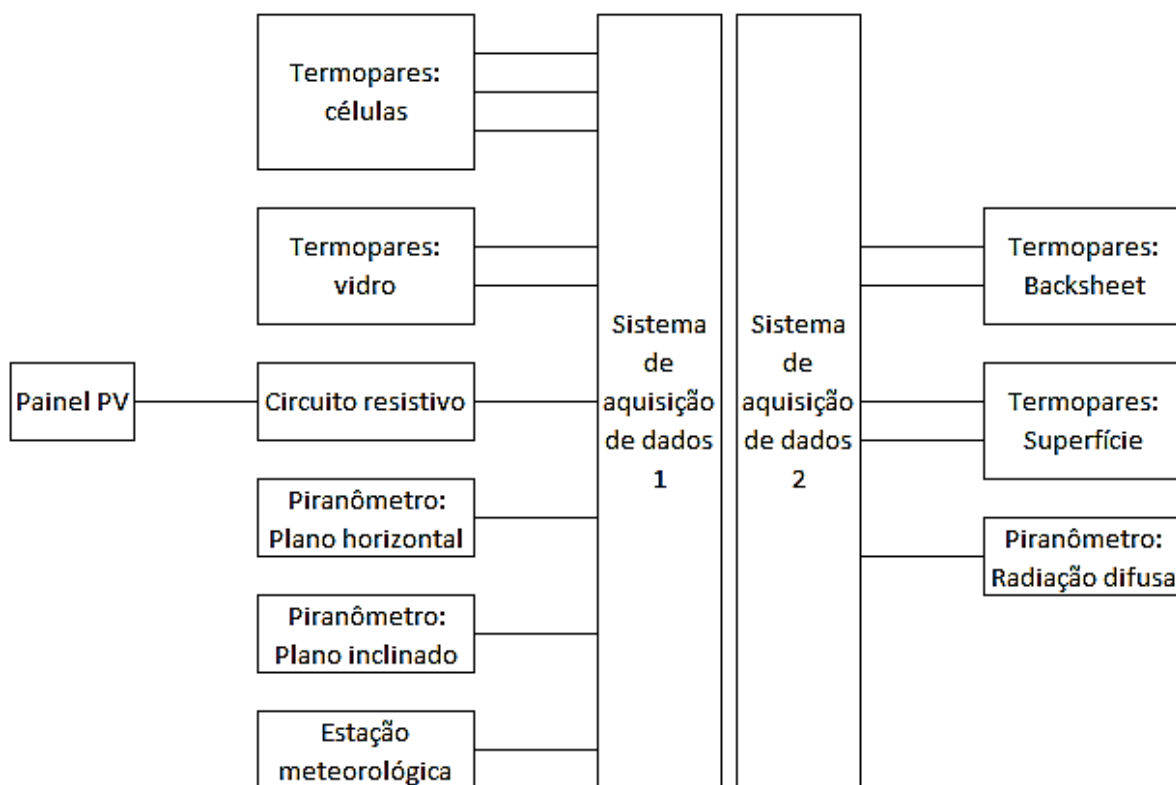


Figura 17 - Diagrama do aparato experimental.

A inclinação no painel em todos os experimentos foi de 15° , o que é correspondente a aproximadamente a latitude de Brasília, com face das células voltadas para o Norte. Essa é uma configuração comum na montagem de painéis fotovoltaicos. No painel fotovoltaico tem a saída dos fios positivos e negativos através de uma caixa de junção até o datalogger e ao circuito resistivo, ligação em paralelo.

Na Figura 18 mostra o aparato experimental durante o seu funcionamento em um dia ensolarado e seus respectivos sistemas para a coleta de dados.

Todos os valores medidos foram coletados com a frequência de $1/3\text{Hz}$ (uma leitura a cada três segundo) e suas estatísticas calculadas a cada minuto. Ambas séries temporais foram gravadas.



Figura 18 - Aparato experimental montado para aquisição de dados

Apesar de que os piranômetros utilizados nas medições de irradiação localizadas com o protótipo experimental são de menor precisão do que os da estação solarimétrica, eles têm tempo de resposta menor, o que é importante para as análises aqui realizadas. Sendo assim, os dados experimentais de irradiação global foram confrontados com os dados da estação solarimétrica tanto do plano horizontal (medidos na estação) quanto no plano inclinado, obtidos através da aplicação dos modelos de transformação de irradiação horizontal para o plano inclinado validados numa primeira etapa do trabalho.

4.5 Balanço de energia dos componentes do painel solar

O balanço de energia, para os componentes do painel construído, consiste na aplicação da equação (16), considerando as trocas de calor e potência elétrica (somente para a célula) específicas de cada um deles. Abordou-se o balanço de energia no vidro, na célula solar e no backsheet. O EVA foi desconsiderado nesta análise pois ele tem massa e, portanto, inércia térmica desprezíveis. Sua participação então é somente como uma resistência térmica a condução entre as células e o vidro, e o backsheet.

Na Figura 19, mostra um esquema dos tipos de energia em um painel fotovoltaico com as suas respectivas temperaturas

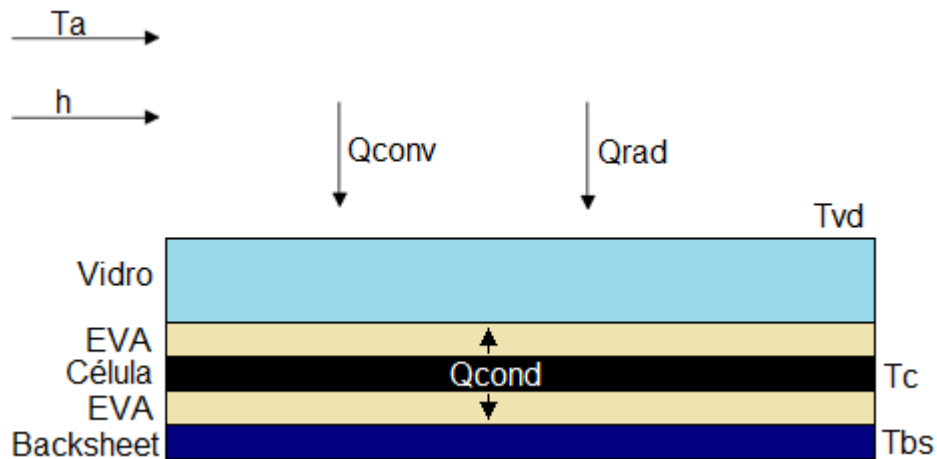


Figura 19 – Esquema detalhado dos tipos de energia em um painel fotovoltaico

Antes de apresentar o balanço de energia propriamente dito, alguns elementos são necessários para calcular as equações, sendo discutidos a seguir:

- Fator de forma

Para determinar as trocas de calor por radiação de um painel solar inclinado em relação ao céu e a superfície (solo), utiliza-se o fator de forma. O fator de forma entre o vidro de um coletor solar e o céu, é caracterizado pela equação (28) e na equação (29) de uma superfície (solo) para o vidro. O fator de forma do backsheet é inverso ao do vidro em relação ao céu e a superfície (solo), como mostrado nas equações (30) e (31).

$$F_{c\acute{e}u} = \frac{(1 + \cos\beta)}{2} \quad (28)$$

$$F_{sup} = 1 - F_{c\acute{e}u} \quad (29)$$

$$F_{c\acute{e}u,bs} = F_{sup} \quad (30)$$

$$F_{sup,bs} = 1 - F_{c\acute{e}u,bs} \quad (31)$$

Onde,

$F_{c\acute{e}u}$ = Fator de forma do c\acute{e}u;

β = Inclina\c{c}o [grau];

F_{sup} = Fator de forma da superf\i{c}ie.

O fator de forma da sombra do painel pode ser determinado na equa\c{c}o (32).

$$F_{sombra} = \frac{A \cdot \cos(\theta_z) \cdot \cos(\theta)}{\pi \cdot d_{sombra}^2} \quad (32)$$

Onde,

d_{sombra} = Dist\ancia entre centros do painel e da sua sombra [m];

- Modelo de Brutsaert

As trocas de calor por radia\c{c}o, al\em da radia\c{c}o solar, envolvem a radia\c{c}o t\er{m}ica. \xc{E} preciso considerar, al\em daquela emitida pelo painel e a emitida pelo solo (absorvida pelo painel), a radia\c{c}o incidente no painel proveniente da atmosfera. Esta \xc3{u}ltima n\ao foi medida por falta de instrumenta\c{c}o para tal. Para se estimar essa radia\c{c}o, ent\ao, utilizou-se o Modelo de Brutsaert (PRATA, 1996), desenvolvido para c\eu claro, em que a radia\c{c}o t\er{m}ica \xc3{e} fun\c{c}o da temperatura e umidade do ar pr\oximo \xc3{a superf\i{c}ie terrestre, como mostrado na equa\c{c}o (33).

$$G_{sky} = 1,24 \cdot \sigma \cdot T_a^4 \cdot \left(\frac{e_0}{T_a}\right)^{\frac{1}{7}} \quad (33)$$

Onde,

G_{sky} = Modelo de Brutsaert para ondas longas [W/m²];

σ = Constante de Stefan Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$).

T_a = Temperatura ambiente [K];

e_0 = Press\ao de vapor [Pa].

- Convec\c{c}o

Para determinar a troca de calor por convecção, o coeficiente de transferência de calor por convecção foi estimado, seguindo as equações (34) e (35), por relações do número de Nusselt. Em um painel, trocas de calor por convecção natural e forçada, laminar ou turbulenta são possíveis, dependendo das condições ambientais. Serão apresentadas a seguir relações de Nusselt para essas diferentes situações. Para convecção natural em uma placa plana quadrada em um plano inclinado, caso aqui em questão, as seguintes relações de Nusselt foram propostas na literatura com as equações (36), (37) e (38):

$$Nu_{nat,sup} = \max(Nu_1, Nu_2) \quad (34)$$

$$Nu_{nat,inf} = \max(Nu_1, Nu_3) \quad (35)$$

$$Nu_1 = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot (Ra \cdot |\sin \theta_p|)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (36)$$

$$Nu_2 = \left\{ 0,65 + 0,36 \cdot (Ra \cdot \cos \theta_p)^{\frac{1}{6}} \right\}^2 \quad (37)$$

$$Nu_3 = \frac{0,571 \cdot (Ra^* \cdot \cos \theta_p)^{\frac{1}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{5}}}{\left[1 + 1,156 \cdot Pr^{\frac{3}{5}} \right]^{\frac{1}{3}}} \quad (38)$$

Onde,

$Nu_{nat,sup}$ = Número de Nusselt para convecção natural para a superfície superior com temperatura superior à do ar;

$Nu_{nat,inf}$ = Número de Nusselt para convecção natural para a superfície inferior com temperatura inferior à do ar;

Pr = Número de Prandtl;

Ra = Número de Rayleigh em que g é a gravidade;

θ_p = Ângulo de inclinação do painel [grau];

O número de Prandtl é um parâmetro adimensional que expressa uma relação do movimento com o calor do fluido, sendo descrito na Eq. (39).

$$Pr = \frac{\nu \cdot c}{k} \quad (39)$$

Onde,

ν =Viscosidade cinemática [m²/s];

O número de Grashof estabelece a equação que rege o efeito da convecção natural com as condições de contorno, ou seja, representa o efeito da convecção. O número de Rayleigh é o produto entre o número de Prandtl e Grashof, na Eq.(40).

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta_v \cdot (T_s - T_a) \cdot L_c^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (40)$$

Onde,

g = Aceleração da gravidade [m/s²];

β_v = Coeficiente de expansão volumétrica [1/K];

L_c = Comprimento característico, no caso é o lado do painel [m].

Obs.: Ra^* na equação (40) é o Ra calculado com $L_c/2$

Para as equações acima, as propriedades do fluido são aqueles referentes a temperatura de filme, dada pela equação (43):

$$T_F = \frac{T_a + T_s}{2} \quad (41)$$

As relações de Nu acima são válidas para condições em que convecção natural prevalece, quando a razão $Gr/Re^2 \gg 1$. Quando essa condição não é válida, as trocas de calor, por convecção é forçada. A convecção forçada foi determinada para o escoamento laminar, Eq. (42) e turbulento, Eq. (43), através do Número de Reynolds, Eq. (44) e Número de Prandtl da equação (39).

$$Nu_f = 0,664.R_e^{0,5}.Pr^{\frac{1}{3}} \quad (42)$$

$$Nu_f = 0,037.R_e^{\frac{4}{5}}.Pr^{\frac{1}{3}} \quad (43)$$

$$R_e = \frac{L_c.V_V}{\nu} \quad (44)$$

4.5.1 Célula solar

O balanço de energia para a células fotovoltaicas, dada pela aplicação da equação (16) para as células, é apresentado na equação (45).

$$den_{cel}.c_{cel}.d_{cel}.A_p \frac{dT_{cel}}{dt} = \dot{Q}_{SW,cel} - \dot{Q}_{cond,cel} - P \quad (45)$$

O termo de radiação solar (ondas curtas, SW), equação (46), são compostos por duas componentes, a irradiância incidente proveniente do sol ($SW_{cel,1}$) e a refletida na superfície ($SW_{cel,2}$), respectivamente as equações (47) e (48).

$$\dot{Q}_{SW,cel} = (SW_{cel,1} + SW_{cel,2}).A_p \quad (46)$$

$$SW_{cel,1} = G_t(1 - \rho_{vidro})(1 - \alpha_{vidro})\alpha_{cel} \quad (47)$$

$$SW_{cel,2} = \{[G_b.\cos(\theta_z) + G_d].\rho_c.F_{sup}\}.(1 - \rho_{vidro}).(1 - \alpha_{vidro}).\alpha_{cel} \quad (48)$$

O termo de geração elétrica (P) é dado pela equação (27).

Dos termos da equação de balanço de energia, equação (16), o termo transiente (lado esquerdo da equação), de ondas curtas (SW) e de geração de potência gerada podem ser estimados pelas variáveis medidas. O termo de condução, então é calculado de forma a fechar o balanço, é dada pela equação (49).

$$\dot{Q}_{cond,cel} = den_{cel}.c_{cel}.d_{cel}.A_p \frac{dT}{dt} + \dot{Q}_{SW,cel} - P \quad (49)$$

4.5.2 Vidro

O balanço de energia para o vidro é obtido novamente pela aplicação da equação (16), obtendo-se a equação (50).

$$\begin{aligned} den_{vidro} \cdot c_{vidro} \cdot d_{vidro} \cdot A_p \frac{dT_{vidro}}{dt} \\ = \dot{Q}_{SW,vidro} + \dot{Q}_{LW,vidro} + \dot{Q}_{cond,vidro} - \dot{Q}_{conv,vidro} \end{aligned} \quad (50)$$

No caso do vidro, os termos de SW, equação (51), tem três contribuições. Além da irradiância incidente do sol e a refletida no solo, ainda existe a refletida na célula e absorvida pelo vidro, respectivamente pelas equações (52), (53) e (54).

$$\dot{Q}_{SW,vidro} = (SW_{vidro,1} + SW_{vidro,2} + SW_{vidro,3}) \cdot A_p \quad (51)$$

$$SW_{vidro,1} = G_t (1 - \rho_{vidro}) \cdot \alpha_{vidro} \quad (52)$$

$$SW_{vidro,2} = \{ [G_b \cdot \cos(\theta_z) + G_d] \cdot \rho_c \cdot F_{sup} \} \cdot (1 - \rho_{vidro}) \cdot \alpha_{vidro} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} SW_{vidro,3} = (G_t + [G_b \cdot \cos(\theta_z) + G_d] \cdot \rho_c \cdot F_{sup}) \cdot (1 - \rho_{vidro}) \cdot (1 \\ - \alpha_{vidro}) \cdot \rho_{cel} \cdot (1 - \tau_{vidro}) \end{aligned} \quad (54)$$

Para ondas longas tem-se a radiação térmica do céu, a radiação térmica emitida pela superfície do concreto e absorvida pelo vidro e a radiação térmica emitida pelo vidro, como mostrado nas equações (55), (56), (57) e (58).

$$\dot{Q}_{LW,vidro} = (LW_{vidro,1} + LW_{vidro,2} + LW_{vidro,3}) \cdot A_p \quad (55)$$

$$LW_{vidro,1} = G_{sky} \cdot F_{céu} \quad (56)$$

$$LW_{vidro,2} = \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot F_{sup} \cdot T_{sup}^4 \quad (57)$$

$$LW_{vidro,3} = -\varepsilon_{vidro} \cdot \sigma \cdot F_{sup} \cdot T_{vidro}^4 \quad (58)$$

O termo convectivo á calculado pela equação (59):

$$\dot{Q}_{conv,vidro} = h \cdot A_p \cdot (T_{vidro} - T_a) \quad (59)$$

Vale notar que na estimativa do termo transiente, assim como para os outros componentes, que a temperatura é considerada constante na espessura. Isso pode não ser verdade para o vidro dado que a espessura do vidro não é desprezível. No entanto, por se tratar de uma diferença de temperatura, a aproximação foi considerada razoável.

No caso do vidro, o termo de condução foi calculado pela diferença entre o calor perdido por condução pelas células e calor por condução das células para o backsheet, equação (60), descrito abaixo. Essa consideração é justificada pelo fato de que o EVA é extremamente delgado, e sua inércia térmica é mínima. Sendo assim, todo o calor de condução das células só pode ir para o backsheet ou para o vidro, e o termo de condução das células para o vidro é dada por:

$$\dot{Q}_{cond,vidro} = \dot{Q}_{cond,cel} - \dot{Q}_{cond,bs} \quad (60)$$

4.5.3 Backsheet

O balanço de energia para o backsheet é descrito pela equação (61):

$$den_{bs} \cdot c_{bs} \cdot d_{bs} \cdot A_p \frac{dT_{bs}}{dt} = \dot{Q}_{SW,bs} + \dot{Q}_{LW,bs} + \dot{Q}_{cond,bs} - \dot{Q}_{conv,bs} \quad (61)$$

Os termos de SW, equação (62), são apenas dois, a incidente do sol (somente difusa), equação (63), e a refletida no solo, equação (64):

$$\dot{Q}_{SW,bs} = (SW_{bs,1} + SW_{bs,2}) \cdot A_p \quad (62)$$

$$SW_{bs,1} = (G_D \cdot F_{céu,bs}) \cdot \alpha_{bs} \quad (63)$$

$$SW_{bs,2} = \{ [G_B \cdot \cos(\theta_z) + G_D] \cdot \rho_c \cdot F_{sup,bs} \} \cdot \alpha_{bs} \quad (64)$$

Para ondas longas, equação (65), os termos são a radiação térmica do céu, a radiação térmica emitida pela superfície do concreto e absorvida pelo backsheet e a radiação térmica emitida do backsheet, respectivamente nas equações (66), (67) e (68).

$$\dot{Q}_{LW,bs} = (LW_{bs,1} + LW_{bs,2} + LW_{bs,3}) \cdot A_p \quad (65)$$

$$LW_{bs,1} = G_{sky} \cdot F_{sup} \quad (66)$$

$$LW_{bs,2} = \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot F_{sup,bs} \cdot T_{sup}^4 + F_{sombra} \cdot T_{sup}^4 \quad (67)$$

$$LW_{bs,3} = -\varepsilon_{bs} \cdot \sigma \cdot T_{bs}^4 \quad (68)$$

Semelhante ao vidro, a convecção é calculada pela equação (69):

$$\dot{Q}_{conv,bs} = h \cdot A_p \cdot (T_{bs} - T_a) \quad (69)$$

A condução é estimada como o residual do balanço para o backsheet, na equação (70).

$$\dot{Q}_{cond,bs} = den_{bs} \cdot c_{bs} \cdot d_{bs} \cdot A_p \frac{dT_{bs}}{dt} - \dot{Q}_{SW,bs} - \dot{Q}_{LW,bs} + \dot{Q}_{conv,bs} \quad (70)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados e discussões para se atingir os objetivos. Primeiramente, será discorrida uma comparação dos modelos de conversão de radiação horizontal para o plano inclinado. Isso servirá de base para uma verificação de consistência entre medidas obtidas pela estação solarimétrica, de onde foram obtidos os valores de irradiância direta normal e difusa (necessárias para alguns termos do balanço de energia) e irradiância no plano inclinado medido com o aparato experimental. A seguir, os resultados das medições dos três dias de experimentos realizados com o aparato experimental serão expostos. Finalmente, o balanço de energia aplicado ao painel fotovoltaico será apresentado com uma discussão a respeito da relevância de cada termo nas trocas de energia de cada componente do painel.

5.1 Análise dos modelos de irradiação em superfície inclinada

Em uma superfície plana inclinada incidem irradiação direta, irradiação difusa e irradiação solar refletida do solo. A irradiação solar direta em superfície inclinada é facilmente determinada pelo produto da irradiação solar direta em superfície horizontal com um fator de inclinação da irradiação. Para a irradiação difusa em superfície inclinada os modelos teóricos permitem estimar a anisotropia da irradiação difusa, diferenciando-a em difusa isotrópica, circunsolar e horizontal. E a irradiação refletida do solo é caracterizada pela irradiação direta e difusa em superfície horizontal, e pelo albedo do solo. Segundo Silva, Gomes, *et al* (2016), para a região do Distrito Federal em zona urbana o albedo máximo é de 0,195.

Na Figura 20 apresenta uma relação entre valores medidos e estimados pelos modelos de Liu e Jordan, Klucher, Hay-Davies e Reindl et al. de irradiação global incidente em superfície horizontal. Os dados para tal comparação foram obtidos da plataforma SONDA para a cidade de Brasília para o ano de 2014. Os indicadores estatísticos dessa comparação estão apresentados na Tabela 7.

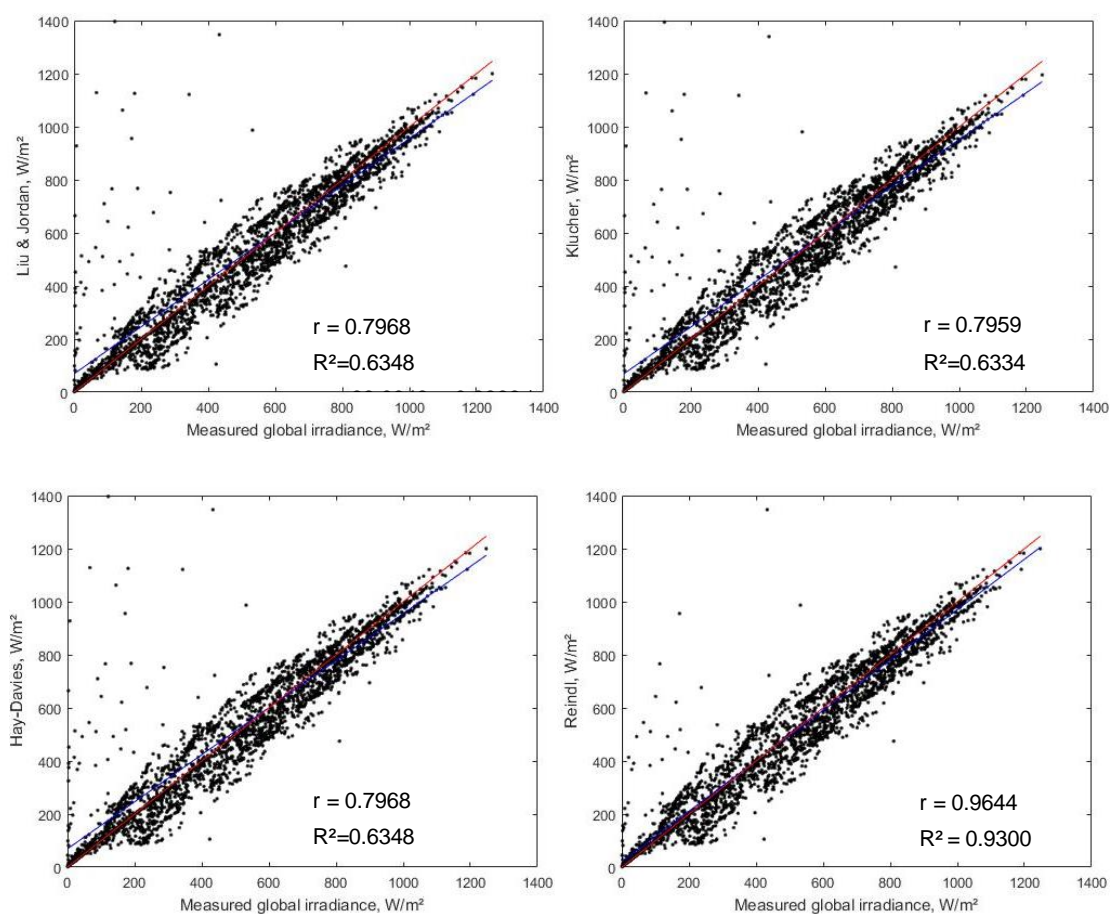


Figura 20 - Relação entre valores medidos pelo Sonda - 2014 e estimados pelos modelos de Liu e Jordan (1960); Klucher (1979), Hay-Davies (1980) e Reindl et al. (1990) de irradiação global incidente em superfície horizontal.

Belúcio, Silva, *et al.* (2014), apresenta uma regra prática do grau de correlação entre as variáveis. O coeficiente de correlação é considerado bem fraca se $0.00 \leq |r| \leq 0.19$, fraca se $0.20 \leq |r| \leq 0.39$, moderada se $0.40 \leq |r| \leq 0.69$, forte se $0.70 \leq |r| \leq 0.89$ e muito forte se $0.90 \leq |r| \leq 1.00$. A Tabela 7, mostra o coeficiente de correlação, coeficiente de determinação e a interpretação do tamanho de um coeficiente de correlação de modelos teóricos.

O modelo de Reindl, com um coeficiente de correlação de 0,9644, apresentou o melhor resultado destacando a importância de se levar em consideração tanto a componente circunsolar e o brilho horizontal na conversão de irradiância horizontal para a do plano inclinado. Verifica-se que para o caso em estudo o modelo de Reindl conseguiu explicar 93% da variabilidade do fenômeno.

Tabela 7 - Coeficiente de correlação, coeficiente de determinação e a interpretação do tamanho de um coeficiente de correlação de modelos teóricos

Modelos teóricos	Coeficiente de correlação (r)	Coeficiente de determinação (R ²)	Interpretação
Liu e Jordan	0,7968	0,6348	Correlação forte
Klucher	0,7959	0,6334	Correlação forte
Hay-Davies	0,7968	0,6348	Correlação forte
Reindl et al.	0,9644	0,9300	Correlação muito forte

A Figura 21 traz a comparação entre dados de irradiância global medidos na estação solarimétrica e nos piranômetros do aparato experimental. A figura mostra a irradiância (dados médios em um minuto) no plano horizontal (ambos medidos), juntamente com uma comparação entre os dados de irradiância no plano inclinado estimado pelo modelo de Reindl e o medido no aparato (irradiância no plano inclinado não é medida na estação solarimétrica).

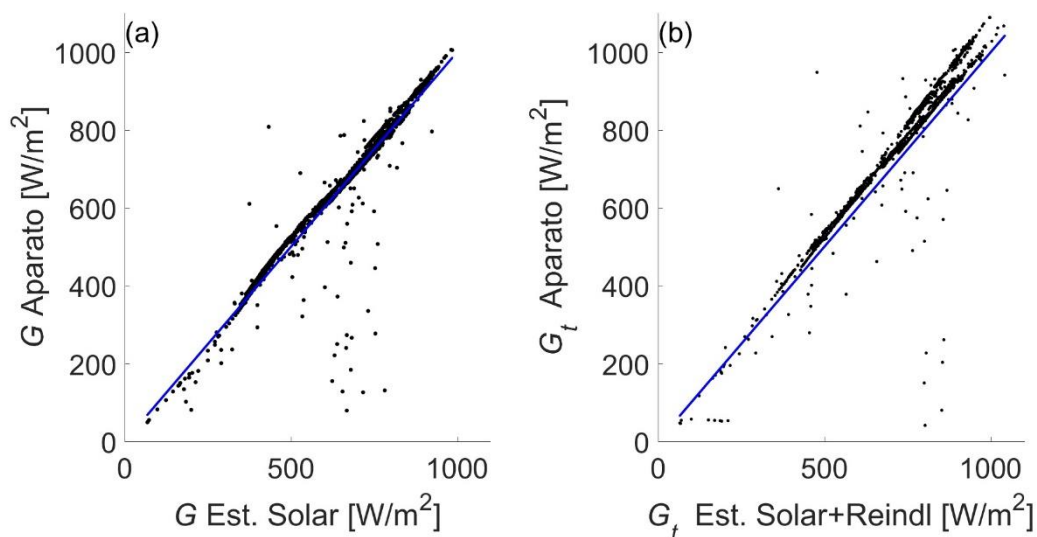


Figura 21 - Comparação entre irradiância global horizontal (G) da estação solarimétrica e a do aparato experimental (gráfico a, ambas medidas) e a irradiância no plano inclinado (G_t) da estação solarimétrica (modelo de Reindl (1990)) e o medido no aparato experimental.

Os dados de irradiância no aparato experimental, excluindo os dados que estão claramente fora da curva, apresentam valores ligeiramente superiores principalmente no plano inclinado. Este fato pode ser atribuído a reflexão nas superfícies adjacentes ao experimento (prédio e solo) que não estão presentes no caso da estação solarimétrica. Portanto, os dados de irradiância medidos no aparato experimental e na estação solarimétrica estão consistentes. Sendo assim, os valores de irradiância global no plano inclinado usados no balanço de energia desenvolvido nessa dissertação foram os medidos pelo piranômetro junto ao aparato, a não ser nos termos em que haja a necessidade das componentes direta e difusa. Nestes casos, foram utilizados os dados das componentes medidos diretamente na estação solarimétrica.

5.2 Experimentos

5.2.1 Condições Experimentais

Os experimentos com o protótipo ocorreram no Laboratório de Energia e Ambiente na Universidade de Brasília. Eles foram realizados em três dias diferentes, 17 e 18 de junho e 28 de agosto (vide Figura 18 do aparato no local do experimento). O protótipo juntamente com o aparato experimental foram colocados no sol na parte da manhã e finalizado o teste a tarde. Em todos os equipamentos foram nivelados, e o painel foi posicionado com sua face voltada para o norte com o ângulo de inclinação de 15° , próximo ao valor da latitude de Brasília. Os dados foram registrados em um cartão de memória através do datalogger. Todos os instrumentos que necessitam de alimentação de energia foram conectados a uma bateria de 12 V. Nos dias de 17 de junho e 28 de agosto o painel estava conectado ao circuito resistivo, já no dia 18 de junho o painel ficou em circuito aberto.

As condições de irradiância durante os experimentos são apresentadas na Figura 22. Nos três dias, as condições eram predominantemente de céu claro, principalmente no dia 18 de junho em que todo o experimento aconteceu em ausência de nuvens. Já nos dias 17 de junho e 28 de agosto houve o aparecimento de nuvens esporádicas durante o período de coleta de dados. Essa condição é interessante para análise da dinâmica do comportamento térmico do painel.

Repare que no dia 28 de agosto a irradiância no plano inclinado é maior do que nos outros dias. Isso era esperado já que o solstício de inverno, quando trajetória do

sol fica mais ao norte, é no dia 20 de junho. Depois disso o sol começa a retornar para trajetórias mais ao sul. Por exemplo, considerando a órbita solar em Brasília, no dia 18 de junho ao meio dia solar, o ângulo entre o sol e o painel era de 65° enquanto no dia 28 de agosto era de 80° . Lembrando que a condição de máxima radiação seria com ângulo de 90° . Outro fato interessante são os picos de irradiância com o aparecimento de nuvens nos dias 17 de junho e 28 de agosto. Esse efeito é conhecido como efeito lente de nuvens, quando o posicionamento aleatório das nuvens promove reflexões que concentram a radiação no local da medição.

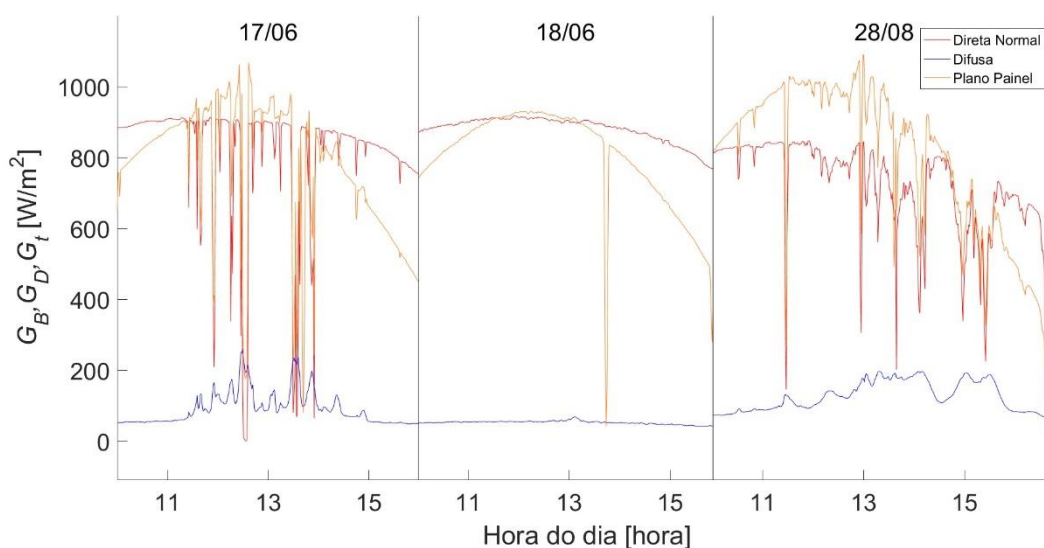


Figura 22 - Irradiância durante a realização dos experimentos. Os dados de irradiância no plano do painel (G_t , linha laranja) foram medidos pelo piranômetro do aparato experimental. Os dados de irradiância direta normal (G_B , linha vermelha) e de difusa (G_D , linha azul) foram obtidas da estação solarimétrica em prédio adjacente.

O instrumento de medição do vento, importante para a caracterização das trocas convectivas, foi posicionado a 65cm de altura do chão, altura semelhante à do painel. Velocidades e direção do vento (médias de um minuto) durante os experimentos estão representadas na Figura 23.

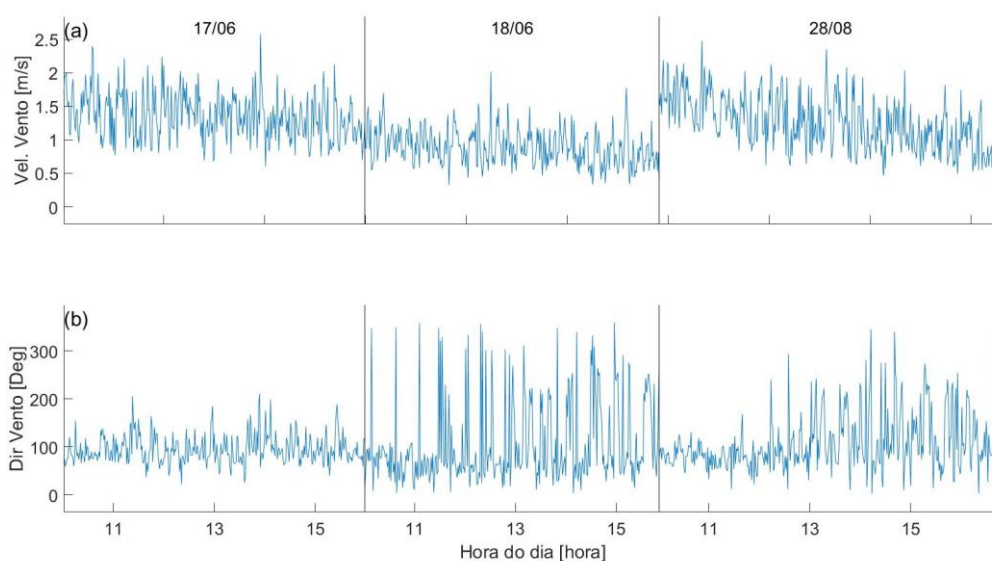


Figura 23 - Velocidade do vento e direção do vento no período dos experimentos. Os ângulos são em relação ao Norte geográfico.

O vento durante os testes se caracterizou por uma maior intensidade no começo dos testes com diminuição no decorrer dos experimentos, mas sempre se mantendo entre 0,5 e 2,5m/s, classificado entre vento de aragem e uma brisa leve segundo a escala de vento de Beaufort. Porém o comportamento foi ligeiramente diferenciado para cada dia. No dia 17 de junho, o vento se manteve em níveis maiores em comparação com o dia 18 de junho. Já no dia 28 de agosto, a intensidade foi maior no começo do experimento, mas com uma redução mais acentuada no período do teste. Observe que as oscilações de velocidade, mesmo com médias de um minuto, são comparáveis a média.

Com relação a direção, o vento prevalente em todos os períodos foi de aproximadamente 100° em relação ao norte, ou seja, vento praticamente do Oeste. Vale notar que as variações de direção, como era de se esperar, ocorrem com maior vigor para velocidades menores.

Outra variável relevante para o balanço de energia é a temperatura do ar, já que a diferença entre a temperatura da superfície e a do meio (no caso o ar) é a força motriz para as trocas de calor por convecção. A Figura 24, mostra a variação de temperatura do ar nos dias do experimento, medido pela estação meteorológica. O comportamento é semelhante nos três dias, típico dessa época do ano em Brasília,

com o aumento de temperatura até um valor máximo, próximo às 15:00, e redução após esse horário. Apesar do comportamento similar, nota-se que a temperatura no dia 17 de junho é inferior aos outros dias, com uma diferença de aproximadamente 3°C.

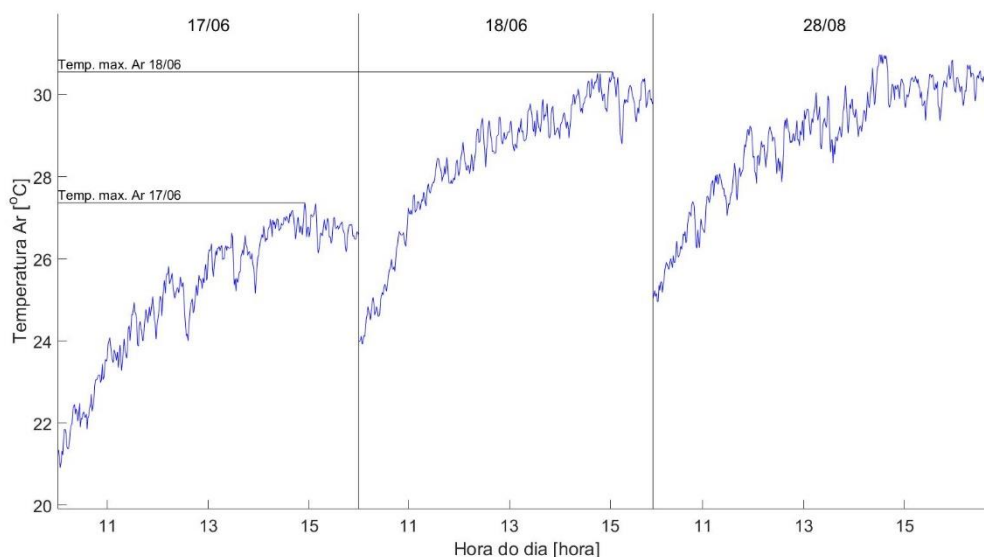


Figura 24 - Temperatura do ar nos dias dos experimentos. As linhas horizontais marcam as temperaturas máximas nos dias 17, 18 de junho.

5.2.2 Temperaturas dos Componentes do Painel

As temperaturas dos componentes do painel, a saber, temperatura do vidro (2 termopares), da célula (3 termopares) e do backsheet (2 termopares) são mostradas na Figura 25.

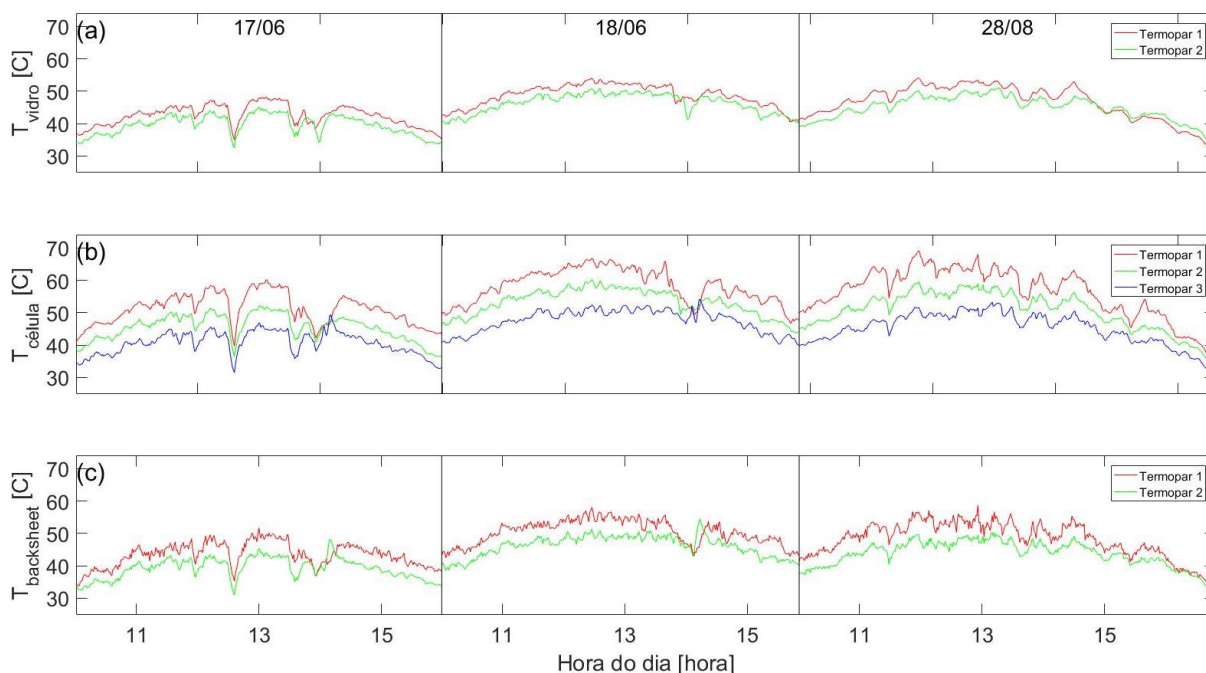


Figura 25 - Temperaturas medidas dos componentes do painel, Vidro (gráfico a), Células (gráfico b) e Backsheet (gráfico c). Os termopares seguem a nomenclatura da Figura 15.

Percebe-se na Figura 25, que a distribuição de temperatura é heterogênea nos três componentes do painel. As diferenças de temperatura entre os termopares são mais pronunciadas na célula, mas são consistentes em relação ao seu posicionamento tanto do vidro quanto do backsheet, ou seja, temperaturas mais altas do vidro e no backsheet foram medidas na posição entre as temperaturas mais altas das células. Vale ressaltar que essa heterogeneidade não está relacionada a geração de energia pelas células já que no dia 18 de junho o painel estava em circuito aberto. Sendo assim, ela deve ser consequência com as diferenças nos processos de transferência de calor. Se um efeito de borda for relevante, ou seja, coeficiente de troca de calor, na borda de ataque for maior, essa distribuição é compatível com o fato de que a direção do vento foi consistente nos três dias de experimento.

Para uma melhor comparação da variação temporal da temperatura, a Figura 26 mostra as séries temporais das médias de temperatura de cada componente, juntamente com a irradiância global no plano do painel (G_t).

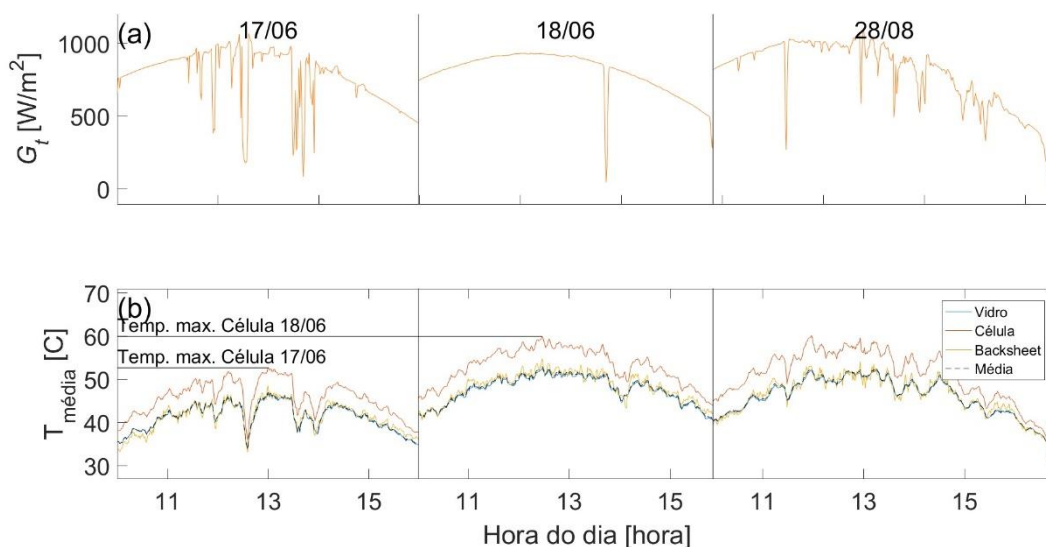


Figura 26 - Médias espaciais de temperatura (gráfico b) e irradiância incidente no plano inclinado G_t (gráfico a). Temperatura Média representa a temperatura média ponderada pela capacidade térmica de cada componente. As linhas horizontais no gráfico (a) marcam as temperaturas médias máximas nos dias 17, 18 de junho.

É possível observar que os níveis de temperatura média dos componentes do painel no dia 17 de junho são menores do que nos outros dias (18/06 e 28/08), que tem aproximadamente níveis de temperatura similares entre si. Esse comportamento é semelhante a temperatura do ar, em que a do dia 17 de junho era mais baixa (Figura 24 acima), e distinto da irradiância, em que a dos dias 17 e 18 de junho foram menores que a do dia 28 de agosto. Esse fato mostra que a temperatura média de um painel, tem uma maior relação com os níveis de temperatura do ar do que com a irradiância.

Com relação ao comportamento dinâmico do painel, fica claro na Figura 26 que a célula tem uma dinâmica mais intensa do que a do vidro e do backsheet, com respostas mais rápidas e amplitudes maiores em relação às variações de irradiância. Esse fato é de se esperar já que é ela que absorve a maior parte da radiação solar além de ter uma inércia térmica menor. Note que a redução abrupta de irradiância no dia 18 é devida a presença de um poste que causa sombreamento parcial do painel, enquanto o sol passa por trás dele causando essa variação menos intensa do que às devidas na presença de nuvens, que sombreiam o painel inteiro na sua passagem.

Outro fato interessante é que no dia 18 de junho, dia de céu claro (sem nuvens) durante todo o período do teste, as variações de todos os componentes são

semelhantes tanto em tempo quanto em amplitude. Ou seja, forçamentos que não são devidos a alterações de radiação solar, e sim a outros fatores, como oscilações de vento e temperatura do ar, promovem variações menores de temperatura e que são semelhantes entre os componentes. Esse é um fator relevante para testes de painéis com relação ao seu desempenho em função da temperatura.

Essa análise então, permite indagar que as temperaturas médias dos painéis solares são ditadas pela temperatura do ar. No entanto, a variabilidade da temperatura desses componentes é fortemente influenciada pela presença de nuvens e seus efeitos na irradiação incidente.

A temperatura média do painel, calculada pela média dos componentes ponderada pelas suas capacidades térmicas, é incluída na Figura 26 (linha tracejada preta) para referência. Essa média foi escolhida por ser a mais representativa daquelas estimadas por modelos térmicos de painel fotovoltaico que considerem o painel como um único elemento. Essa temperatura média é bem próxima da temperatura do vidro, que é o componente com massa consideravelmente maior que a dos outros. O seu comportamento é diferenciado da temperatura das células, que seria a variável de influência, na eficiência de conversão do painel.

A potência elétrica gerada no painel é mostrada na Figura 27. Ela está abaixo do esperado a partir dos dados do fabricante, o que pode ser devido à própria qualidade das células, a imperfeições de fabricação ou a pequena carga do painel, que não variou muito a temperatura. Esse fato não compromete as análises apresentadas nesta dissertação, cujo intuito não era a otimização de operação do painel, mas sim o melhor entendimento do seu comportamento térmico. Como a eficiência de conversão, mesmo para painel de alta eficiência, gira em torno de 15% nas condições padrão, eventuais diferenças entre o painel produzido e painéis comerciais estão limitados a esse percentual. Como mencionado anteriormente, o painel foi mantido em circuito aberto no dia 18 de junho, portanto com geração zero. Percebe-se para os outros dias que o painel responde a variações de irradiância incidente, mais visíveis no dia 17 de junho. Já no dia 28 de agosto, as temperaturas mais altas, aparentemente limitaram a geração de energia.

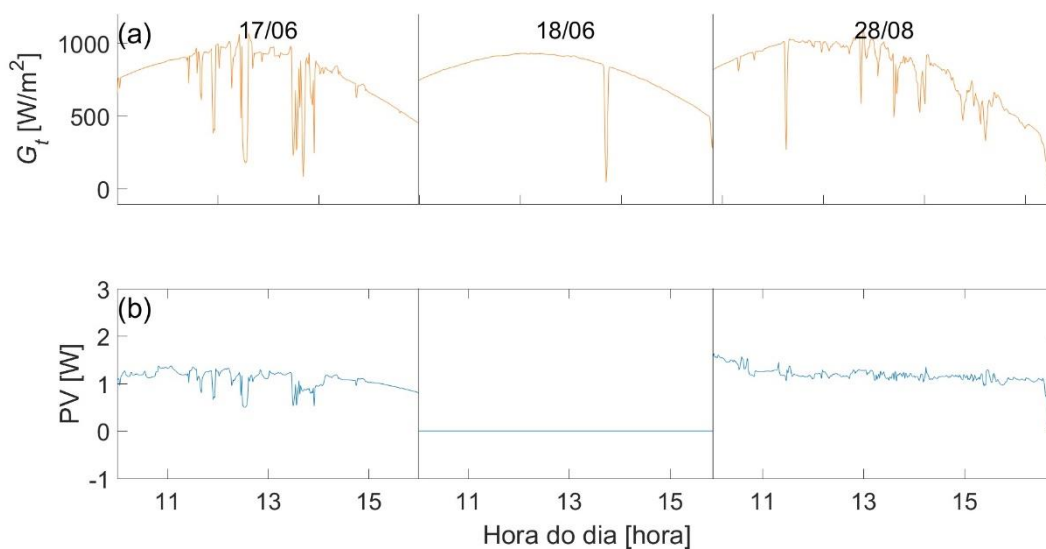


Figura 27 -Irradiância global no plano do painel (G_t , gráfico a) e potência elétrica gerada pelo painel (PV , gráfico b)

5.3 Análise do balanço de energia

5.3.1 Balanço de energia

A Figura 28, mostra os termos da equação de balanço de energia para as células fotovoltaicas. Os termos foram calculados pela média das temperaturas das células, como a temperatura representativa do painel. Repare que, dos termos do balanço de energia das células, somente o termo transiente depende da temperatura e esse termo é linear, ou seja, o uso da média da temperatura não representa perda significativa para essa discussão.

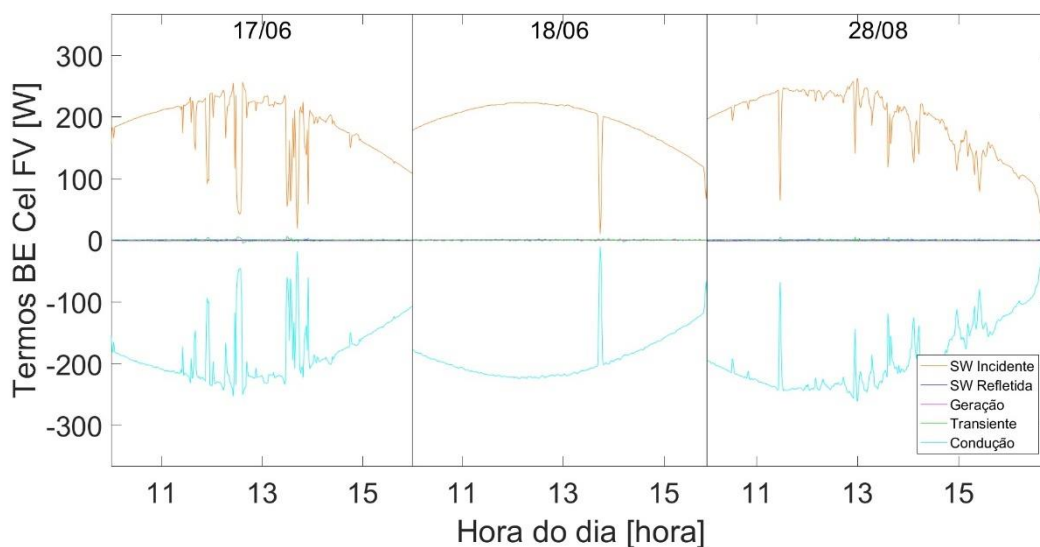


Figura 28 - Termos do balanço de energia (BE) para as células fotovoltaicas.

Para a célula fotovoltaica o termo de reflexão é negativo e é muito pequeno comparado com a irradiância solar incidente. O termo transiente também é praticamente desprezível devido à baixa inércia térmica da célula. Sendo assim a equação de balanço de energia para as células fotovoltaicas é representado basicamente pelo equilíbrio entre os termos de incidência de radiação e perdas por condução para o backsheet e o vidro, este último estimado para o fechamento do balanço de energia.

O balanço de energia para o backsheet será apresentado a seguir, antes do vidro, visto que o cálculo dos termos do vidro requer as estimativas dos termos do backsheet (veja seção 4.5). A Figura 29 mostra, termo a termo esse balanço.

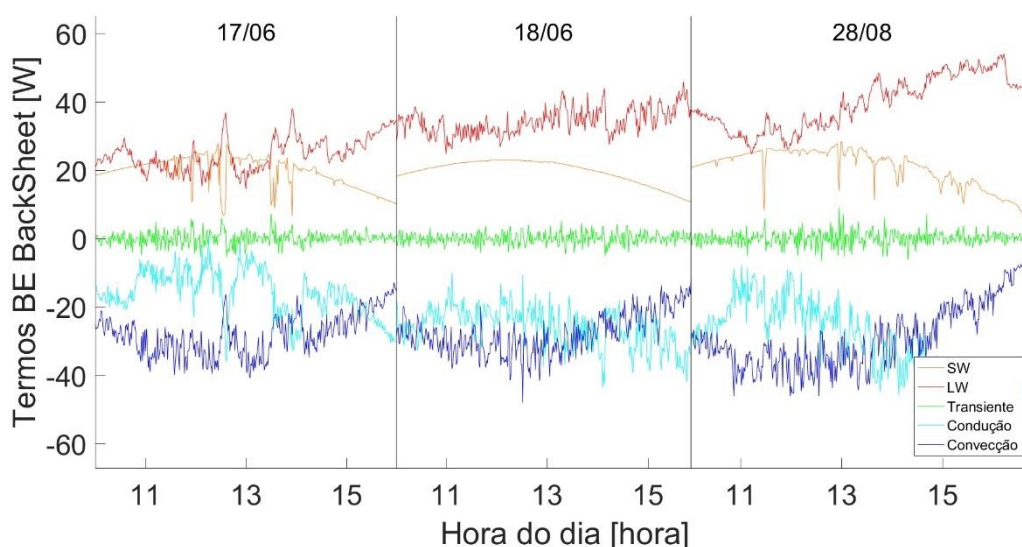


Figura 29 - Termos do balanço de energia para o backsheet

Nota-se que as magnitudes dos termos mais relevantes são bem menores do que os das células fotovoltaicas (veja a diferença de escalas do eixo y das figuras 28 e 29). Isso porque, no caso das células existe um forçamento intenso da radiação solar incidente, o que é bem menor no backsheet, por ser preponderantemente a refletida na superfície do solo. O termo transiente, tal como o termo transiente para as células fotovoltaicas, tem magnitudes consideravelmente menores quando comparados aos outros termos mais relevantes já que a inércia térmica é mínima.

O termo convectivo foi calculado considerando as equações (42) e (43) (veja seção 4.5). Nas condições ambientais prevalentes durante os testes os valores da razão Gr/Re^2 , indicador de convecção natural, são, na grande maioria dos pontos coletados menores do que 0,05, com poucos valores acima de 0,1 e apenas um pico de 0,28. Sendo assim, o processo de troca de calor por convecção é notadamente convecção forçada. Já o número de Reynolds está entre 1×10^4 e 7×10^4 , ou seja, o regime laminar prevalece.

Avaliando-se a Figura 28 e a Figura 29, nota-se que a condução de calor da célula fotovoltaica para o backsheet, que, assim como para as células foi estimado pelo fechamento do balanço de energia, não parece consistente com a diferença de temperatura entre a célula fotovoltaica e o backsheet, inclusive com inversão de sinal. Vale ressaltar que a razão entre essas variáveis é representativa da resistência a condução do EVA. Na verdade, a correlação entre a diferença de temperatura e o

termo de condução é de 0,48, relativamente baixo. Esse tema será revisitado mais a adiante.

Os termos do balanço de energia do vidro são apresentados na Figura 30. Primeiramente, fica claro que, os termos de radiação são menos importantes do que no balanço de energia das células fotovoltaicas, devido a alta transmissividade do vidro. Para o vidro, o termo de condução, ao contrário do que foi feito para a célula fotovoltaica e para o backsheet, foi calculado pela diferença entre a perda por condução das células fotovoltaicas e o termo de condução para backsheet, visto que a perda por condução das células só pode ir para backsheet ou para o vidro. Esse procedimento foi adotado visto que a temperatura da superfície interna do vidro não foi medida. Seguindo essa lógica, a Figura 30 inclui um termo adicional que representa o resíduo da equação do balanço de energia do vidro. Fica claro, na figura, que o fechamento do balanço está comprometido já que o resíduo é da mesma ordem de magnitude dos termos mais importantes e com comportamento não aleatório. Portanto, um ajuste se faz necessário.

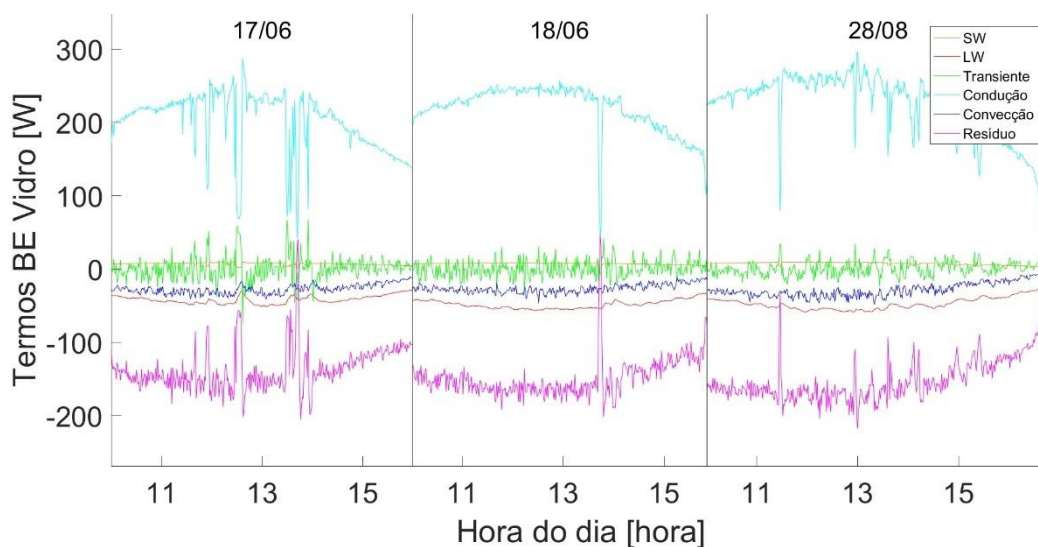


Figura 30 - Termos do balanço de energia para o vidro. O Resíduo representa o erro na equação do balanço de energia.

5.3.2 Ajuste do Termo Convectivo

Dos termos considerados nos balanços de energia das componentes do painel, o termo convectivo é o que carrega a maior incerteza, já que as relações de Nusselt foram determinadas em condições distintas daquelas dos experimentos. Com o intuito de verificar a possibilidade de o erro estar no termo convectivo, um ajuste da relação do número de Nusselt, foi efetuado. Para tal, a constante da relação entre Nu em função de Re e Pr , equação (42), foi modificada de tal maneira que a média do resíduo, considerando todos os experimentos, fosse zero. O valor da nova constante, para que a média do resíduo seja zero, considerando os três dias de experimento é de 4,09, consideravelmente superior do que a original de 0,664.

Para se verificar a consistência do termo convectivo ajustado de forma independente, a correlação entre o termo de condução do backsheet e a diferença de temperatura entre a célula fotovoltaica e o backsheet, assim como foi realizado anteriormente, foi calculada. A Figura 31 confronta essas duas variáveis. A linha na figura retrata o ajuste linear, e sua inclinação representa a resistência a condução de calor do EVA. Apesar de alguma dispersão, o comportamento é positivo, com um coeficiente de correlação de 0,82, bem superior aos obtidos com a relação de Nusselt com a constante original, que foi de 0,48, conferindo credibilidade ao termo ajustado. Outro fator de confiabilidade da relação é que, se extensão da reta até o valor de zero de diferença de temperatura (pontilhado na figura), leva bem próximo ao ponto de origem do gráfico (0x0, com um erro aproximado de 2%) que seria o valor teórico caso a representação de uma condução através do EVA.

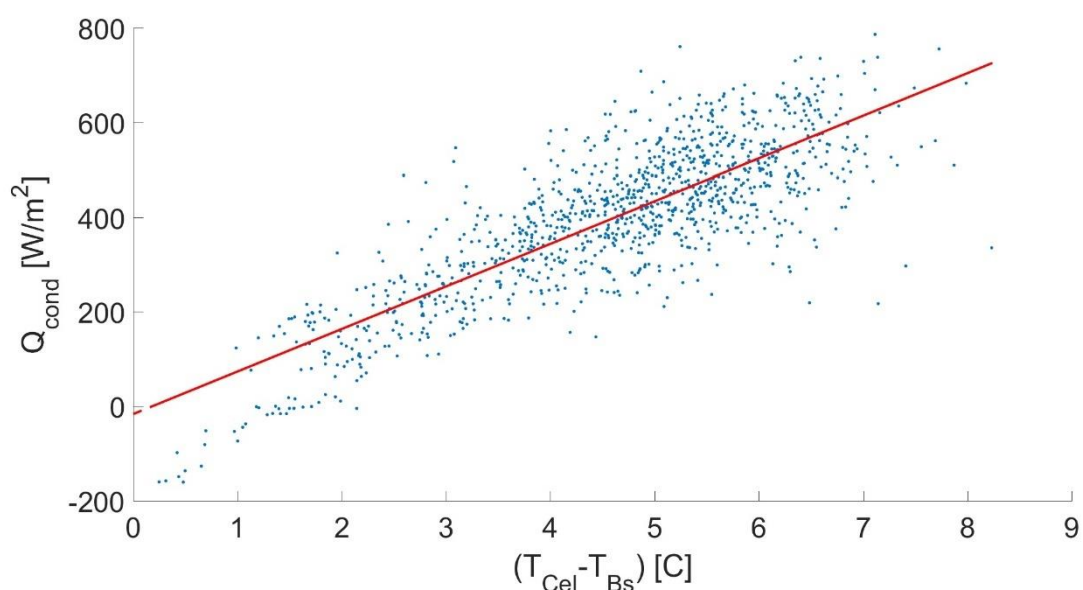


Figura 31 - Comparação entre o termo convectivo e a diferença de temperatura da célula e do backsheet. A linha representa a reta do ajuste linear

O aumento considerável na intensidade do termo de convecção, representada pela razão entre as constantes originais e ajustada, pode ser atribuída ao fato de que o painel está exposto a escoamento atmosférico. Apesar do número de Reynolds obtido na escala do painel representar um regime de escoamento laminar, o escoamento atmosférico é eminentemente turbulento, com escalas que são limitadas somente pela altura do ponto de interesse em relação ao solo. No caso, a altura do painel é comparável a sua dimensão, ou seja, as dimensões dos turbilhões turbulentos atmosféricos a que o painel está sujeito são comparáveis à sua dimensão, alterando completamente as características do escoamento sobre o painel.

Os termos de balanço de energia para o backsheet são apresentados na Figura 32. Os termos referentes às células não são alterados pelo ajuste. Note que, com a nova formulação, o termo de condução do backsheet fica positivo, consistente com a diferença de temperatura entre as células fotovoltaicas e o backsheet. Isso é mais um indicativo de que o ajuste é robusto.

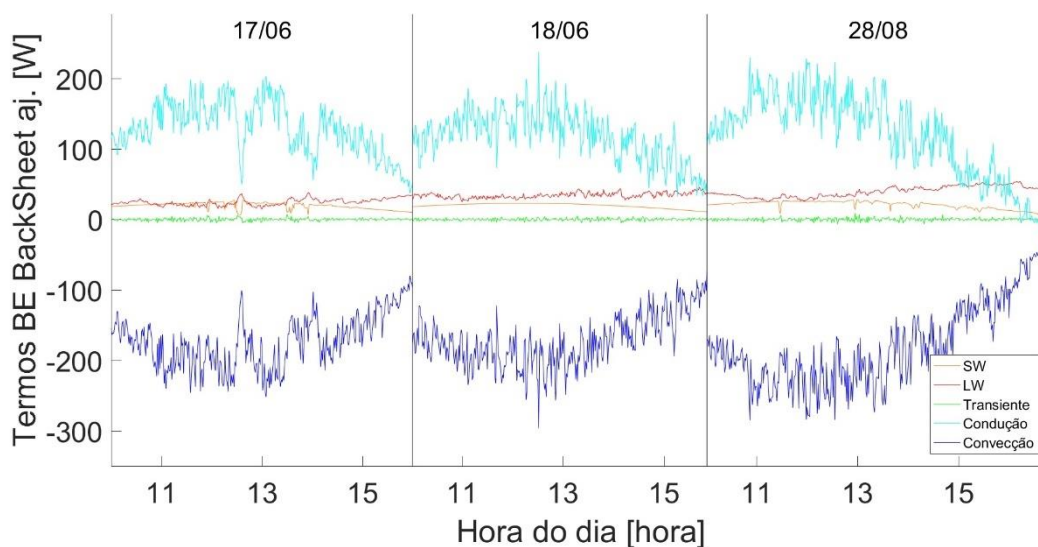


Figura 32 - Termos do balanço de energia para o backsheet, mesmo que a Figura 29, mas com termo convectivo ajustado.

A Figura 33 mostra os novos termos do balanço de energia para o vidro, respectivamente, após o ajuste do termo convectivo. O termo de resíduo do balanço térmico do vidro, também incluído no gráfico, oscila em torno de zero de forma mais aleatória do que anteriormente. No entanto, essas oscilações ainda têm magnitude considerável. Uma possível explicação para esse fato é que, como foi comentado acima, o escoamento atmosférico a que o painel está submetido tem oscilações turbulentas que são da escala do painel e a variações da velocidade do vento são comparáveis a média. Isso altera as características do escoamento e dificultam a elaboração de relações universais, pelo menos para essa escala de tempo. Com a nova relação de Nusselt, o termo de convecção parece ser o mecanismo mais significativo de troca de calor para o vidro. Interessante notar que o termo transitente tem também magnitudes bem inferiores aos outros. Isso se deve ao fato de que, ao contrário do que as células e o backsheet, o vidro tem inércia térmica elevada amortecendo, portanto, as oscilações de forçamento nas frequências características de suas variabilidades. Como esse termo é pequeno, a consideração de temperatura constante ao longo da espessura não compromete a discussão aqui elaborada.

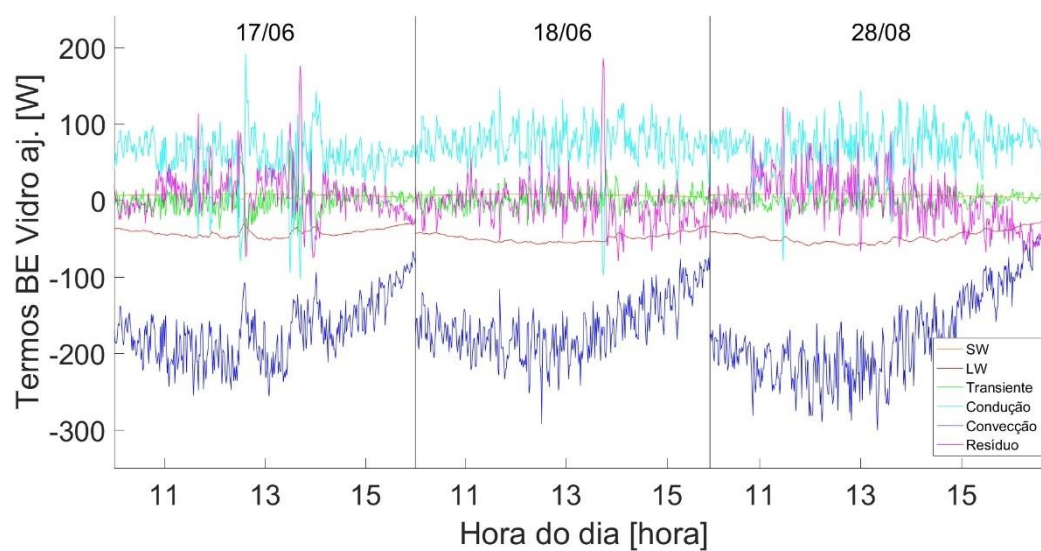


Figura 33 - Termos do balanço de energia para o vidro, mesmo que a Figura 30, mas com termo convectivo ajustado.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho um protótipo instrumentado de painel solar fotovoltaico foi projetado e construído com intuito de se estudar o comportamento térmico de painéis. O painel foi montado com nove células de silício monocristalino em um arranjo de 3x3. Termopares foram instalados para a medição de temperatura das células fotovoltaicas, da cobertura do vidro e do backsheet. O painel foi submetido a três experimentos em dias diferentes em que foram medidas, além das temperaturas do painel, a radiação incidente, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar, temperatura do solo e energia gerada pelo painel. Os termos do balanço de energia do painel foram estimados baseados nas medições de irradiância, temperaturas e propriedades físicas dos materiais. As principais conclusões a partir dos dados e das análises dos resultados são as seguintes:

- A distribuição de temperatura no painel é heterogênea, possivelmente por diferenças espaciais nos coeficientes de troca de calor por convecção;
- A temperatura média do painel está relacionada com a temperatura do ar e sua variabilidade, principalmente a das células fotovoltaicas, com as oscilações de irradiância devido a presença de nuvens;
- Os diferentes componentes do painel possuem diferentes comportamentos dinâmicos, com respostas distintas aos forçamentos externos;
- Os termos transientes parecem ter magnitudes inferiores quando comparados aos termos de trocas de calor, isso é válido para células, vidro e backsheet. Esse fato pode ser relevante para exercícios de modelagem, pois a temperatura do painel pode ser estimada, sem grandes erros, pelas condições instantâneas, sendo o seu histórico menos relevante;
- A maior incerteza está associada ao termo convectivo. Um painel fotovoltaico em operação, fica submetido ao escoamento atmosférico que é predominantemente turbulento na presença do sol, ou seja, nos períodos de maior interesse de modelagem térmica do painel solar. A turbulência atmosférica tem escalas espaciais comparáveis as dimensões características típicas de painéis. Sendo assim, mesmo com número de Reynolds de regimes laminares, caso dos experimentos aqui realizados, a intensidade e variabilidade

do coeficiente de troca de calor são bem maiores do que os previstos pelas formulações clássicas de número de Nusselt em função de Re e Pr .

Em termos de sugestões para trabalhos futuros, pode-se sugerir que sejam realizados experimentos em condições distintas daquelas testadas aqui, ou seja, céu predominantemente claro com nuvens esporádicas. Uma análise de espectro das séries temporais dos forçamentos, a saber, irradiância, temperatura do ar e velocidade do vento, e das respostas do painel em termos de temperatura e, conseqüentemente, de geração de energia, também poderia elucidar melhor o comportamento térmico do painel e, portanto, servir de subsídio adicional na modelagem dinâmica de painéis fotovoltaicos. Estudo específico sobre convecção em painéis fotovoltaicos submetidos a escoamentos atmosféricos com intuito de formulação de relações mais robustas para as condições típicas de painéis em operação seria uma contribuição importante para área de energia solar fotovoltaica. Além disso, os resultados aqui apresentados podem servir de base de dados para validação de modelos que simulem o comportamento térmico de painéis, melhorando assim as estimativas de geração de instalações fotovoltaicas.

REFERÊNCIAS

- ARMSTRONG, S., & HURLEY, W. G. (2010). A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. *Applied Thermal Engineering*, 30, 1488-1495.
- BAGHER, A. M., VAHID, M. M., & MOHSEN, M. (2015). Types of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*, 3, 94-113.
- BARBOSA, H. M. (2014). Vapor de água na atmosfera: do efeito estufa às mudanças climáticas. *Revista USP*, 67-80.
- BARDHI, M., GRANDI, G., & PREMUDA, M. (2011). Steady-State Global Power Balance for Ground-Mounted Photovoltaic Modules. *The Third International Renewable Energy Congress*, 359-365.
- BELÚCIO, L. P., SILVA, A. N., SOUZA, L. R., & MOURA, G. B. (2014). Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29, 494-504.
- BP. (2019). Acesso em julho de 2019, disponível em Statistical Review of World Energy 2019: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>
- BRASIL JUNIOR, A. C. (04 a 07 de abril de 2016). DYNAMICAL MODELING AND SIMULATION OF PV-SOLAR PANNELS. *VI Congresso Brasileiro de Energia Solar*.
- BURROWS, K., & FTHENAKIS, V. (2015). Glass needs for a growing photovoltaics industry. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 132, 455-459. Fonte: http://www.seas.columbia.edu/clca/6_Burrows_Fthenakis_SolarMaterials.pdf
- CGEE. (2010). *Energia solar fotovoltaica no Brasil: subsídios para tomada de decisão*. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília.
- CHEN, B.-M., PENG, C.-Y., CHO, J.-L., & PORTER, G. A. (2015). Optimization of Solar Module Encapsulant Lamination by Optical Constant Determination of Ethylene-Vinyl Acetate. *International Journal of Photoenergy*, 2015, 7.
- ClassAction Tables List*. (2019). Fonte: Astronomy Education at the University of Nebraska-Lincoln : <https://astro.unl.edu/classaction/tablesList.html>

- DUFFIE, J. A., & BECKMAN, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4^o ed.). New Jersey: John Wiley & Sons.
- FRONTIN, S. O., BRASIL JR, A. P., CARNEIRO, M. D., & GODOY, N. D. (2017). *Usina fotovoltaica Jaíba solar: Planejamento e engenharia* (1^o ed.). Brasília: Teixeira Gráfica e Editora.
- FUENTES, M. K. (1987). *A Simplified Thermal Model for Flat-Plate Photovoltaic Arrays*. SAND85-0330, Sandia National Laboratories. Albuquerque: SAND85-0330.
- GHOSH, A., SUNDARAM, S., & MALLICK, T. K. (2018). Investigation of thermal and electrical performances of a combined semi-transparent PV-vacuum glazing. *Applied Energy*, 228, 1591-1600.
- GÓMEZ, J. M., CARLESSO, F., VIEIRA, L. E., & SILVA, L. (2018). A irradiância solar: conceitos básicos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 40, 1-12.
- GREEN, M. A. (2005). Silicon Photovoltaic Modules: A Brief History of the First 50 Years. *PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS*, 13, 447-455.
- GUARRACINO, I., MELLOR, A., EKINS-SAUKES, N. J., & MARKIDES, C. N. (2016). Dynamic coupled thermal-and-electrical modelling of sheet-and-tube hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collectors. *Applied Thermal Engineering*, 101, 778-795.
- GUNEY, M. S. (Maio de 2016). Solar power and application methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 776–785.
- HAMMAMI, M., TORRETTI, S., GRIMACCIA, F., & GRANDI, G. (2017). Thermal and Performance Analysis of a Photovoltaic Module with an Integrated Energy Storage System. *Applied Sciences*, 7, 1107.
- HOLMAN, J. P. (2010). *Heat Transfer* (10^a ed.). Mcgraw-Hill.
- HOWELL, J. R., MENGÜÇ, M. P., & SIEGEL, R. (2016). *Thermal Radiation Heat Transfer* (6^a ed.). CRC Press.
- HYDROSOLAR. (2012). *Aluminum extrusion, a world of opportunities*. Fonte: Solar Design Manual: https://www.buildup.eu/sites/default/files/Hydro_Solar_Design_Manual.pdf
- INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., BERGMAN, T. L., & LAVINE, A. S. (2008). *Fundamentos de Transferência de calor e de massa* (6^a ed.). LTC.

- JASZCZUR, M., HASSAN, Q., TENETA, J., MAJEWSKA, E., & ZYCH, M. (2018). An analysis of temperature distribution in solar photovoltaic module under various environmental conditions. *MATEC Web of Conferences*, 240.
- JONES, A. D., & UNDERWOOD, C. P. (2001). A Thermal Model for Photovoltaic Systems. *Solar energy*, 70, 349-359.
- KALOGIROU, S. A. (2016). *Engenharia de energia solar: Processos e sistemas*. (2^o ed.). Rio de Janeiro: Elsevier.
- MASTERS, G. M. (2004). *Renewable and efficient electric power systems*. New Jersey: Wiley-Interscience a John Wiley & Sons , Inc.
- MATSUNAGA, N., ITO, T., SHIROKURA, Y., KAWASHIMA, A., & MAKINO, J. (2016). Development of Monosheet-Type Photovoltaic Backsheet for High Durability and. *FUJIFILM RESEARCH & DEVELOPMENT*, 37-43.
- NREL. (2019). Fonte: Best Research-Cell Efficiency Chart: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- OLIVEIRA, M. M. (2008). *Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimuthal*. Dissertação em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre.
- PARIDA, B., INIYAN, S., & GOIC, R. (2011). Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 1625–1636 Contents lists available at ScienceDirect Renewable and Sustainable Energy RA review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1625-1636.
- PARRETTA, A., SARNO, A., TORTORA, P., YAKUBU, H., MADDALENA, P., ZHAO, J., & WANG, A. (1999). Angle-dependent reflectance measurements on photovoltaic materials and solar cells. *Optics Communications* , 172, 139-151.
- PORTALSOLAR. (2014). Acesso em Julho de 2018, disponível em Passo a Passo da Fabricação do Painel Solar: <https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>
- PRADO, A., & KUGA , H. (2001). *Fundamentos de tecnologia espacial*. Acesso em Setembro, disponível em ResearchGate: https://www.researchgate.net/figure/Esquema-mostrando-os-efeitos-da-radiacao-incidente_fig16_43655142
- PRATA, A. J. (1996). A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Csiro*, 1127-1151.

- RAZAK, A., IRWAN, Y. M., LEOW, W. Z., IRWANTO, M., SAFWATI, I., & ZHAFARINA, M. (s.d.). Investigation of the Effect Temperature on Photovoltaic (PV) Panel Output Performance. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 6, 682-688.
- SILVA, R. A., GOMES, H. B., FREITAS, I. G., ALVES, L. E., & CARDOSO, B. C. (2016). Simpósio sobre as geotecnologias e geoinformação no Estado de Alagoas. *Análise da umidade do solo através do Albedo em Brasília-DF*, p. 9p.
- SONDA. (2018). Acesso em Janeiro de 2018, disponível em Sistema de organização nacional de dados ambientais: <http://sonda.ccst.inpe.br/index.html>
- TOFIGHI, A. (2013). Performance Evaluation of PV Module by Dynamic Thermal Model. *Journal of Power Technologies*, 111-121.

APÊNDICE 1

O circuito foi testado para se determinar a resistência equivalente real e sua dependência em relação a temperatura. O teste foi realizado com o auxílio de uma fonte de corrente contínua programável, modelo Agilent E3633A e um multímetro digital Agilent 34401A, ambos da marca Hewlett Packard. O circuito foi submetido a diferentes níveis de tensão pré-fixada e a corrente foi medida durante um período de 30 minutos para cada nível. Com a voltagem conhecida e a corrente medida, a variação da resistência ao longo do tempo foi calculada e assim foi possível determinar valores máximos e mínimos da resistência em função da temperatura do resistor. Posteriormente, o circuito foi conectado ao multímetro digital e sua resistência foi medida durante o resfriamento.

No teste verificou-se, que logo após a aplicação da diferença de potencial, a geração interna de calor por efeito joule promove um aumento muito rápido da resistência do circuito devido ao aumento da temperatura. A dissipação do calor promove então, a diminuição da resistência ao longo do tempo até que o equilíbrio térmico seja atingido. Este tipo de comportamento impede correções da resistência com medição de sua temperatura externa. Sendo assim, as variações de resistência por alteração de temperatura devido a corrente gerada pelo painel foram tratadas como incerteza de medição. O valor da resistência apurado foi de $R = 1,15\Omega \pm 0,05\Omega$.

As curvas características da corrente x voltagem (IxV) e potência x voltagem (PxV) teóricas do painel (obtidas por modelagem da célula) para diferentes temperaturas e irradiâncias, juntamente com as curvas de operação do circuito resistivo com sua resistência máxima e mínima são mostrados na figura A1. Os pontos de operação para cada condição de temperatura e irradiância seriam nos pontos de interseção da curva do painel e do circuito resistivo, na condição instantânea de temperatura da célula, temperatura do circuito (entre as curvas de máximo e mínimo) e irradiância. É possível verificar que o intervalo de operação do painel conectado ao circuito para cada condição é relativamente estreito e que o seu tratamento como incerteza é razoável. Vale ressaltar que, apesar de, sob certas condições, a operação do painel estar distante do ponto de máxima potência, isso não representa perda de generalidade, já que o interesse deste trabalho não é maximizar a geração e sim o comportamento térmico de painéis solares. Nota-se que essa análise é qualitativa pois

a temperatura interna da resistência não é possível de medição. No entanto, a potência gerada é medida diretamente pela diferença de potencial entre as extremidades do circuito e não estimada por essas curvas.

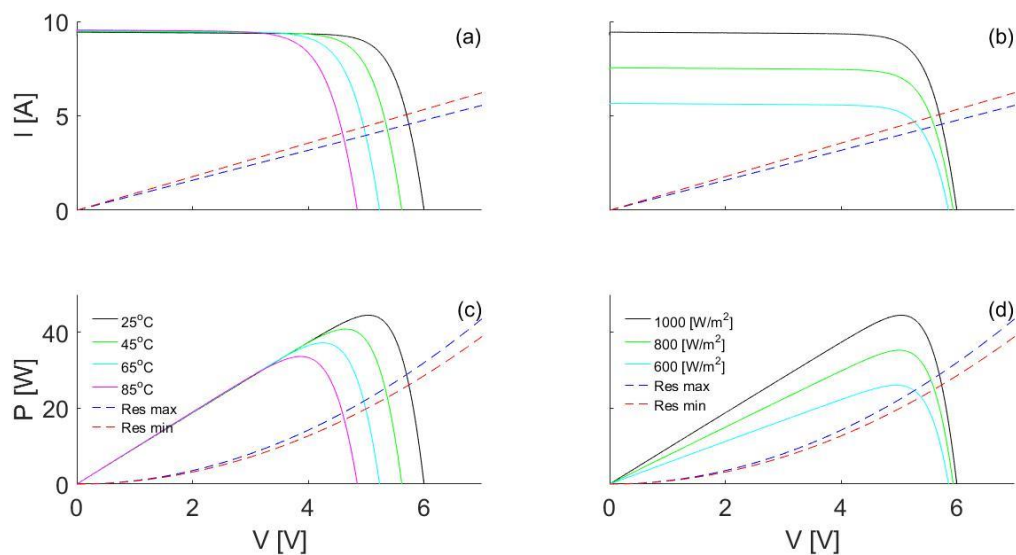
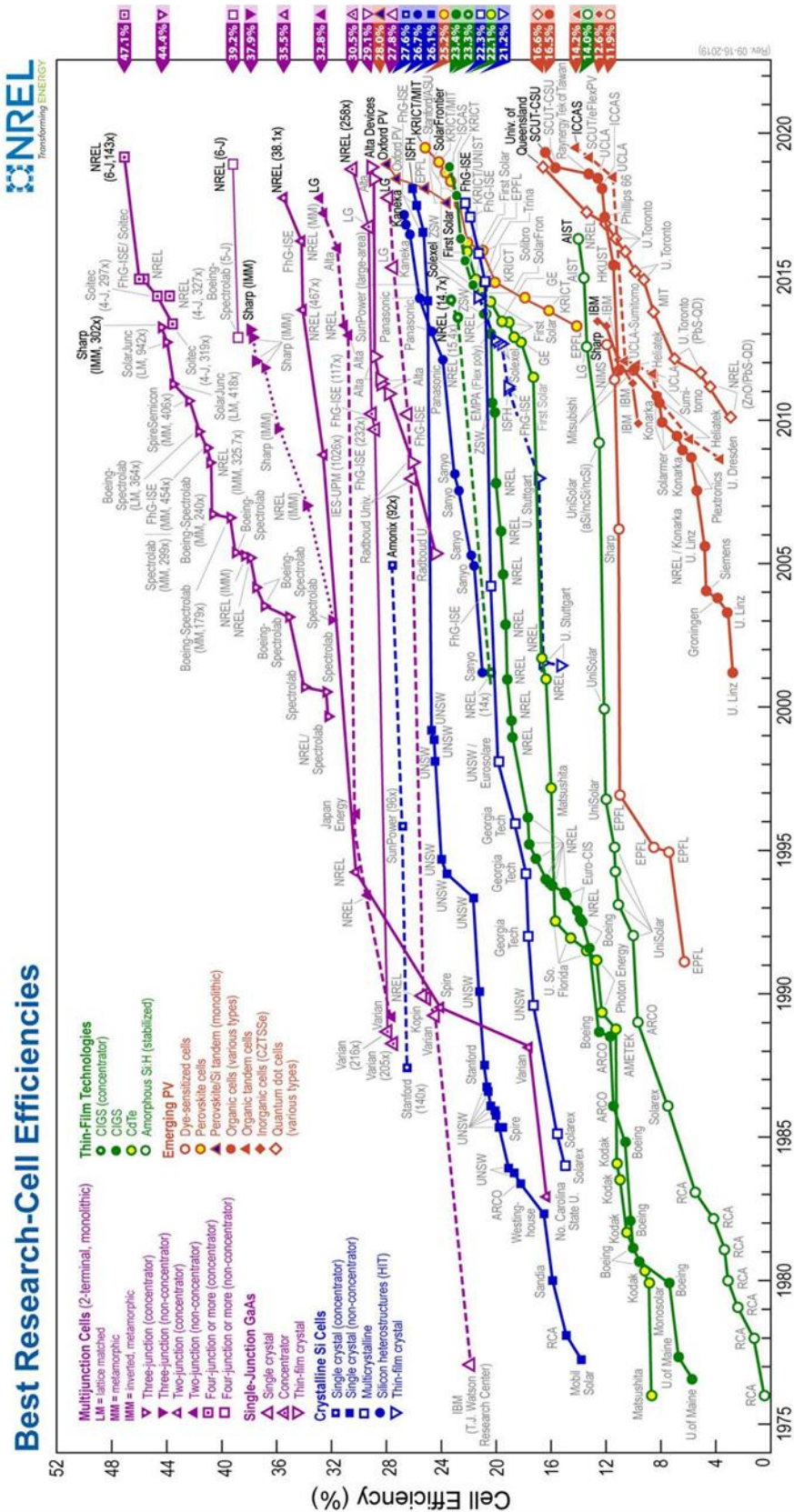


Figura A1: Pontos operacionais teóricos do painel com a circuito resistivo para diferentes temperaturas e irradiâncias

ANEXO A – Eficiência das células fotovoltaicas



Fonte: Nrel (2019).