



**ANÁLISE DOS BENEFÍCIOS RASTREAMENTO SOLAR POR  
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA DIFERENTES CONDIÇÕES  
CLIMATOLÓGICAS**

**JOSÉ CÉSAR MARTINS DE OLIVEIRA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECANICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANALYSIS OF THE BENEFITS OF SOLAR TRACKING BY  
PHOTOVOLTAIC MODULES FOR DIFFERENT CLIMATE  
CONDITIONS**

**ANÁLISE DOS BENEFÍCIOS RASTREAMENTO SOLAR POR  
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA DIFERENTES CONDIÇÕES  
CLIMATOLÓGICAS**

**JOSÉ CÉSAR MARTINS DE OLIVEIRA**

**ORIENTADOR: MÁRIO BENJAMIM BAPTISTA DE SIQUEIRA, DR.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS  
MECANICAS**

**PUBLICAÇÃO: PPGEA.TD-000/00**

**BRASÍLIA/DF: ABRIL - 2023**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DOS BENEFÍCIOS RASTREAMENTO SOLAR POR  
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA DIFERENTES CONDIÇÕES  
CLIMATOLÓGICAS**

**JOSÉ CÉSAR MARTINS DE OLIVEIRA**

**DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Dr. Mário Benjamim Baptista de Siqueira, – ENM/Universidade de Brasília  
Orientador**

---

**Edgar Amaral Silveira – ENM/Universidade de Brasília  
Membro Interno**

---

**Prof. Dr. Eugenia Cornils Monteiro da Silva – Centro de Ensino Unificado de Brasília - CEUB  
Membro Externo**

**BRASÍLIA, 20 DE ABRIL DE 2023.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, M., JOSÉ CÉSAR

ANÁLISE DOS BENEFÍCIOS RASTREAMENTO SOLAR POR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMATOLÓGICAS [Distrito Federal] 2023.

xv, 66p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2023).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica

1. radiação

2. rastreamento

3. geração

4. fotovoltaico

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, M., JOSE CESAR (2023). ANÁLISE DOS BENEFÍCIOS RASTREAMENTO SOLAR POR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMATOLÓGICAS . Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação PPGEA.TD-000/00, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 66p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: José César Martins de Oliveira

TÍTULO: ANÁLISE DOS BENEFÍCIOS RASTREAMENTO SOLAR POR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMATOLÓGICAS .

GRAU: Mestre

ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

José César Martins de Oliveira

Departamento de Engenharia Mecânica (ENM) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil



*É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota:*

*Theodore Roosevelt*

## ACKNOWLEDGMENTS

*Agradeço aos meus irmãos e minha mãe por em muitos momentos me apoiarem e darem suporte para que eu pudesse dispor de tempo para esse trabalho, onde em especial menciono minha irmã Andréa que nunca deixou de estar comigo, sempre disposta a me ajudar, mostrando que é a e melhor de nós, com seu grande coração, amor e carinho.*

*Agradeço também ao meu orientador professor Mario Benjamim Baptista de Siqueira. Um pesquisador de grande conhecimento e sabedoria que me fez espelhar o tipo de pesquisador, professor que desejo ser. Sempre me tratando com respeito, urbanidade e paciência, atendendo todas as dúvidas durante o processo de produção deste trabalho. Um excelente profissional, professor e amigo. Professor Mário os meus agradecimentos por todo apoio e paciência que teve com este discente. Desejo o melhor ao senhor e sua família. Muito obrigado por tudo.*

*Por fim agradeço a toda coordenação da pós -graduação em Ciência Mecânicas, me permitindo conhecer e conviver com professores que possuem meu respeito, admiração e estima pelo alto grau de conhecimento, profissionalismo e compromisso. Os meus mais sinceros agradecimentos. Muito obrigado todos.*

## RESUMO

**Título:** ANÁLISE DOS BENEFÍCIOS RASTREAMENTO SOLAR POR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMATOLÓGICAS

**Autor:** José César Martins de Oliveira

**Orientador:** Mário Benjamim Baptista de Siqueira, Dr.

**Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas**

**Brasília, 20 de abril de 2023**

A busca por fontes renováveis de energia é cada vez mais necessária em um planeta impactado por fatores ambientais. As mudanças climáticas causadas por atividades humanas emissoras de CO<sub>2</sub>, das quais a geração de eletricidade é uma das principais fontes, trazendo graves impactos nos aspectos ambientais, sociais e econômicos da sociedade. Esses fatos demandam melhorias na geração de energia renovável, para a qual a energia solar é um grande aposta, visto que a energia fotovoltaica (PV) é altamente renovável e, atualmente, economicamente competitiva. É bem conhecido que os painéis fotovoltaicos com rastreamento solar são vantajosos. No entanto, não está claro como a climatologia local impacta nesses benefícios. Por exemplo, em locais onde o céu nublado é frequente, haverá pouco aumento na geração de energia devido ao rastreamento solar. Por outro lado, os painéis fotovoltaicos submetidos à alta irradiância solar direta sofrerão alta temperatura na célula, compensando o aumento da radiação solar incidente no painel fotovoltaico promovido pelos dispositivos de rastreamento. A fim de descobrir como as condições meteorológicas locais podem impactar o benefício dos sistemas fotovoltaicos de rastreamento solar, um modelo térmico para um módulo fotovoltaico foi desenvolvido. O modelo é baseado em equações envolvendo a incidência solar para os principais componentes do painel. A radiação solar é contabilizada por seus componentes (direta, difusa e global) e a troca de radiação térmica considera as condições meteorológicas. O termo inercial é negligenciado após trabalhos experimentais anteriores, que mostraram que ele é muito menor do que os termos de transferência de calor por radiação e convecção. A geração de energia fotovoltaica é estimada em função da temperatura da célula fotovoltaica de acordo com a ficha técnica do fabricante. O modelo será aplicado a um módulo fotovoltaico fixo (inclinado com um ângulo correspondente à latitude local) e módulo fotovoltaico de rastreamento solar. As simulações serão realizadas durante um ano inteiro em etapas de hora em hora. Os resultados preliminares para Brasília mostraram um aumento relevante na geração de energia devido ao monitoramento solar, mas altamente sazonal. O modelo será aplicado nas principais cidades do Brasil com diferentes condições climatológicas para entender como o clima local afeta os ganhos na geração de energia com o sistema de rastreamento solar.

**Palavras-chave:** radiação, rastreamento, geração, fotovoltaico.

## **ABSTRACT**

**Title:** ANALYSIS OF THE BENEFITS OF SOLAR TRACKING BY PHOTOVOLTAIC MODULES FOR DIFFERENT CLIMATE CONDITIONS

**Author:** José César Martins de Oliveira

**Supervisor:** Mário Benjamim Baptista de Siqueira, Dr.

**Graduate Program in mechanical sciences**

**Brasília, April 20th, 2023**

The search for renewable energy sources is becoming increasingly necessary on a planet that is impacted by environmental factors. The climate changes caused by CO<sub>2</sub>-emitting human activities, of which electricity generation is a major source, bring severe impacts on environmental, social, and economic aspects of society. These facts urge for improvements in renewable energy generation, for which solar energy is major player, given that photovoltaic (PV) power is both highly renewable and, nowadays, economically competitive. It is well recognized that PV panels with solar tracking is advantageous. However, it is not clear how local climatology impacts these benefits. For instance, in place where cloudy sky is frequent will have little increase in energy generation due to solar tracking. On the other end, PV panels subjected to high direct solar irradiance will experience high cell temperature, offsetting the increase in incident solar radiation at the PV panel promoted by the tracking devices. In order to find out how local meteorological conditions could impact the benefit of solar tracking PV systems, a thermal model for a PV module was developed. The model is based on equations involving solar incidence for the main components of the panel. Solar radiation is accounted by its components (direct, diffuse, and global) and thermal radiation exchange considers meteorological conditions. Inertial term is neglected following previous experimental work, which showed that it is much smaller than radiation and convection heat transfer terms. PV power generation is estimated as a function of temperature of the PV cell according to manufacture datasheet. The model will be applied to a fixed PV (inclined with an angle correspondent to local latitude) and solar tracking PV module. Simulations will be performed for a whole year in hourly time steps. Preliminary results for Brasilia have shown a relevant increase in power generation due to solar tracking but highly seasonal. The model will be applied to major cities in Brazil with different climatological conditions to understand how local climate affects the gains in power generation as a result of the solar tracking system

**Keywords:** radiation, tracking, generation, photovoltaic.

## SUMÁRIO

---

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2	OBJETIVOS .....	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>8</b>
3.1	RADIAÇÃO SOLAR .....	8
3.2	POSIÇÃO DO SOL.....	10
3.3	CÉLULA SOLAR .....	14
3.4	PAINEL SOLAR .....	15
3.5	CLIMA NO BRASIL .....	19
<b>4</b>	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA</b> .....	<b>27</b>
4.1	GEOMETRIA SOLAR .....	27
4.1.1	RADIAÇÃO DIRETA E DIFUSA .....	29
4.1.2	MODELO PARA PAINEL FIXO .....	31
4.1.3	MODELO PARA O PAINEL COM RASTREAMENTO .....	31
4.1.4	POTÊNCIA GERADA, TEMPERATURA DO PAINEL EM OPERAÇÃO .....	31
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>33</b>
5.1	DADOS INMET .....	33
5.2	MODELO DE PAINEL .....	33
<b>6</b>	<b>DADOS OBTIDOS E ANÁLISE</b> .....	<b>35</b>
6.1	PARÂMETROS INICIAIS.....	35
6.2	MODELO ANUAL IRRADIÂNCIA E POTÊNCIA FORNECIDA .....	36
6.3	ANÁLISE BRASÍLIA .....	37
6.3.1	MÉDIA MENSAL ENERGIA FORNECIDA E IRRADIÂNCIA PARA BRASÍLIA .....	41
6.3.2	EFICIÊNCIA DE GERAÇÃO PARA BRASÍLIA .....	42
6.4	ANÁLISE PORTO ALEGRE .....	43
6.4.1	MÉDIA MENSAL ENERGIA FORNECIDA E IRRADIÂNCIA PARA PORTO ALEGRE.....	47
6.4.2	EFICIÊNCIA DE GERAÇÃO PARA PORTO ALEGRE .....	48
6.5	ANÁLISE MANAUS .....	49

6.5.1	MÉDIA MENSAL ENERGIA FORNECIDA E IRRADIÂNCIA PARA MANAUS .....	52
6.5.2	EFICIÊNCIA DE GERAÇÃO PARA MANAUS .....	53
6.6	ANÁLISE FORTALEZA.....	54
6.6.1	MÉDIA MENSAL ENERGIA FORNECIDA E IRRADIÂNCIA PARA FORTALEZA .....	58
6.6.2	EFICIÊNCIA DE GERAÇÃO PARA FORTALEZA .....	59
6.7	ENERGIA TOTAL GERADA E EFICIÊNCIA ENTRE REGIÕES .....	60
6.7.1	COMPARATIVO ENERGIA TOTAL GERADA .....	60
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>63</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>

## LISTA DE FIGURAS

---

1.1	Emissão de gases efeito estufa por modelo de consumo energético. WRI 2020	2
3.1	Espectro Sol e Corpo Negro, GeoDesign 2023	10
3.2	Movimento de Translação Terrestre. Atlas Solar Brasileiro 2017	11
3.3	Ângulos solares. Atlas Solar Brasileiro 2017	13
3.4	Junção P-N, Oliveira (2008)	14
3.5	Componentes de um painel fotovoltaico, Portal solar (2014)	16
3.6	Ponto de Máxima Potência (GALDINO, 2014)	17
3.7	Curva corrente tensão, fonte autor	19
3.8	Mapa de Clima do Brasil, IBGE 2022	20
3.9	Floresta amazônica, Brasil Escola 2023	21
3.10	Semiárido brasileiro, Brasil Escola 2023	22
3.11	Praia tropical brasileira, Brasil Escola 2023	23
3.12	Serra da Mantiqueira, Brasil Escola 2023	24
3.13	Mata Atlântica, Brasil Escola 2023	25
3.14	Clima Região sul- Geada, Brasil Escola 2023	26
6.1	Irradiância Anual Brasília, fonte autor	36
6.2	Potência Anual Brasília, fonte autor	37
6.3	Irradiância, inverno e verão. Brasília, fonte autor	38
6.4	Potência fornecida. Brasília, fonte autor	39
6.5	Temperatura de operação. Brasília, fonte autor	40
6.6	Média mensal irradiância. Brasília, fonte autor	41
6.7	Média mensal de Energia Fornecida. Brasília, fonte autor	42
6.8	Eficiência de geração. Brasília, fonte autor	43
6.9	Irradiância. Porto Alegre, fonte autor	44
6.10	Energia fornecida. Porto Alegre, fonte autor	45
6.11	Temperatura de operação. Porto Alegre, fonte autor	46
6.12	Média mensal irradiância. Porto Alegre, fonte autor	47
6.13	Média mensal energia fornecida. Porto Alegre, fonte autor	47
6.14	Eficiência de geração. Porto Alegre, fonte autor	48
6.15	Irradiância. Manaus, fonte autor	49
6.16	Potência fornecida. Manaus, fonte autor	50
6.17	Temperatura de operação. Manaus, fonte autor	51
6.18	Média mensal irradiância, inverno e verão. Manaus fonte autor	52
6.19	Média mensal energia fornecida. Manaus, fonte autor	53

6.20	Eficiência de geração. Manaus, fonte autor .....	54
6.21	Irradiância, inverno e verão. Fortaleza, fonte autor.....	55
6.22	Energia fornecida. Fortaleza, fonte autor. ....	56
6.23	Temperatura de operação. Fortaleza, fonte autor.....	57
6.24	Média mensal irradiância, inverno e verão. Fortaleza fonte autor. ....	58
6.25	Média mensal energia fornecida. Fortaleza, fonte autor.....	58
6.26	Eficiência de geração. Fortaleza, fonte autor .....	59
6.27	Energia produzida anualmente por região, fonte autor .....	61



## LISTA DE TABELAS

---

5.1	Especificações do Gerador Fotovoltaico CS6P - 270P .....	34
6.1	Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 18 a 24 de janeiro, Brasília 2014. ....	38
6.2	Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 01 a 07 de julho, Brasília 2014.....	38
6.3	Potência máxima ( $W$ ) fornecida nos dias 18 a 24 de janeiro, Brasília 2014.	39
6.4	Potência máxima ( $W$ ) fornecida nos dias 01 a 07 de julho, Brasília 2014. .	39
6.5	Temperatura máxima ( $^{\circ}C$ ) de operação nos dias 18 a 24 de janeiro, Brasília 2014.....	40
6.6	Temperatura máxima ( $^{\circ}C$ ) de operação nos dias 01 a 07 de julho, Brasília 2014. ....	40
6.7	Valores das áreas abaixo das curvas em kj/dia. mês, Brasília 2014. ....	42
6.8	Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 18 a 24 de janeiro, Porto Alegre 2014.....	44
6.9	Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 01 a 07 de julho, Porto Alegre 2014.	44
6.10	Potência máxima ( $W$ ) fornecida nos dias 18 a 24 de janeiro, Porto Alegre 2014.....	45
6.11	Potência máxima fornecida nos dias 01 a 07 de julho, Porto Alegre 2014..	45
6.12	Temperatura máxima de operação ( $^{\circ}C$ ) nos dias 18 a 24 de janeiro, Porto Alegre 2014. ....	46
6.13	Temperatura máxima de operação ( $^{\circ}C$ ) nos dias 01 a 07 de julho, Porto Alegre 2014.....	46
6.14	Valores das áreas abaixo das curvas kj/dia. mês, Porto Alegre 2014.....	48
6.15	Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 18 a 24 de janeiro, Manaus 2014....	50
6.16	Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 01 a 07 de julho, Manaus 2014. ....	50
6.17	Potência máxima ( $W$ ) fornecida nos dias 18 a 24 de janeiro, Manaus 2014.	50
6.18	Potência máxima ( $W$ ) fornecida nos dias 01 a 07 de julho, Manaus 2014..	51
6.19	Temperatura máxima de operação ( $^{\circ}C$ ) nos dias 18 a 24 de janeiro, Manaus 2014.....	51
6.20	Temperatura máxima de operação ( $^{\circ}C$ ) nos dias 01 a 07 de julho, Manaus 2014. ....	52
6.21	Valores das áreas abaixo das curvas kj/dia. mês, Manaus 2014. ....	53
6.22	Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 18 a 24 de janeiro, Fortaleza 2014..	55
6.23	Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 01 a 07 de julho, Fortaleza 2014.....	55
6.24	Potência máxima ( $W$ ) fornecida nos dias 18 a 24 de janeiro, Fortaleza 2014.....	56
6.25	Potência máxima ( $W$ ) fornecida nos dias 01 a 07 de julho, Fortaleza 2014.	56

6.26	Temperatura máxima de operação (°C) nos dias 18 a 24 de janeiro, Fortaleza 2014.....	57
6.27	Temperatura máxima de operação (°C) nos dias 01 a 07 de julho, Fortaleza 2014.....	57
6.28	Valores das áreas abaixo das curvas kj/dia. mês, Fortaleza 2014. ....	59
6.29	Total de Energia gerada anualmente por região. ....	61

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

### Simbolos Gregos

$\alpha$	Ângulo da altitude solar	[°]
$\beta$	Ângulo de inclinação	[°]
$\delta$	Declinação	[°]
$\gamma_s$	Ângulo de azimute	[°]
$\gamma$	Ângulo de parede-azimute	[°]
$\omega(t)$	Ângulo de hora	[°]
$\phi$	Latitude	[°]
$\theta_z$	Ângulo do zenite	[°]

### Simbolos Latinos

$P_{max}$	Potência máxima	[W]
$A$	Altitude	[km]
$Energia$	Energia gerada	[J]
$G_t(t)$	Radiação total absorvida pelo módulo	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_L$	Corrente foto - gerada	[A]
$I_o$	Corrente de saturação reversa do diodo	[A]
$I_{dh}$	Irradiação direta	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_{dif}$	Irradiação difusa	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_{ext}$	Irradiação extraterrestre	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_{fixo}$	Irradiação no painel fixo	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_{glob}$	Irradiação global	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_{incidente}$	Irradiação no painel	[A]
$I_{max}$	Corrente de potência máxima	[A]
$I_{painel}$	Irradiação no painel	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_{ras}$	Irradiação no painel rastreadável	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_{sc}$	Corrente de curto circuito	[A]
$K$	Constante de Boltzmann	[J/K]
$L$	Longitude	[°]
$L_{lg}$	Longitude local padrão	[°]
$L_{lt}$	Latitude local padrão	[°]
$NOCT$	Temperatura nominal de trabalho da célula	[°C]
$P_{fixo}$	Potência gerada painel fixo	[W]
$P_{ras}$	Potência gerada painel rastreadável	[W]
$R_p$	Resistência em paralelo	[Ω]

$R_s$	Resistência em série	[ $\Omega$ ]
$T_s$	Tempo solar	[h]
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	[ $^{\circ}C$ ]
$T_{hp}$	Horário padrão	[h]
$T_m$	Temperatura operação painel	[ $^{\circ}C$ ]
$V$	Tensão do painel (PV)	[V]
$V_{max}$	Tensão de potência máxima	[V]
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto	[V]
$i(t)$	Ângulo de incidência	[ $^{\circ}$ ]
$q$	Constante de Boltzmann	[ $10^{-19}C$ ]

### **Simbolos Admissionais**

$E$	Parâmetro de correção
$F_{forma}$	Fator de forma
$R_b$	Fator de correção geométrico
$k_t$	Índice de clareza
$n$	Fator de idealidade do diodo
$\beta_{ref}$	Coefficiente de temperatura de potência
$\eta_{ref}$	Eficiência de referência
$\eta$	Eficiência
$\tau$	Transmitância

# 1 INTRODUÇÃO

---

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A busca por fontes de energia renováveis se torna cada vez mais necessária em um planeta cada vez mais impactado por fatores ambientais. Através desta informação, tomando como exemplo claro, é o aumento médio da temperatura do planeta, que afetando o clima e a temperatura média do globo. O fato é que essas mudanças trazem riscos a vida, principalmente a humana, considerando seu viés econômico e social. Portanto é essencial melhorar a eficiência de dispositivos de aproveitamento da energia, principalmente os que aproveitam a energia solar, já que o sol é uma fonte limpa e inesgotável de energia.

Corroborando com a crescente necessidade de energias renováveis, estima - se que as emissões de gases de efeito estufa cresceram em torno de 53% de 1990 até 2019 (Mengpin Ge, 2022 [1]), denotando que o consumo de energia é a maior fonte de emissões de gases de efeito estufa causadas por seres humanos, responsável por 73% das emissões mundiais.

Ainda é relevante mencionar que no setor de energia, a geração de calor e eletricidade é responsável pela maior parte das emissões (15 Gt  $CO_2$  e em 2016, ou 30% do total de emissões de gases de efeito estufa), seguida por transporte (7,9 Gt  $CO_2$  e em 2016, ou 15% do total de emissões) e fabricação e construção (6,1 Gt  $CO_2$  e, ou 12% do total de emissões).

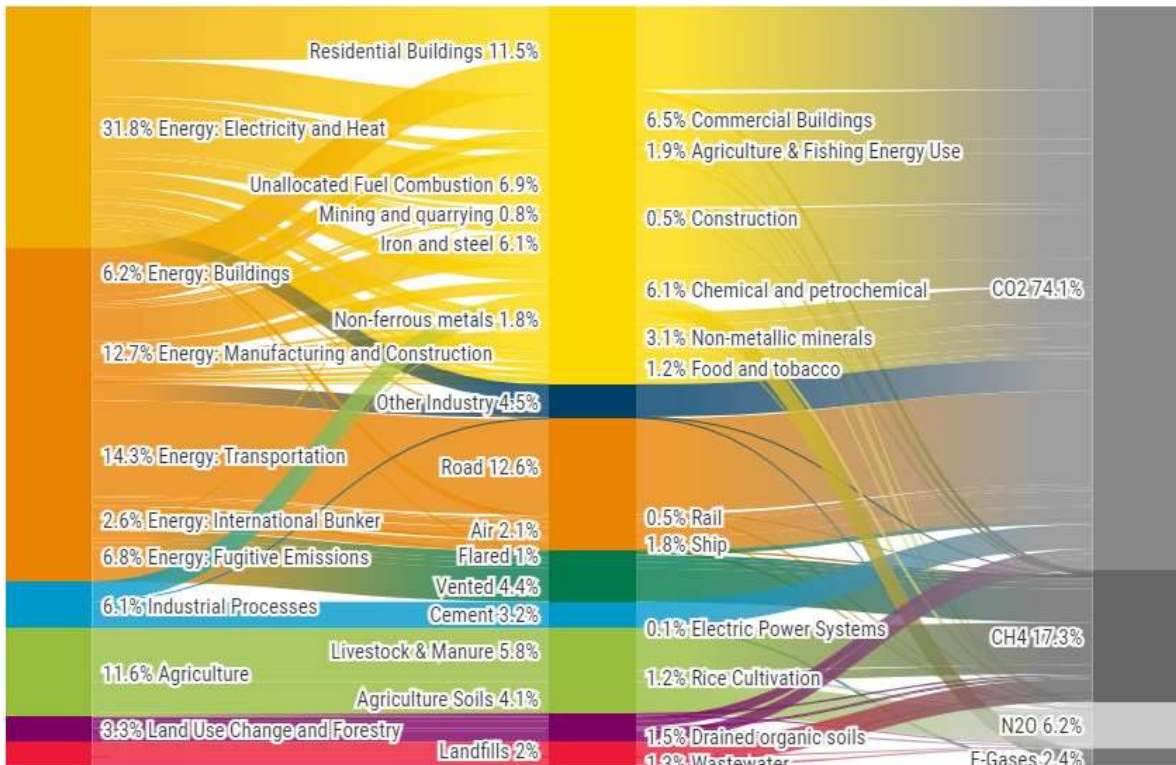


Figura 1.1 – Emissão de gases efeito estufa por modelo de consumo energético. WRI 2020

O Brasil hoje tem potencial para fornecimento de energias renováveis e limpas, onde ressalta - se sua abrangência praticamente continental, com diferentes condições climatológicas e topográficas, as quais influenciam na operação e funcionamento dos mecanismos de obtenção das energias renováveis. Assim, tomando o sol como fonte de energia, importa um estudo sobre a conversão da radiação em energia fornecida pelo painel, considerando as condições de clima de diferentes regiões. Esse entendimento pode permitir escolher as melhores regiões como candidatas a construção de uma usina de conversão de potência elétrica.

Para esse incremento energético é importante verificar os efeitos do aumento da temperatura devido à incidência solar, bem como o rastreamento do sol, os quais são fatores importantes para melhorar a eficiência da produção energética em um painel fotovoltaico.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo é verificar os ganhos na conversão de energia elétrica por painéis fotovoltaicos com rastreamento em relação a painéis fixos em diferentes regiões climáticas no Brasil. Os objetivos específicos a serem atingidos serão:

1. Desenvolver modelo numérico de conversão de radiação em painéis fotovoltaicos que permita levar em consideração o rastreamento solar.

2. Escolher regiões no Brasil com condições climatológicas diferentes para as simulações, para um mesmo período específico.
3. Executar o modelo para painéis fixos e rastreáveis.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Em seu estudo Seme e Štumberger (2016) informa que sol está em movimento contínuo. Sabe-se que o rendimento de produção de energia depende da exposição dos módulos solares para o sol. O rendimento máximo da produção de energia é alcançado quando os raios solares incidem perpendicularmente aos módulos solares. Nesse caso, o uso do sistema fotovoltaico de rastreamento é mais apropriado do que usar o sistema fotovoltaico fixo,[2].

Em relação à absorção de radiação por placas fotovoltaicas, Gern (2002) descreve que, neste sistema, a maioria dos dispositivos fotovoltaicos é formada por junções, onde a luz é absorvida pela excitação do elétron do semicondutor para a banda condutora em um pequeno volume de junção. p - n. Neste ponto, quando a célula solar está em operação e os elétrons excitados na banda condutora fluem para a região p para o lado da região n, onde são deixados orifícios na banda de valência na direção oposta ao fluxo. Um diodo de tensão zero é aplicado ao terminal de equilíbrio que cobre a placa (corpo preto). A cada comprimento de onda acima da faixa de valência, o diodo absorve parte da incidência do corpo negro dada por sua mesma absorção espectral e emite a mesma fração de acordo com a lei de Kirchhoff. Ele demonstrou que a energia fotovoltaica requer a excitação da luz de um elétron para um estado excitado, com alguma maneira de fornecer seletivamente elétrons excitados e substituí-los no estado fundamental. Os processos de recombinação radiativa reversa do estado excitado para o estado fundamental fornecem os limites da eficiência de conversão nesse processo, embora pelo menos duas vezes a eficiência do processo padrão seja possível, em princípio, por extensões a ele.[3]

Para testar os conversores fotovoltaicos, Zhongfu (2017) propõe e vários algoritmos de rastreamento de ponto de potência máxima (MPPT) necessários para capturar a máxima potência de saída possível. O modelo matemático e as características elétricas da fonte fotovoltaica construída foram definidos e analisados em detalhes no artigo. Um sistema de CPV plano em larga escala usando um conjunto de lentes revestidas com espelho com um mecanismo de rastreamento de deslocamento lateral foi projetado e discutido para montagem no telhado como uma alternativa aos painéis fotovoltaicos planos. Os resultados da simulação mostram que o sistema pode atingir uma eficiência óptica de 89,5%. O método de deslocamento solar do rastreamento solar mostra uma tolerância muito alta, permitindo o uso de um sistema de rastreamento menos preciso e dispendioso (como o rastreamento solar passivo baseado em equações de movimento solar conhecidas). Este é o primeiro estudo a usar um conjunto de lentes com revestimento de espelho para um sistema de CPV plano. O sistema proposto é altamente adequado para produção em larga escala e instalação de telhado e mos-



tra grande potencial para sistemas de energia solar em escala comercial e industrial. Estudos futuros irão fornecer ao sistema de CPV plano seu desempenho em condições reais.[4]

As técnicas diretas de rastreamento de potência máxima foram estudadas extensivamente nos últimos anos e muita popularidade ganhou popularidade. Nesse sentido, Amer (2018) propõe um conceito de uso de frequência de perturbação adaptativa em vez de tamanho de etapa variável, com base em diretrizes para o projeto de técnicas de rastreamento direto de pico de potência fixa em etapas fixas. Assim, é proposto o conceito de uso de um algoritmo MPPT com uma frequência de perturbação adaptativa em vez do tamanho da etapa variável comumente usado. O pano de fundo analítico foi apresentado, com base nas diretrizes de projeto recentemente revisadas para o projeto de métodos de rastreamento de ponto direto de potência fixa. Sempre que possível, propõe-se manter o tamanho da etapa no mínimo o tempo todo, aumentando a frequência de perturbação durante transientes e mantendo-a inalterada (igual ao máximo permitido pelas diretrizes de projeto) em estado estacionário. Essa abordagem ajuda a eliminar as principais alterações de fusão durante as alterações de radiação e a prevenção de transientes excessivos causados pela operação com uma etapa de distúrbio aumentada. Resultados preliminares do estudo demonstram a superioridade do método proposto sobre a operação transiente de tamanho de etapa de perturbação adaptativa, obtida sem comprometer o desempenho em estado estacionário. Como apenas o conceito de frequência de perturbação variável é introduzido aqui, ainda restam investigações futuras para produzir diretrizes de projeto abrangentes, derivando o limite inferior do tempo da etapa de perturbação analiticamente com base nos parâmetros do sistema e no comportamento das variáveis ambientais.[4]

Em uma outra perspectiva Heusinger e Georgescu (2020) apresenta um novo modelo de balanço de energia de superfície fotovoltaica de maneira a envolver vários processos geofísicos associados aos sistemas fotovoltaicos, pois esses processos são relevantes para o conforto térmico em face que localização do painel no telhado é generalizada poderia levar a impactos climáticos locais. A abordagem mais simples usada é modificar o albedo do telhado, ou seja o coeficiente de reflexão que é a refletividade, e desse modo a intensidade de reflexão de uma superfície. Para isso o autor propõe um estudo para o balanço de energia a uma superfície de um painel fotovoltaico, considerando sua inclinação e mecanismo de rastreamento solar. Em seu modelo o autor estrutura e as equações de modo que as variáveis mínimas de entrada necessárias para executar o modelo são variáveis meteorológicas que são rotineiramente observadas: temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, pressão atmosférica ou horizontal global radiação. Durante o desenvolvimento de seu estudo o autor demonstra que diferentes tipos de rastreamento e sistemas fotovoltaicos sem rastreamento têm um efeito considerável no TPV ( que é a temperatura do módulo, onde desse modo, os impactos sistemas de rastreamento precisam ser considerados quando a meteorologia os efeitos dos painéis fotovoltaicos são estudados.[5]

O artigo apresentado por Gil-Antonio e Saldivar (2019) propõe a uso de uma estratégia de controle baseada nas propriedades diferenciais de nivelamento do modelo do sistema fotovoltaico para gerencia de melhor forma o MPPT ( Maximum Power Point Tracking). De acordo com os autores um grande desafio nos sistemas fotovoltaicos é lidar com suas características não lineares da relação tensão-corrente I-V que geram um MPP único em a relação potência-tensão P-V. O processo MPPT se torna complicado devido ao fato de que o A relação P-V varia com as condições climáticas. Os métodos MPPT não apenas permitem um aumento no poder entregues pelos sistemas fotovoltaicos à carga, mas também geram uma vida útil mais longa do sistema. Desse modo a fonte de energia do sistema fotovoltaico é constituído por um módulo fotovoltaico, o conversor Boost atua como interface entre o painel solar e a carga, e o controlador MPPT permite alcançar a potência máxima disponível. O fato é que a corrente e a tensão fornecida pelo módulo fotovoltaico são usadas como entradas para o conversor e para o controlador MPPT, que também é alimentado com a tensão de saída do conversor. O sinal de controle médio gerado pelo controlador MPPT é enviado ao conversor. A propriedade do conversor Boost é explorada para projetar um controlador que permita um rastreamento eficaz de o MPP. Simulações numéricas foram realizadas no MATLAB para avaliar a eficácia da lei de controle baseada contra variações repentinas de condições climáticas e cargas consideradas em quatro casos de estudo. Para todos eles, a potência máxima teórica foi atingida; pode-se concluir que as variações repentinas de temperatura, irradiância solar e carga não degradam o desempenho da técnica MPPT proposta. Além disso, foi demonstrado que a técnica baseada no nivelamento apresenta algumas vantagens em relação a outros métodos. Ainda testes experimentais foram conduzidos em um protótipo do sistema que consiste em um painel fotovoltaico Virtus II JC250M-24 / Bb. Durante os testes foi observado que a temperatura não é uniforme na superfície do painel fotovoltaico. Diferenças de mais de 5°C C foram encontradas em diferentes seções do painel fotovoltaico. Como resultado, o MPP teórico é desconhecido, onde apesar disso a técnica do controlador baseado em trabalhos em um plano permite fornecer toda a energia disponível do painel fotovoltaico para a carga.[6]

Segundo Naghmasha e Armghana (2018) os painéis fotovoltaicos possuem baixa eficiência e para aumentar sua eficiência (potência de saída de PV / máximo potência do PV), eles devem operar no ponto de potência máximo, e nesse sentido rastrear o MPP( maximum power point) é a parte mais importante de um sistema fotovoltaico. O rastreamento solar é importante para minimizar as perdas, e com isso fornecendo o MPPT( maximum power point tracking), onde em quase todas as técnicas de MPPT, o rastreamento tem por objetivo tensão máxima e aou a corrente máxima na qual o módulo Fotovoltaico fornecerá energia máxima. O MPP depende das condições climáticas isto é temperatura e irradiância.No artigo apresentado pelos autores, é proposto um controlador de backstepping não linear para MPPT. O controlador proposto usa plano de regressão para gerar uma tensão de referência e rastreia o MPP usando buck-boost não invertido conversor. Para melhorar o uso um contro-

lador não linear baseado em backstepping foi projetado para rastrear o MPP de um sistema fotovoltaico. O painel fotovoltaico é conectado ao a carga através de um conversor de inversão de impulso não invertido. Para obter o máximo potência do painel fotovoltaico, ciclo de trabalho do sistema de impulso não invertido O conversor é controlado através do qual a tensão de saída do painel fotovoltaico é rastreado para a referência de tensão gerada pelo plano de regressão. É mostrado que o controlador teve um bom desempenho sob a variação abrupta das condições ambientais, mostrando a robustez do controlador. A comparação com o perturbar e observar técnica e controlador lógico difuso é feita, o que mostrou que a proposta controlador teve melhor desempenho durante a variação na irradiância e níveis de temperatura. Embora o controlador proposto tenha alcançado com sucesso os objetivos, ele depende do plano de regressão para seus valores de referência, o qual precisa ser atualizado devido a o envelhecimento ou qualquer tipo de mau funcionamento no painel fotovoltaico. [7]

Importante também apresentar que SKOPLAKI e PALYVOS (2009) abrem uma discussão sobre a temperatura operacional de células/módulos solares e seu efeito sobre o desempenho elétrico de instalações fotovoltaicas. Mencionam que esta temperatura desempenha um papel central no processo de conversão fotovoltaica, bem como na potência de saída de um módulo fotovoltaico, os quais dependem linearmente desta temperatura. Os autores relatam ainda que é interessante observar se a eficiência elétrica ou energia perdida podem ser compensadas pela energia térmica rejeitada. Demonstram que se uma baixa carga térmica de entalpia existe, convém aceitar as perdas de eficiência e utilizar diretamente o calor rejeitado por meio de uma bomba de calor, ao invés de melhorar a eficiência elétrica do módulo.[8]

Segundo GARCÍA ( 2004) sistemas para a geração de eletricidade como a radiação solar e o vento podem ser complementares, podendo serem empregadas em uma combinação eólica e fotovoltaica. O autor denota que os sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos em algumas aplicações mostram vantagens em relação aos sistemas individualizados. É apresentado modelos matemáticos de todos os componentes do sistema, assim como as principais configurações aos sistemas híbridos, indicando resultados do programa de simulação a uma estimativa dos sistemas localidades de Rio Grande do Sul, a partir da dados do Atlas Eólico do Estado. O autor montou um protótipo constituído um um painel de 420 Wp e de um aerogerador de 400 W de potência nominal, onde, para o acionamento do aerogerador, foi instalado um túnel de vento. Menciona que o sistema híbrido experimental comprovou a viabilidade da dinâmica da combinação eólico- fotovoltaica, pois os geradores fornecem energia e os excedentes dos momentos de são armazenados no banco de baterias. Durante o período de ensaio foi gerado em torno do 50% da demanda, revelando as vantagens da integração de sistemas eólicos e fotovoltaicos para o aproveitamento mais eficiente dos recursos energéticos.[9]

# 3 REFERENCIAL TEÓRICO

---

A radiação solar extraterrestre, ao chegar nas primeiras camadas da atmosfera, sofre processos de reflexão, refração e absorção. Esse mecanismo leva a radiação incidente nesta camada ser dividida entre radiação direta e radiação difusa, e ainda por consequência a radiação refletida na superfície.

Assim, devido aos diferentes fatores que afetam a disponibilidade do recurso solar na superfície terrestre é necessário a determinação da quantidade de irradiância, para o seu uso apropriado em sistemas de geração de energia, arquitetura, engenharia e agricultura, dentre outros.

O fato é que para ser possível aproveitar essa fonte inesgotável de energia se torna imprescindível o entendimento sobre as variações posição do sol, bem como o impacto do movimento de translação e rotação da Terra ao redor desta estrela. Ainda importa entender como o comportamento da radiação solar ao atingir a superfície terrestre.

## 3.1 RADIAÇÃO SOLAR

Ante a terra como berço a vida, pode – se inferir que o sol é uma fonte primaria para a vida no planeta. Para fornecer a energia necessária o sol, como estrela, emite radiação por meio de ondas eletromagnéticas, com amplo espectro de comprimentos de ondas.

Desse modo a radiação, ao chegar nas primeiras camadas da atmosfera, sofre processos de reflexão, refração e absorção, levando a essa radiação incidente ser dividida entre radiação direta e radiação difusa, complementando com a radiação refletida na superfície. Devido aos diferentes fatores que afetam a disponibilidade do recurso solar na superfície terrestre a determinação da quantidade de irradiância solar incidente é primordial para seu uso apropriado em sistemas de geração de energia.

Como já mencionado, para aproveitar essa fonte inesgotável de energia é preciso a compreensão de suas variações de posição e deslocamento, bem como o impacto do movimento de translação e rotação da Terra ao redor desta estrela. Ainda compreender como é o processo do mecanismo da radiação solar ao atingir a superfície terrestre. No geral a radiação global pode ser dividida em três partes como mostrado a seguir.

- **Radiação direta:** Recebida do sol e sem espalhamento provocado pela atmosfera;
- **Radiação difusa:** Recebida do sol após o espalhamento provocado pela atmosfera;
- **Radiação refletida:** refletida pela superfície terrestre e/ou por objetos na superfície.

Além disto, conforme designa se fluxo de potência ou energia se utilizam as denominações:

- **Irradiação:** Se traduz na radiação incidente em intervalo de tempo específico;
- **Irradiância:** É a taxa da radiação incidente por unidade de tempo e de área, representada pela letra  $G$  e em  $W/m^2$ .

Como estrela reinante no sistema solar, o comportamento da radiação solar extraterrestre se assemelha a distribuição espectral de um corpo negro. Denota - se que a medida que a radiação permeia pela atmosfera, parte dela é absorvida por gases com bandas de absorção específicas e a radiação adicional é redistribuída pelo espalhamento de Raleigh. A Fig.3.8 apresenta o espectro de onda da radiação solar.

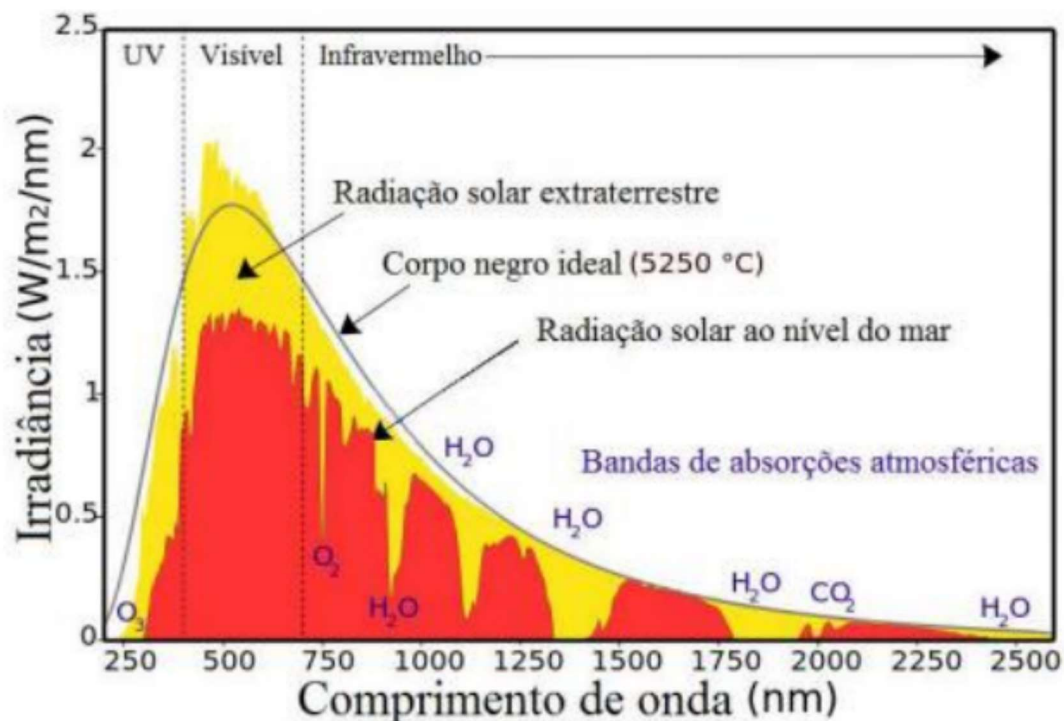


Figura 3.1 – Espectro Sol e Corpo Negro, GeoDesign 2023

Por meio de vários processos de medição e monitoramento já realizados tem sido demonstrado que a radiação extraterrestre possui uma média  $1367 \text{ W/m}^2$ , chamada de constante solar, sendo irradiância solar recebida em uma superfície perpendicular à direção de propagação da radiação, que esteja localizada à distância média entre Terra e Sol e fora da atmosfera.

### 3.2 POSIÇÃO DO SOL

Toda a massa energética promovida por meio do processo de emissão de radiação solar que incide na superfície terrestre acaba por alimentar os processos térmicos e dinâmicos que ditam a vida no globo. Neste aspecto é vantajoso captar o máximo possível dessa energia para o uso humano, já que o impacto ambiental é mínimo. Assim, um avanço significativo foi conseguido nas últimas décadas tanto no aproveitamento térmico para atendimento de

demandas residenciais ou processos industriais, quanto para conversão em eletricidade.

O posicionamento da terra em relação ao sol é um dos fatores definidores de como dispor deste do recurso energético. Portanto primeiramente é importante entender a órbita terrestre ao redor de sua estrela e seu posicionamento. A Terra orbita o Sol a uma distância média de cerca de 150 milhões de quilômetros, completando um ciclo a cada 365,25 dias solares, variando a distância durante a translação. Disso resulta que a radiação extraterrestre varia entre 1.325 W/m<sup>2</sup> e 1.412 W/m<sup>2</sup>, tirando – se assim um valor médio de irradiância solar em torno 1.366 W/ m<sup>2</sup>.

A radiação incide em qualquer lugar da superfície terrena se comunica com a variabilidade temporal característica relativa ao ciclo anual de traslação e em decorrência da inclinação em 23,45 graus do eixo axial da Terra com relação ao plano orbital. Esses fatores relacionados correspondem como as estações do ano acontecem.

Portanto, já supramencionado, as estações são determinadas pelos equinócios e solstícios, ondem ocorrem a maior declinação em latitude medida a partir do Equador, e os equinócios, no instante qual ocorre o cruzamento da órbita ante ao Equador terrestre. Desta informação, conforme demonstrado na Fig. 3.2, verifica – se que verão no hemisfério Sul ocorre quando o polo Sul está voltado para o Sol. O inverno ocorre quando o polo Sul está voltado para a direção oposta à do Sol. Ainda a radiação solar incide no equinócio com a mesma intensidade sobre os dois hemisférios.[10]



Figura 3.2 – Movimento de Translação Terrestre. Atlas Solar Brasileiro 2017

Mediante esses conceitos é certo de que a incidência da radiação na superfície terrestre ou em um determinado plano impactam na geração ou perda de energia. Considerando o movimento de translação e rotação terrestre é inerente dizer que uma formulação matemática por meio de ângulos geométricos pode descrever esse fenômeno, sendo uma ferramenta salutar no seu entendimento.

Portanto os parâmetros da radiação solar são descritas como as funções geométricas da Terra em relação à Sol. Ângulos geométricos básicos que descrevem a posição do sol, dentre os quais defini – se: latitude ( $\phi$ ), longitude (L), declinação ( $\delta$ ) e ângulo da hora , ( $\omega$  (t)). Derivam deles: o ângulo do zênite ( $\theta_z$ ), ângulo da altitude solar  $\alpha$ , ângulo de azimute ( $\gamma_s$ ). A radiação solar incidente pode ser descrito precisamente com três variáveis adicionais, que são: superfície ângulo de inclinação ( $\beta$ ), ângulo de parede-azimute ( $\gamma$ ) e o ângulo de incidência (i(t)). A Fig 3.10 apresenta geometricamente este processo.



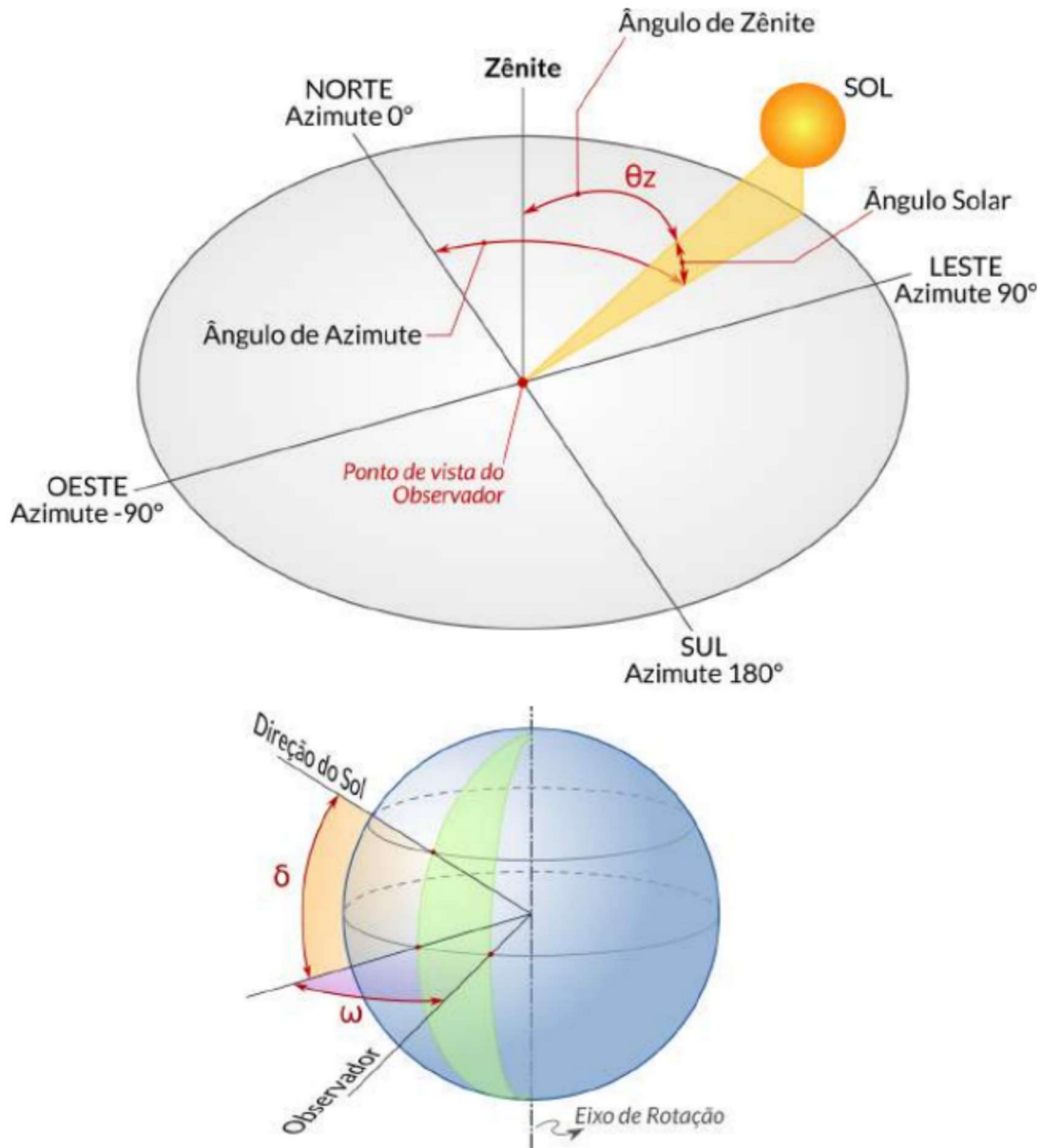


Figura 3.3 – Ângulos solares. Atlas Solar Brasileiro 2017

Por definição o ângulo horário solar  $\gamma(t)$  faz referência movimento angular do Sol devido à rotação da Terra, variando varia entre  $-180^\circ$  e  $+180^\circ$ , com a correspondência de  $015^\circ$  de variação, convencionando – se valor positivo pela manhã e negativo a tarde.

Também defini – se o ângulo zenital solar ( $\theta_z$ ) representa o ângulo formado entre a vertical no ponto de observação e a direção da linha que liga o mesmo ponto da superfície da Terra ao Sol, variando de 0 a  $90^\circ$ . Ele é encontrado por meio dos valores da latitude do local, a declinação solar e o ângulo horário solar.

Por fim, o ângulo azimutal do Sol é o ângulo formado entre a linha de projeção da direção

do Sol no plano horizontal com o meridiano do observador. Seu valor pode variar entre  $-180^\circ$  e  $+180^\circ$ , sendo positivo no sentido horário a partir da direção Norte Geográfico no meridiano local.

### 3.3 CÉLULA SOLAR

Como já difundido no meio científico as células fotovoltaicas são compostas por materiais semicondutores, que modificados que criam um campo elétrico, permitindo o fluxo de uma corrente elétrica. Quando impactada por uma radiação incidente elétrons são excitados 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. Nesse momento surge a junção dos materiais distintos produzindo um semicondutor P-N, deslocando os elétrons para a região N e as lacunas para a região P, gerando um campo elétrico interno ( $V_0$ ) na presença da luz solar.[11]

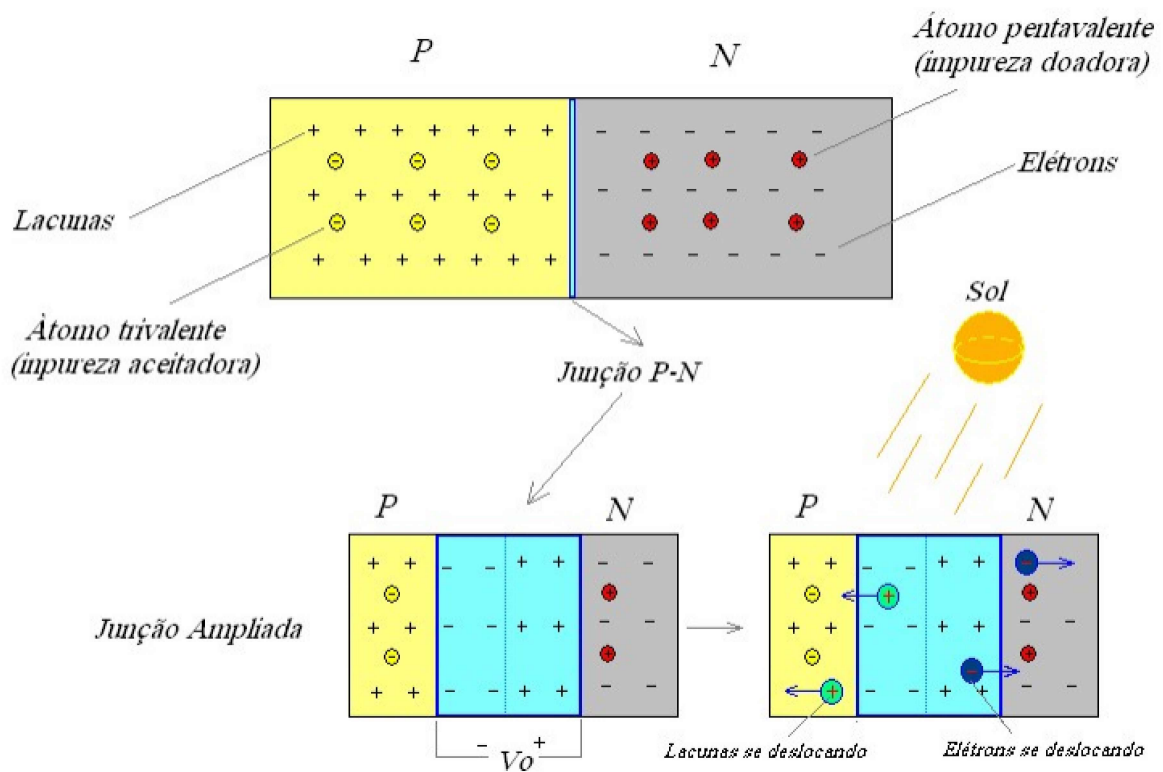


Figura 3.4 – Junção P-N, Oliveira (2008)

No processo de desenvolvimento das células solares o silício do tipo P era preferido,

e com isso o processo de produção desenvolveu-se rapidamente por causa de sua grande tolerância a danos causados pela radiação cósmica, que o tornava ideal para aplicações aeroespaciais.

O que difere os silícios P e N é o processo de dopagem na fabricação do lingote com o qual os wafers são fabricados. Os wafers são bolachas de silício que irão se transformar em células fotovoltaicas posteriormente. As células tradicionais são fabricadas com wafers do tipo P, enquanto as células do tipo N são fabricadas com wafers de silício do tipo N.

No entanto, mais recentemente a busca por módulos fotovoltaicos mais eficientes voltou os olhares do mercado para o silício do tipo N, que do ponto de vista da aplicação, apesar de mais complexa, possui vantagens significativas sobre o silício do tipo P.

A característica mais importante do silício do tipo N é a maior vida útil dos portadores (elétrons livres), causada principalmente pela ausência do conhecido efeito do boro-oxigênio, que provocam a redução da eficiência da célula fotovoltaica com a exposição à luz. A vida útil dos portadores está diretamente relacionada à eficiência de uma célula fotovoltaica. Essa é a razão fundamental por trás do fato de que os módulos de maior eficiência disponíveis no mercado hoje empregam células do tipo N.

### **3.4 PAINEL SOLAR**

Em uma estrutura de um painel as células são condicionadas na maioria dos equipamentos em série, formando assim os módulos. Como elemento constituinte, as células são agrupadas em série para formar os módulos e estes são agrupados em matrizes (arrays) para aumentar a produção fotovoltaica. A estrutura geralmente usada na construção do módulo fotovoltaico é apresentada na Fig 3.12.

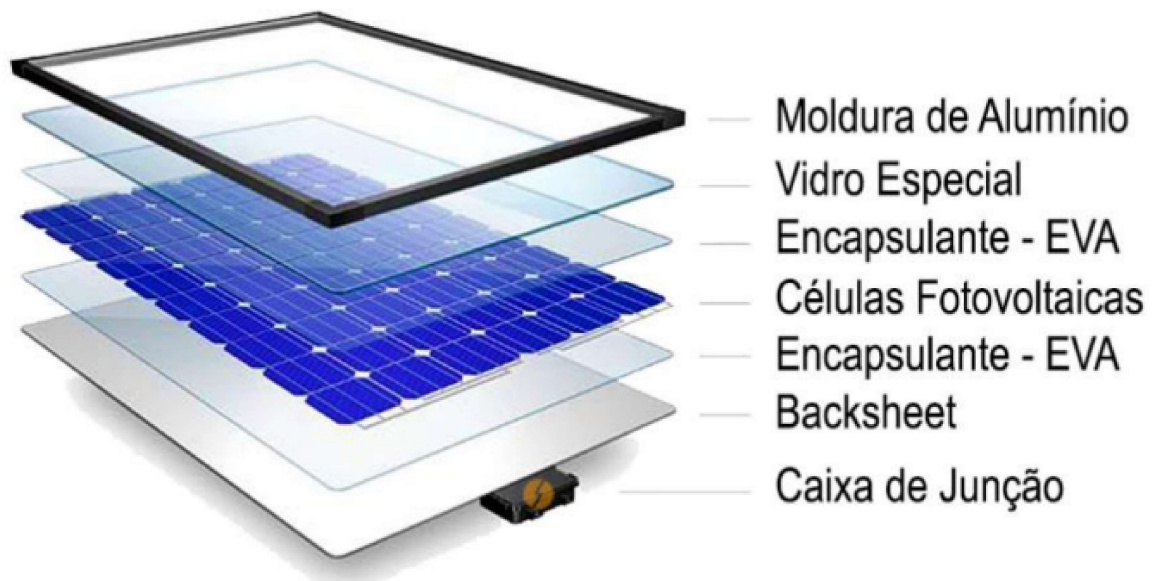


Figura 3.5 – Componentes de um painel fotovoltaico, Portal solar (2014)

Os painéis podem ser conectados em série ou em paralelo, sendo que a primeira opção aumenta a tensão do conjunto e a segunda aumenta a corrente elétrica gerada. O formato matricial é comum nas instalações, com vários módulos ligados em série e estes conjuntos interligados em paralelo.[12]

Para gerar potência útil é necessário coexistir tensão entre os terminais e corrente atravessando. No entanto, as variações atmosféricas interferem nos valores de tensão e corrente, que são correlacionadas entre si. Uma mudança na insolação produz uma variação na corrente elétrica e uma alteração de temperatura gera uma variação na tensão entre os terminais. Para análise e verificação da Curva de corrente potência, bem como potência por, devem ser considerados os seguintes parâmetros são importantes para esse entendimento.

**Corrente de Curto Circuito ( $I_{sc}$ )** : É a máxima corrente que um módulo pode produzir sob determinadas condições de isolamento e temperatura, quando seus terminais são curto – circuitados.

**Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )** : Quando os terminais estiverem abertos é a máxima tensão que pode ser obtida sob determinadas condições de isolamento e temperatura.

**Corrente de potência máxima ( $I_{max}$ )** : Corrente elétrica fornecida no ponto de potência máxima a ser obtida sob determinadas condições de isolamento e temperatura. Corrente nominal.

**Tensão de potência máxima ( $V_{max}$ )** : Tensão máxima fornecida no ponto de potência

máxima a ser obtida sob determinadas condições de isolamento e temperatura.

**Potência máxima ( $P_{max}$ )** : Potência máxima fornecida no ponto de potência máxima a ser obtida sob determinadas condições de isolamento e temperatura.

Considerando essas informações é apresentado a seguir a Fig 3.13, a qual mostra a curva corrente por tensão e a curva potência por tensão.[13]

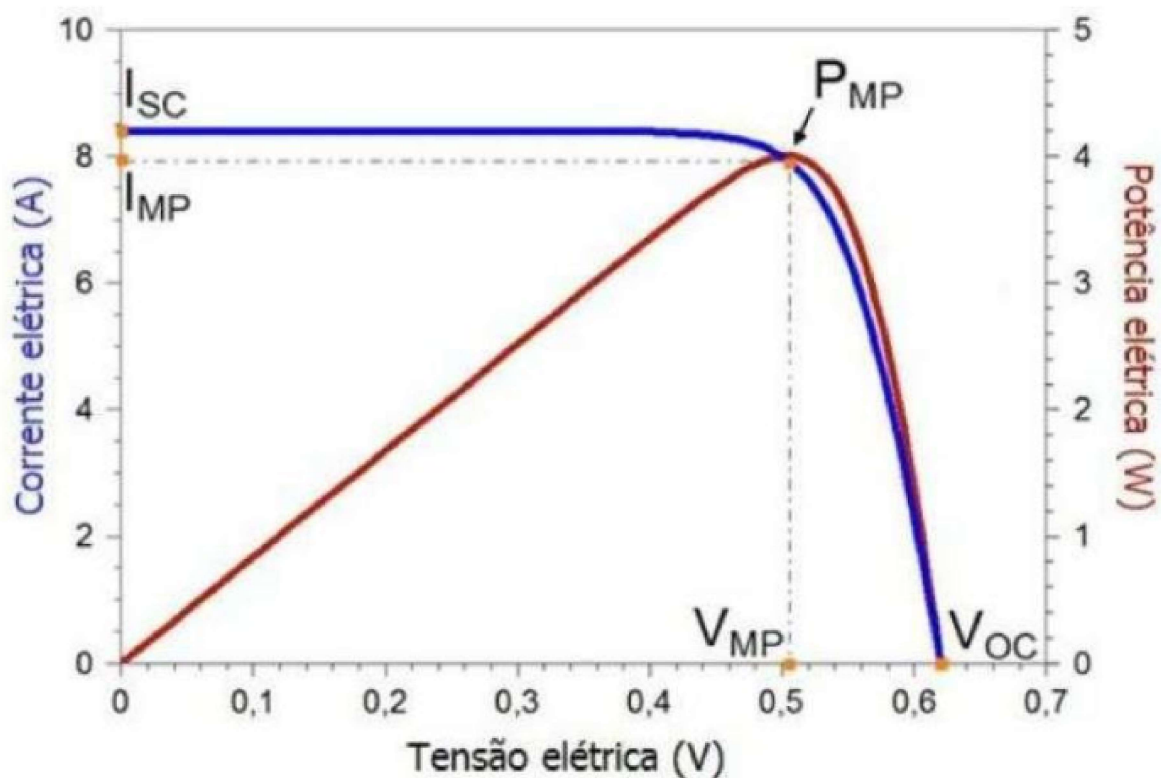


Figura 3.6 – Ponto de Máxima Potência (GALDINO, 2014)

A construção da curva indicada na Fig 3.13 foi realizada por meio da Eq. apresentada a seguir.

$$I = I_L - I_o[\exp((q(V + R_s I)/nkT) - 1) - (V + R_s I)/R_p] \quad (3.1)$$

- $I_L$  Corrente foto-gerada
- $I_o$  Corrente de saturação reversa do diodo
- $R_s$  Resistência em série
- $V$  Tensão do PV

- $R_p$  Resistência em paralelo
- $n$  fator de idealidade do diodo, entre 1 e 2
- $k$  Constante de Boltzman
- $q$  Carga do elétron
- $T$  Temperatura de operação em Kelvin

Como demonstrado a temperatura tem impactos significativos nas variações de corrente e tensão, e em consequência nas variações da potência fornecida e na eficiência do módulo conforme equações a seguir.

- Potência máxima

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (3.2)$$

- Eficiência

$$\eta = P_m / (R_{ad} \cdot Area) \quad (3.3)$$

- Fator de Forma

$$F_{forma} = P_m / (V_{oc} \cdot I_{sc}) \quad (3.4)$$

A incidência de radiação solar e a variação da temperatura ambiente implicam na temperatura de operação das células, influenciando significativamente em uma queda de tensão, consequentemente na energia fornecida e na eficiência do módulo. A Fig. 3.14 demonstra o efeito da temperatura em uma curva corrente tensão.

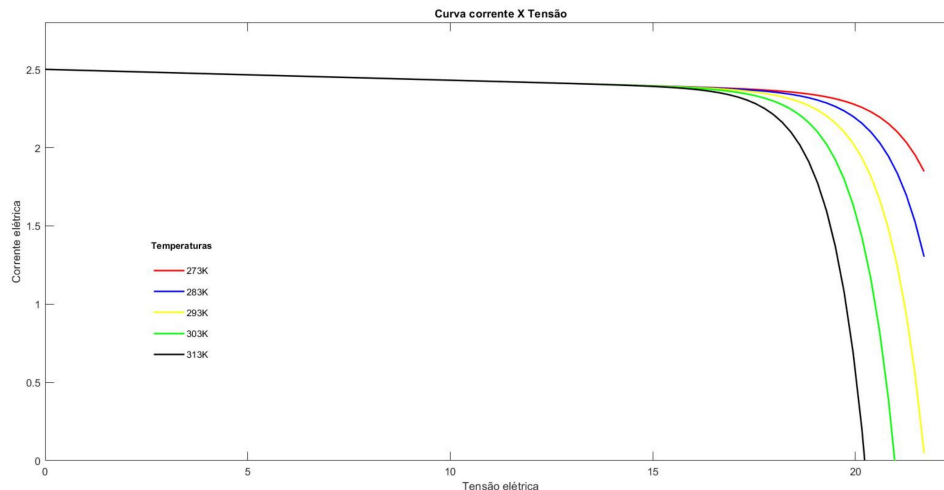


Figura 3.7 – Curva corrente tensão, fonte autor

Por meio desta imagem fica claro quanto maior a temperatura de operação no painel, menor será a tensão e potência fornecida.

### 3.5 CLIMA NO BRASIL

Considerando assim o comportamento operacional de um painel fotovoltaico, importa entender como aspectos climatológicos e regionais influenciam na geração de potência e produção de energia, e por consequência nos trabalhos de uma usina.

Nesse aspecto o Brasil é um país de interesse para este tipo de estudo, pois suas dimensões continentais permitem diferenças climáticas, e geológicas em todo o seu território. É possível permear por uma região de clima equatorial no norte, a um clima de semiárido no nordeste e ao clima de temperado ao sul.

O entendimento das condições climatológicas é salutar para a melhor eficiência na produção de potência elétrica quanto a utilização de painéis solares. Como já é sabido o aumento da temperatura ou sua diminuição, bem como o incremento da radiação incidente, influenciam significativamente na eficiência de produção energética nos painéis, importa assim entender como cada região tem influência no fomento de potência elétrica. A Fig.3.8 Apresenta o mapa de clima do Brasil obtido no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, para os diversos climas brasileiros[14].



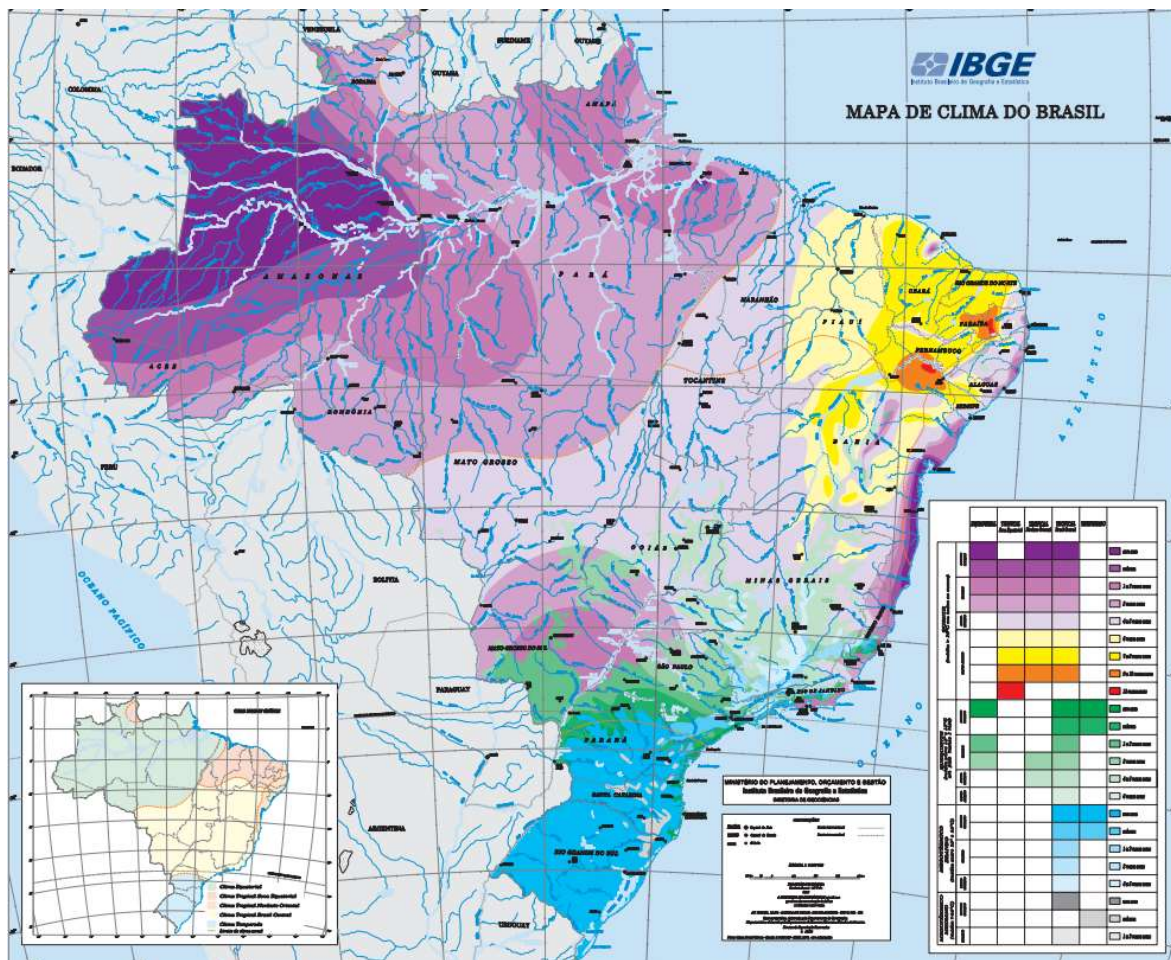


Figura 3.8 – Mapa de Clima do Brasil, IBGE 2022

Observa - se que em torno de 93% do território nacional está localizado no Hemisfério Sul, significando assim que o Brasil se encontra na zona intertropical do planeta, onde são identificados diversos tipos de climas como o equatorial, tropical, tropical de altitude, tropical úmido, semiárido e subtropical (ou temperado).

### 1. Clima Equatorial.

Devido a presença da Floresta Amazônica, esta região possui bastante umidade, com um clima bastante quente e úmido, possuindo médias pluviométricas no geral bastante elevadas, definindo - se ainda ausência de períodos de seca ou estiagem. Denota - se que as temperaturas são bastantes elevadas durante todo o ano, com baixa variação de um período a outro, tendo portanto baixa amplitude térmica. Essas condições são Típicas da região Norte, abrangendo os estados do Amazonas, Pará e parte de Roraima, Rondônia, Acre, Maranhão e Mato Grosso.





Figura 3.9 – Floresta amazônica, Brasil Escola 2023

## 2. Clima Semiárido

O clima semiárido ocorre basicamente em parte da região Nordeste do país, abrangendo o leste do Piauí, sudoeste do Ceará, norte da Bahia e uma parcela ou todo o oeste dos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe. As características principais e mais marcantes desse tipo de clima são a baixa umidade e o longo período em que há um baixo ou nenhum registro de chuvas, podendo se estender dos meses junho a dezembro. Verifica-se a pluviosidade anual varia na faixa de 250 mm a 750 mm. Outro fator inerente nesse tipo climatologia é que de certa maneira observa-se que as chuvas não ocorrem de forma totalmente homogênea no território mencionado. Essa é uma das principais razões pelas quais a área de abrangência do semiárido é conhecida como Polígono das Secas. Além da escassez, esse tipo climático é marcado pelas elevadas temperaturas durante o ano, variando entre 25 °C e 27 °C. Tais valores podem cair quando massas de ar frio chegam à região, as quais provocam também chuvas.



Figura 3.10 – Semiárido brasileiro, Brasil Escola 2023

### 3. Tropical

O clima tropical, por vezes chamado também de tropical típico, abrange quase todas as regiões do Brasil. Está presente em todo o Centro-Oeste, exceto no norte do Mato Grosso, em parte da região Nordeste, no Sudeste, abrangendo São Paulo e Minas Gerais, na região Sul, na porção noroeste do Paraná, e também em uma pequena porção de Roraima, no Norte. Caracteriza-se pela presença marcante de duas estações do ano. Uma delas é quente e úmida, que se estende de dezembro a março e ocorre por influência do avanço de massas de ar úmidas (Equatorial e Tropical Atlântica), ao passo que a outra, o inverno, apresenta temperaturas mais amenas e tempo seco.



Figura 3.11 – Praia tropical brasileira, Brasil Escola 2023

(a) Tropical de altitude

O clima tropical de altitude ocorre nos planaltos elevados da região Sudeste do Brasil, predominando em terrenos localizados acima de 800 metros de altitude nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo, Goiás. Assemelha-se ao clima tropical típico, com uma estação do ano quente e úmida, que é o verão, e outra fria e seca, estendendo-se de março a setembro aproximadamente. Durante os meses correspondentes ao inverno, sob a influência de massas de ar frias, registra-se em algumas localidades a ocorrência de geadas. Os verões são mais amenos que no clima tropical típico, mas são bastante chuvosos, principalmente nos meses de dezembro e janeiro





Figura 3.12 – Serra da Mantiqueira, Brasil Escola 2023

(b) Tropical atlântico

Conhecido também como litorâneo úmido, ocorre no litoral leste brasileiro, compreendendo estados do Nordeste até o Sul do país. Sobre forte influência da maritimidade e das massas Equatorial Atlântica e Tropical Atlântica, esse clima é caracterizado pelo alto teor de umidade e grande volume pluviométrico nos locais onde ocorre, onde o período chuvoso corresponde aos meses de outono e inverno.



Figura 3.13 – Mata Atlântica, Brasil Escola 2023

(c) Subtropical (Temperado)

No inverno, algumas cidades da região Sul do Brasil, onde ocorre o clima subtropical, registram frios intensos, geada e até mesmo neve. O clima subtropical ocorre nas terras situadas abaixo do Trópico de Capricórnio, portanto, na porção do território nacional situada na Zona Temperada Sul do planeta, que corresponde aos estados da região Sul, ao sudeste de São Paulo e à porção meridional do Mato Grosso do Sul. Os verões, entretanto, podem registrar temperaturas bastante elevadas. No inverno, entretanto, há o registro de geadas e, em determinadas localidades, precipitação na forma de neve



Figura 3.14 – Clima Região sul- Geada, Brasil Escola 2023



# 4

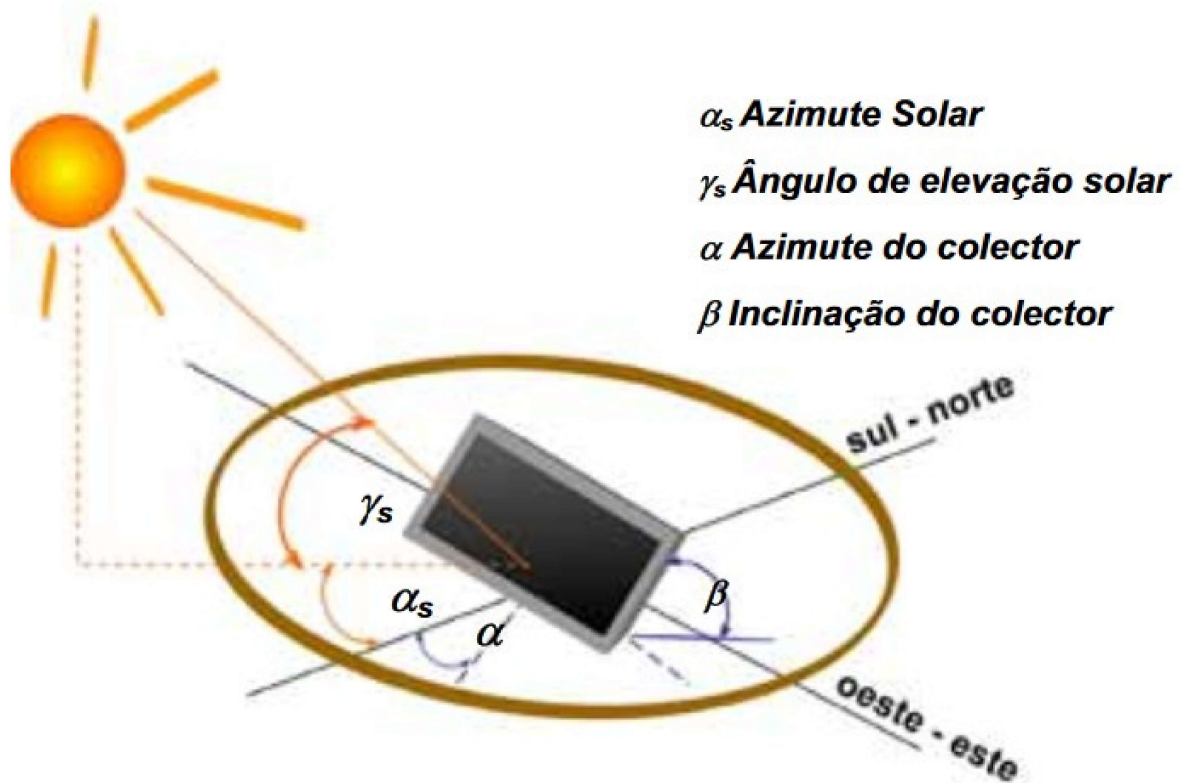
## MODELAGEM MATEMÁTICA

---

Ao observar que a intensidade da radiação solar está diretamente relacionada à posição do Sol em relação a um observador ou determinado plano na superfície terrestre, conceitos geométricos serão salutar para demonstrar a radiação incidente nesta superfície. Portanto a interdependência entre a irradiação e a superfície pode ser descrita através de diversos ângulos que caracterizam a posição solar e a orientação da superfície em análise. Considerando deste modo que já fora supramencionado ressalta – se que o modelo matemático proposto o abordará o conceito de geometria solar, onde serão apresentados ângulos que definem sua posição, bem como as características da radiação solar Sol, considerando sua intensidade e os efeitos sofridos ao atravessar as camadas da atmosfera. Dessa forma, para a melhor compreensão da estimativa do recurso solar, tais conceitos serão abordados nos tópicos a seguir.

### 4.1 GEOMETRIA SOLAR

Como mencionado, para o rastreamento solar, será necessário estabelecer ângulos trigonométricos da incidência da radiação solar em relação à placa fotovoltaica.



Ângulos Solares. Energia fotovoltaica, manual sobre tecnologias (2004)

No processo de simulação ou modelagem no painel fixo ou rastreador é salutar, além da incidência da radiação solar, o entendimento de vários outros elementos, os quais são indispensáveis para esse tipo de análise. Para isso a utilização primeiramente dos ângulos solares, sendo assim, como já mencionado, definidos como zênite  $\theta_z$ , azimute ( $\gamma_s$ ), ângulo de hora ( $\omega$ ), declinação ( $\delta$ ), ângulo de incidência ( $\theta$ ), declive  $\beta_s$  e a latitude ( $\phi$ ). Esses ângulos são importantes por que permitem relações geométricas do painel solar em relação a radiação a que ele é incidido, seja este plano fixo ou em rastreamento a trajetória do sol. As principais funções dos ângulos solares são apresentadas.[15]

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}\right)(284 + n) \quad (4.1)$$

$$\omega = (t_s - 12) \cdot 15 \quad (4.2)$$

Na Eq. o elemento  $T_s$  é o tempo solar dado em função do horário padrão  $T_{hp}$ , latitude  $L_{lt}$  e longitude  $L_{lg}$  locais e o parâmetro de correção  $E$  apresentado na Eq. (4.3).



$$T_s = T_{hp} + 4(L_{lt} - L_{lg}) + E \quad (4.3)$$

$$E = 229,2(0,000075 + 0,00186 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B) \quad (4.4)$$

Onde, o parâmetro B é fornecido pela Eq. (4.5), conforme apresentado a seguir.

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (4.5)$$

Ainda é importante introduzir a função do cosseno de zênite, que será uma relação trigonométrica essencial tanto para geradores fixos, como os que realizam o rastreamento solar.

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \quad (4.6)$$

Também é importante considerar a irradiação extraterrestre incidente em um plano normal, que é indicada por  $I_{ext}$ , em função da constante solar, do dia do ano (n), e no caso do gerador fotovoltaico, dever ser corrigida pelo zênite, como indicado na Eq. (4.7).

$$I_{ext} = 1 + 0,033 \left( \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right) \cos \theta_z \quad (4.7)$$

#### 4.1.1 radiação direta e difusa

O espalhamento e absorção da irradiação são variáveis no tempo de acordo com o status atmosférico e a massa de ar. Nesse sentido é útil utilizar como parâmetro as condições previstas para um dia de céu claro, bem como a irradiação horária em uma superfície horizontal. Hottel (1976) define um modelo de estimar através de uma atmosfera livre a transmitância  $\tau_b$  para a irradiação direta, fornecida pela Eq.(4.8).

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left(\frac{-k}{\cos \theta_z}\right) \quad (4.8)$$

As constantes de atmosfera padrão  $a_0$ ,  $a_1$  e  $k$  precisam ser corrigidas pelos tipos climáticos da região a ser estudada. Estas correções são obtidas por meio dos fatores  $r_0 = (a_0)/(a_0^*)$ ,  $r_1 = (a_1)/(a_1^*)$  e  $r_k = k/k^*$ , de acordo com as relações (4.9), (4.10) e (4.11). Nas equações o termo A representa a altitude local.

$$a = ra_0^* \Rightarrow a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2 \quad (4.9)$$

$$a_1 = r_1a_1^* \Rightarrow a_1^* = 0.5055 - 0.00595(6.5 - A)^2 \quad (4.10)$$

$$k = r_kk^* \Rightarrow k^* = 0.2711 - 0.01858(2.5 - A)^2 \quad (4.11)$$

Por meio dos dados captados das estações do INMET é obtido a irradiação global ( $I_{glob}$ ), a qual é medida por hora. As medições fornecidas pelo INMET são apresentadas em um arquivo CSV, onde se faz necessário uma análise estatística. Para Duffie e Beckman et al. (2013), dados de radiação são as melhores fontes de pesquisa para modelagem por meio de relações empíricas para estimar a irradiação incidente por hora. Considerando nesse modo o índice  $k_t = I_{dif}/I_{ext}$ . O modelo utilizado será o de Erbs et. al.[16]

$$I_{dif}/I_{ext} = \begin{cases} 1 - 0,09k_t & \Rightarrow k_t \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604k_t + 4,388k_t^2 - 16,638k_t^3 + 12,336k_t^4 & \Rightarrow 0,22 < k_t \leq 0,80 \\ 0,165 & \Rightarrow k_t > 0,8 \end{cases} \quad (4.12)$$

Para períodos obtidos por hora, em um céu claro a radiação direta horizontal ( $I_{dir}$ ) é dada pela Eq. (4.13)

$$I_{dir} = I_{glob} - I_{dif} \quad (4.13)$$

É importante mencionar que a radiação percebida no painel ( $I_{painel}$ ) é a soma da radiação direta ( $I_{dir}$ ) com a radiação difusa ( $I_{dif}$ ).

$$I_{painel} = I_{dir} + I_{dif} \quad (4.14)$$

#### 4.1.2 modelo para painel fixo

Considerando a irradiação difusa isotrópica, e um fator de correção isométrico ( $R_b$ ), a incidência de irradiação ( $I_{fixo}$ ) em um painel fixo é dada pela Eq. (4.15).

$$I_{fixo} = R_b I_{dir} \cos \theta_z + I_{dif} \quad (4.15)$$

O fator de correção geométrico  $R_b$ , para o hemisfério sul, é fornecido pela Eq. (4.16)

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi + \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (4.16)$$

#### 4.1.3 modelo para o painel com rastreamento

Para o painel com rastreamento as correções se darão tempo a tempo de acordo com as relações trigonométricas e angulares, assim por meio da Eq. (4.17) é definido a incidência de irradiação em um painel com rastreamento ( $I_{ras}$ ).

$$I_{ras} = I_{dir} + I_{dif} \quad (4.17)$$

#### 4.1.4 potência gerada, temperatura do painel em operação

A potência fornecida pela radiação em uma determinada superfície e nesse caso específico em um painel fotovoltaico está em função da radiação total absorvida pelo módulo e sua área. Desse modo:

$$P_{fixo} = Area \cdot G_t(t) \quad (4.18)$$

Ao decorrer de um determinado tempo  $t$  é possível obter toda a energia absorvida pelo painel fotovoltaico.

$$Energia = \int P_{fixo} dt \quad (4.19)$$

Em que pese a Eq.19, serão empregados os conceitos apresentados por Sharaf Eldin (2015,[17]), considerando a potência fornecida pelo painel. Assim verifica - se que as características elétricas e mecânicas do painel fotovoltaico são preponderantes, como sua área ( $A$ ). Desse modo a potência deve ser definida em virtude de suas características, do coeficiente de temperatura de potência ( $\beta_{ref}$ ) e da eficiência de referência ( $\eta_{T_{ref}}$ ), dados esses definidos no catálogo do painel escolhido na Tab. 5.1. Por Skoplaki et al. (2009,[8]) a potência fornecida

é obtida pela Eq. (4.20):

$$P = I\eta_{T_{ref}}AT_{amb} + (1 - \beta_{ref}(T_{amb} - 25)) \quad (4.20)$$

A eficiência do módulo pode ser indicada em função da potência fornecida pela irradiação e a energia gerada fornecida pelo módulo de modo que:

$$\eta = \frac{E_{ger}}{E_{irrad}} \quad (4.21)$$

De acordo com García et al. (2004,[9]) a temperatura do módulo ( $T_{op}$ ) em operação depende da temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), da temperatura nominal de trabalho da célula (NOCT) e da radiação solar incidente  $I$ , que pode ser para o painel fixo ou rastreável ( $I_{incidente} = I_{fixo}$  ou  $I_{incidente} = I_{ras}$ ).

$$T_{op} = T_{amb} + (NOCT - 20)I_{incidente}/800 \quad (4.22)$$

# 5 METODOLOGIA

---

## 5.1 DADOS INMET

Ante a necessidade de obter dados para o período de um ano, na medida que todos estivessem completos foi realizada pesquisa no Instituto Nacional de Meteorologia. Esses parâmetros foram baixados e obtidos por um arquivo, sendo escolhidas regiões que durante o ano possuem temperaturas e incidência radioativas diferenciadas, sendo as cidade de Brasília, Porto Alegre, Fortaleza a Manaus.

- Da região Centro Oeste sendo a cidade de Brasília
- Da região Sul sendo a cidade de Porto Alegre
- Da região Nordeste sendo a cidade de Fortaleza
- Da região Norte sendo a cidade de Manaus

Para esse estudo foram captados dados das principais estações meteorológicas do INMET localizadas nestas localidades, de modo que os dados foram obtidos por meio de planilhas no formato CSV para o ano de 2014. Essa período foi escolhido em virtude de todos os dados estarem completos no referido ano e assim dar robustez a pesquisa. Dentre esses parâmetros deve ser destacado a irradiação global e a temperatura de bulbo seco.

## 5.2 MODELO DE PAINEL

Após essa etapa foi necessário fazer uma pesquisa em sites especializados para encontrar um gerador fotovoltaico que fornecesse, por meio de suas especificações, dados como o coeficiente de temperatura de potência, eficiência de referência e a temperatura nominal de operação. Através do catálogo do Canadian Solar foi escolhido o gerador CS6P - 270P, em virtude de suas dimensões. A Tab. 5.1 apresenta os dados encontrados nesse referido catálogo

Tabela 5.1 – Especificações do Gerador Fotovoltaico CS6P - 270P

Informações do painel	Valores
Dimensões painel	1638mm ×982mm×40 mm
Potência máxima ( $P_{max}$ )	270 W
Voltagem de Operação ( $V_{op}$ )	30,8 V
Corrente operação ( $I_{op}$ )	8,75 A
Voltagem de Curto Circuito ( $V_{oc}$ )	37,9 V
Corrente de Curto Circuito ( $I_{sc}$ )	39,32 A
Eficiência de referência ( $\eta_{T_{ref}}$ )	12 %
Coefficiente de temperatura de potência ( $\beta_{ref}$ )	-0,41 % °C
Temperatura nominal de trabalho da célula ( $NOCT$ )	45±2 °C
Tipo da Célula Poli – cristalina	6 in

Utilizando as informações do gerador fotovoltaico apresentados na Tab. 5.1, os dados obtidos por meio do INMET e as equações matemáticas já apresentadas, foi construído um código no programa matlab para obter curvas que permitissem uma análise do comportamento do painel fixo ou rastreável em decorrência da trajetória solar nas diferentes regiões. Esses dados permitirão observar a potência fornecida pelo módulo. As medições fornecidas pelas estações serão escolhidas para observar o comportamento para todo o ano de 2014, e do mesmo modo, para dias no período de verão e no período de inverno como comparativo.

# 6 DADOS OBTIDOS E ANÁLISE

---

## 6.1 PARÂMETROS INICIAIS

Em uma primeira perspectiva, se torna importante a definição das constantes para a atmosfera padrão, e por consequência os fatores de correção. Como o clima no território nacional é predominantemente tropical, foram utilizados os conceitos de Hottel (1976), sendo assim estabelecidos que  $r_0 = 0,95$ ,  $r_1 = 0,98$  e  $k = 1,02$ .

Também as características geográficas e topográficas regionais são extremamente importantes, nesse aspecto, para as regiões objetos desse estudo, as quais são apresentadas a seguir.

- Parâmetros cidade de Brasília
  - Altitude Brasília : 1172 m
  - Latitude Brasília: -15,78°;
  - Longitude Brasília: -47,93°;
  - Longitude Padrão: -45°;
  
- Parâmetros cidade de Porto Alegre
  - Altitude Porto Alegre : 46,95 m
  - Latitude Porto Alegre: -30,05°;
  - Longitude Porto Alegre: -51,17°;
  - Longitude Padrão:-45°;
  
- Parâmetros cidade de Fortaleza
  - Altitude Fortaleza: 61,25 m
  - Latitude Fortaleza: -3,10°;
  - Longitude Fortaleza: -60,02°;
  - Longitude Padrão: -47°;

- Parâmetros cidade de Manaus
  - Altitude Manaus: 26,45 m
  - Latitude Manaus: -3,83°;
  - Longitude Manaus: -38,54°;
  - Longitude Manaus: -60°;

## 6.2 MODELO ANUAL IRRADIÂNCIA E POTÊNCIA FORNECIDA

São apresentadas a seguir as Fig. 6.1 e Fig. 6.2 que demonstram o comportamento da potência fornecida, bem como a irradiação em todo o ano de 2014. A proposta é indicar que durante este período as curvas variam de acordo com a estação do ano, demonstrando picos maiores no solstício de verão e picos menores no solstício de inverno, decorrente portanto da maior ou menor incidência da radiação solar.

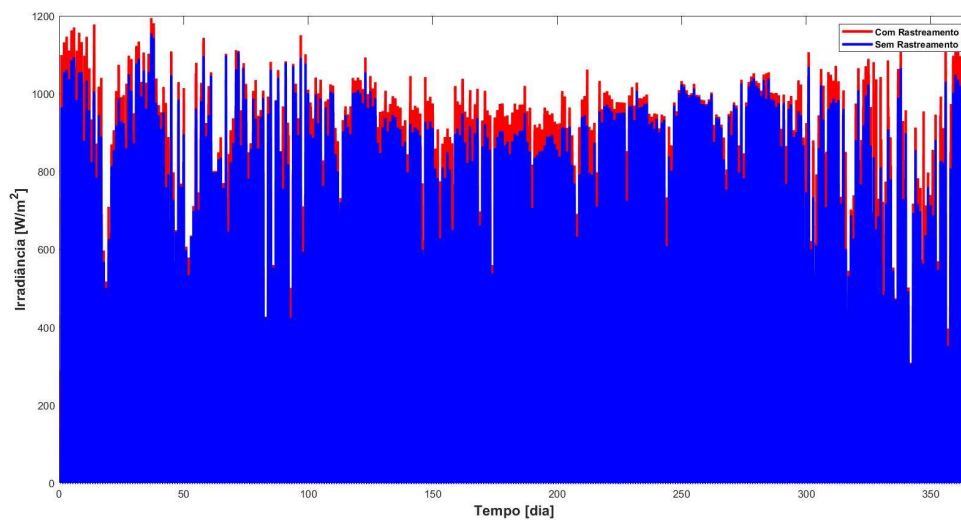


Figura 6.1 – Irradiância Anual Brasília, fonte autor.



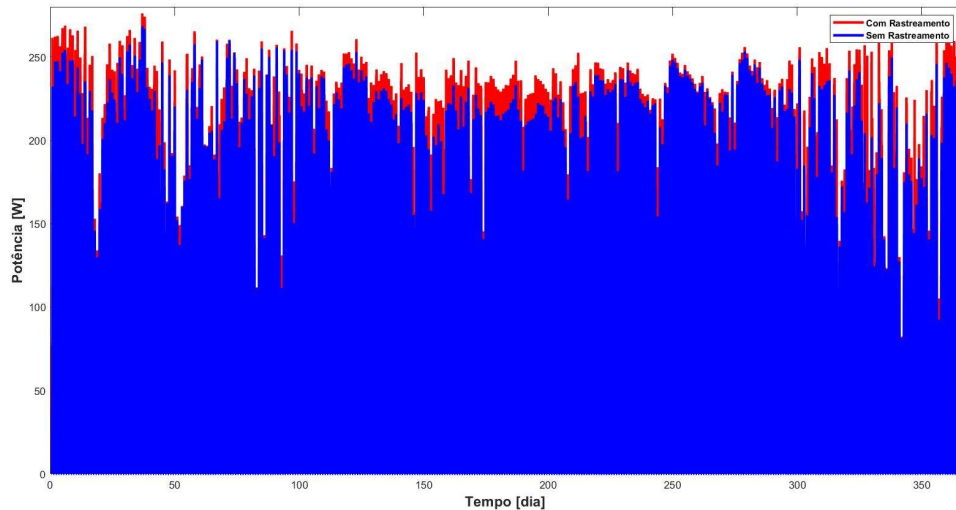


Figura 6.2 – Potência Anual Brasília, fonte autor.

Em que pese as figuras sejam parecidas no comportamento elas se diferenciam na magnitude. Isso decorre por que uma parcela pequena da irradiação que chega ao painel é transformada em potência gerada, devido a baixa eficiência na geração. Ainda, nestas primeiras imagens, é possível inferir que o rastreamento solar permite um aumento da potência fornecida e da irradiação em relação ao painel fixo, no entanto este tipo de figura não é ideal para essa análise por que a imagem possui muitas curvas para os 365 dias do ano, sendo ideal o estudo de períodos específicos. Para uma melhor visualização serão escolhidos no verão os dias de 18 a 24 de janeiro e no inverno os dias 01 a 07 de julho. Esses dias foram escolhidos para que se tenha uma janela de 07 dias de observação e também para verificar o comportamento nos dias de céu claro e dias de céu nublado.

### 6.3 ANÁLISE BRASÍLIA

Brasília por estar em uma região de clima tropical de altitude, possui estações bem definidas, com período chuvoso e quente no verão e um período seco e frio no inverno. Esse aspecto é relevante por que acaba refletido em variáveis importantes como a temperatura de operação, energia fornecida e eficiência. As Fig. 6.3 e 6.4 apresentam a irradiância e a energia fornecida, de modo que a cor vermelha faz referência a rastreamento e a cor azul ao painel fixo.

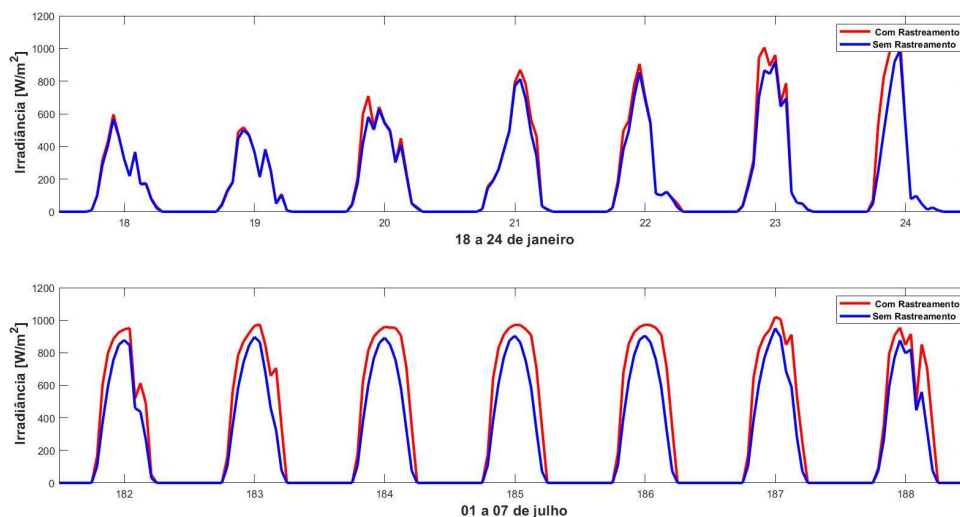


Figura 6.3 – Irradiância, inverno e verão. Brasília, fonte autor.

Os valores máximos de irradiância são apresentados nas tabelas a seguir para os períodos indicados na Fig. 6.3.

Tabela 6.1 – Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 18 a 24 de janeiro, Brasília 2014.

Dia	18/01	19/01	20/01	21/01	22/01	23/01	24/01
Rast.	597,1	517,5	709,4	869,5	906,1 2	1077	1074
Fixo	567	501,2	627	813,8	854,7	919,5	988,4

Tabela 6.2 – Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 01 a 07 de julho, Brasília 2014.

Dia	01/07	02/07	03/07	04/07	05/07	06/07	07/07
Rast.	951,6	974,4	959,1	971,6	972,1	1020	954,7
Fixo	877,8	897,1	892,6	904,4	905,4	950,2	876,6

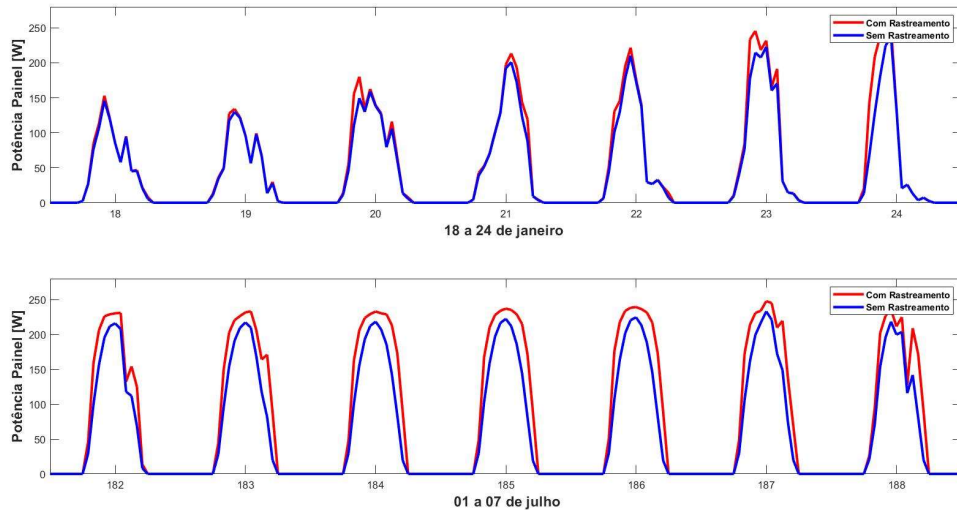


Figura 6.4 – Potência fornecida. Brasília, fonte autor.

Os valores máximos de potência são apresentados nas tabelas a seguir para os períodos indicados na Fig. 6.4.

Tabela 6.3 – Potência máxima ( $W$ ) fornecida nos dias 18 a 24 de janeiro, Brasília 2014.

Dia	18/01	19/01	20/01	21/01	22/01	23/01	24/01
Rast.	153	134,1	180,2	213,4	221,7	245,5	258
Fixo.	145,8	129,9	159	201	210,3	228,8	236,6

Tabela 6.4 – Potência máxima ( $W$ ) fornecida nos dias 01 a 07 de julho, Brasília 2014.

Dia	01/07	02/07	03/07	04/07	05/07	06/07	07/07
Rast.	231	233,2	232,9	237	222,4	247,7	235,7
Fixo.	215,9	217,2	218,4	222,3	239,3	233,1	218,4

Nas duas figuras observa - se o mesmo comportamento para o verão e inverno, se diferenciando somente pela sua magnitude. O interessante nesta imagem é que durante os dias de verão houve períodos de muita nebulosidade, levando as curvas de rastreamento e sem rastreamento a se comportarem de forma similar, condizente com o período. Já na análise para o inverno, por ser uma região de clima seco e frio, com poucas nuvens, fica mais aparente o ganho com o rastreamento em relação ao painel fixo. Considerando a produção de energia no painel uma variável importante é a temperatura de operação, sendo apresentada a seguir na Fig. 6.5.

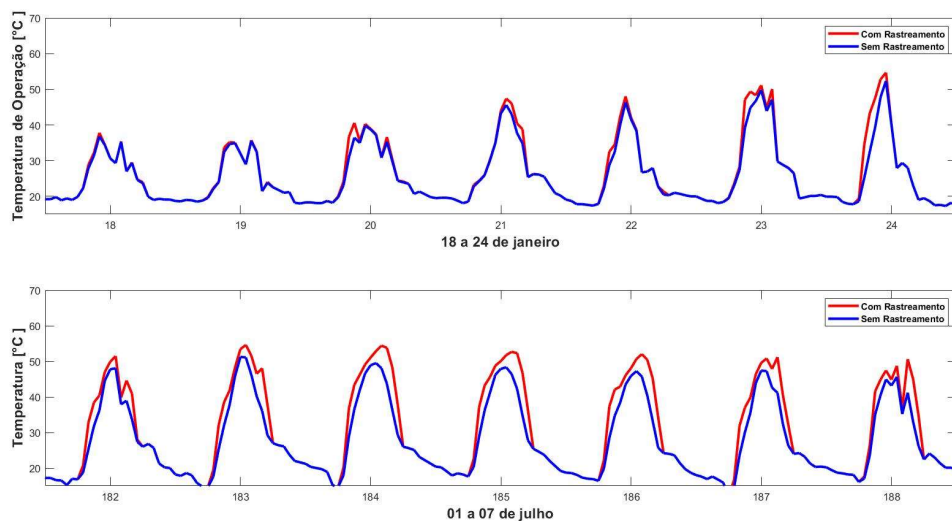


Figura 6.5 – Temperatura de operação. Brasília, fonte autor.

Os valores máximos da temperatura de operação ( $T_{op}$ ) são apresentados nas tabelas a seguir para os períodos indicados na Fig. 6.5.

Tabela 6.5 – **Temperatura máxima (°C) de operação nos dias 18 a 24 de janeiro, Brasília 2014.**

Dia	18/01	19/01	20/01	21/01	22/01	23/01	24/01
Rast.	37,78	35,72	40,57	47,39	48,03	51,13	54,67
Fixo	36,83	35,53	39,78	45,60	46,38	49,80	52,33

Tabela 6.6 – **Temperatura máxima (°C) de operação nos dias 01 a 07 de julho, Brasília 2014.**

Dia	01/07	02/07	03/07	04/07	05/07	06/07	07/07
Rast.	51,48	54,61	54,43	52,68	52,02	51,18	50,62
Fixo	48,06	51,26	49,49	48,31	47,24	47,39	45,64

A temperatura de operação também é influenciada pela incidência da radiação solar e pela temperatura ambiente local ( $T_{amb}$ ). No modelo que está sendo proposto não se considera em um primeiro momento variações do vento na operação, pois interessa pela Eq. 4.20 conhecer a  $T_{amb}$  e a irradiação. O conhecimento da convecção forçada interessa para

entender o balanço energético no painel e sua influência na temperatura. Supõe - se ainda uma regularidade nas medições do vento de forma linear, sendo assim não relevante para análise. Seguindo neste raciocínio importa mencionar que durante o inverno, nos períodos secos, os picos foram um pouco maiores do que nas datas observadas no verão, sugerindo dias chuvosos, levando a uma menor temperatura de operação do painel.

### 6.3.1 média mensal energia fornecida e irradiância para Brasília

Para análise do desempenho operacional do painel o gráfico a seguir apresenta o valor mensal de produção e irradiação recebida no ano de 2014, com os valores médios mensais, diferenciando somente a magnitude.

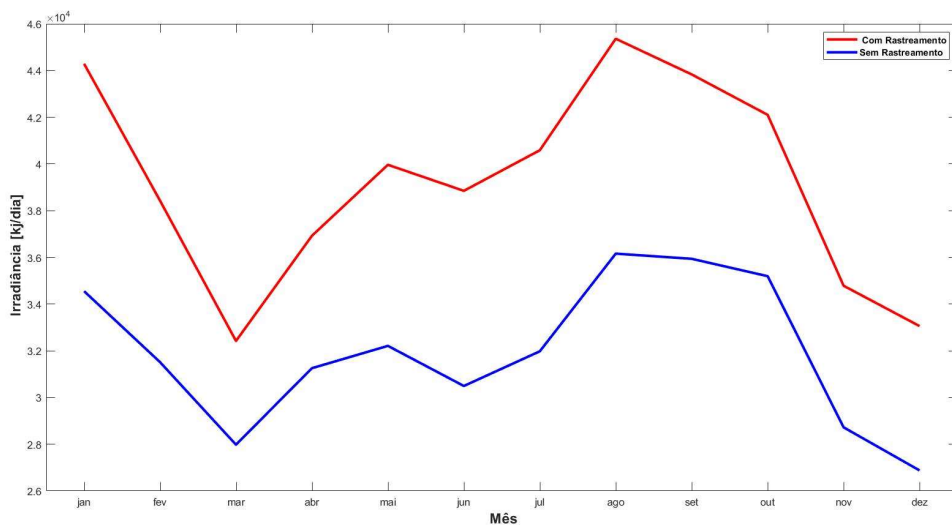


Figura 6.6 – Média mensal irradiância. Brasília, fonte auto.r

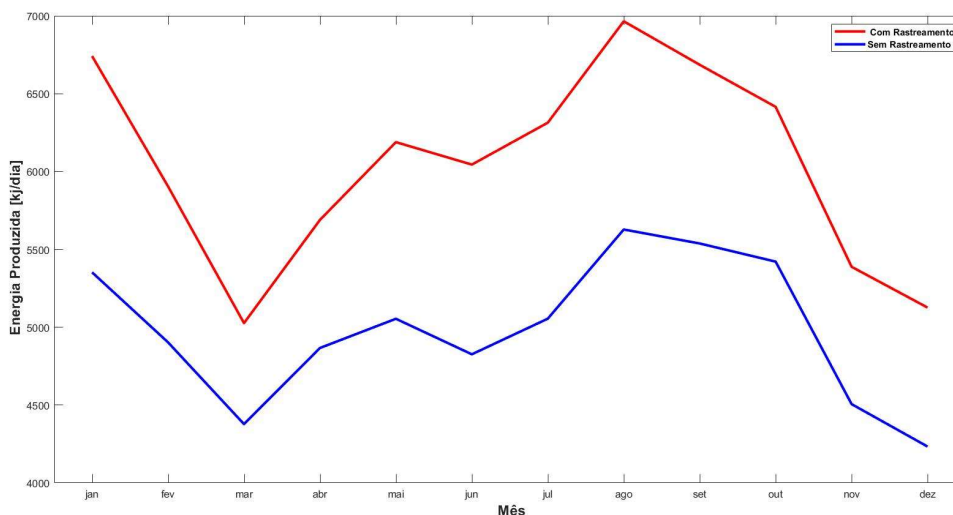


Figura 6.7 – Média mensal de Energia Fornecida. Brasília, fonte autor.

Como ferramenta para uma visualização numérica dos ganhos de Irradiância e energia fornecida, será apresentado a seguir a Tabela 6.7 com as áreas abaixo de cada curva das Fig. 6.8 e 6.7 para comparação.

Tabela 6.7 – Valores das áreas abaixo das curvas em kJ/dia. mês, Brasília 2014.

Valor	Fixo	Rastreável
Irradiância	352000	429000
Energia	54900	66210

As duas curvas apresentam um comportamento bem típico para a região. Entre os meses de maio a agosto ocorre um aumento na produção e na irradiação, bem condizente com o período seco, frio e com poucas nuvens. Também, a diferença na inclinação no mês de janeiro provavelmente acontece devido ao período do solstício de verão, pois com o direcionamento do painel ao norte e o sol possuindo um trajeto mais a retaguarda, incidido perpendicularmente sobre o Trópico de Capricórnio, ocorre o favorecimento do rastreamento em detrimento ao fixo.

### 6.3.2 eficiência de geração para Brasília

Os valores para a eficiência de geração foram obtidos entre o quociente da média mensal de energia fornecida e a média mensal irradiação, permitindo a construção da curva de eficiência de geração a cada mês estudado, sendo indicado na Fig.6.8.

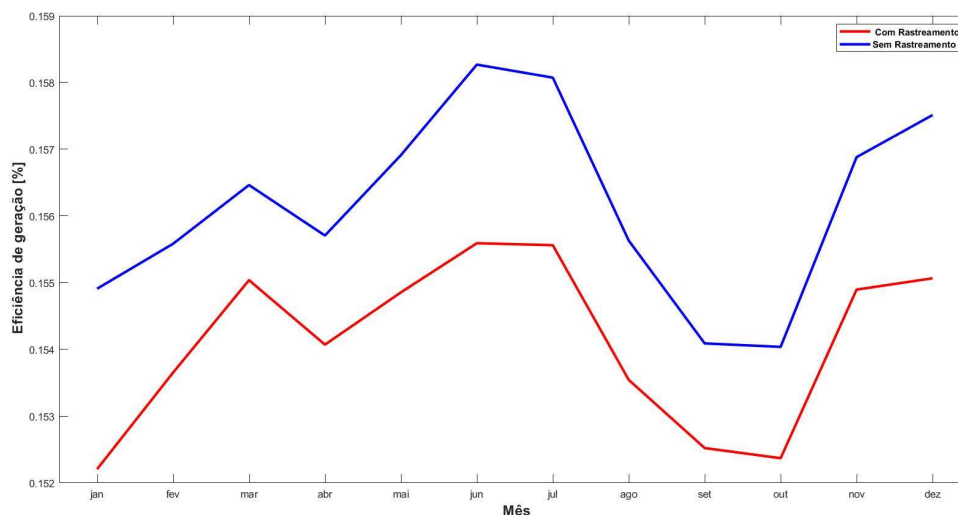


Figura 6.8 – Eficiência de geração. Brasília, fonte autor

A primeira observação a ser feita é que a eficiência de geração para o painel fixo é maior do que o rastreável. Este comportamento é oposto ao da média de energia fornecida, onde no rastreável gera - se mais energia do que no fixo, sendo uma informação importante por que mostra o efeito da temperatura de operação nos trabalhos do painel. Em que pese o rastreamento forneça mais energia pela maior irradiação, ocorre uma perda percentual maior na produção ao se comparar ao fixo. O fato é que a temperatura de operação é proporcional a Irradiação no painel conforme Eq. (4.22), como o painel rastreável recebe mais Irradiação, terá uma temperatura de operação maior e por consequência uma eficiência menor.

Ainda remete - se que no inverno, o comportamento é bastante uniforme, devido ao clima é bastante seco e de céu claro, contribuindo assim para que a incidência da radiação global não sofra com nuvens. Este fator influencia na Temperatura de operação, de modo que ao receber mais radiação no rastreamento mais o painel irá aquecer e por consequência será menos eficiente. Por fim denota - se que na região central do país, devido ao verão ter maiores períodos de nebulosidade em relação ao inverno, existem pontos (picos) de diminuição em virtude da maior quantidade de nuvens.

## 6.4 ANÁLISE PORTO ALEGRE

A cidade de Porto Alegre, por estar em uma região mais ao sul do território, possui um clima de características Subtropical (Temperado). Esse fator é importante por que impacta no funcionamento do painel e suas variáveis, conforme indicado nas figuras a seguir.

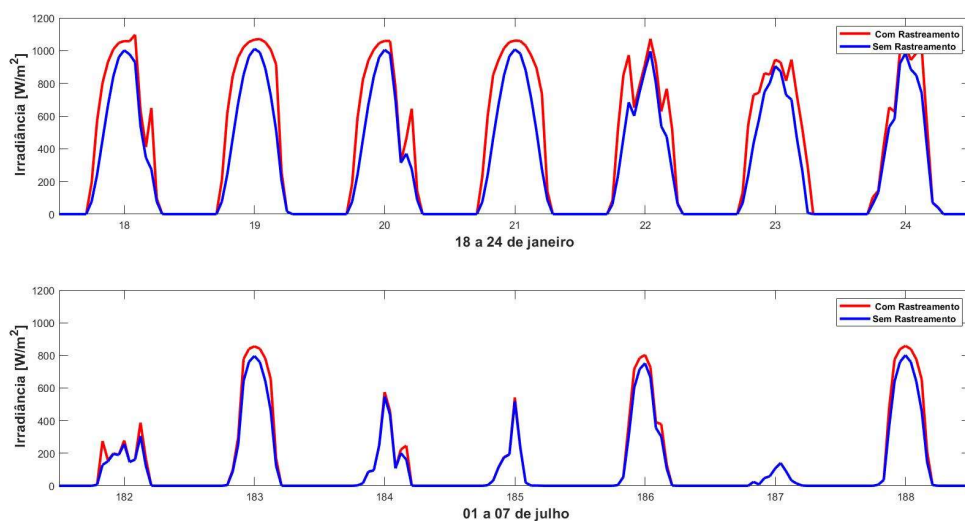


Figura 6.9 – Irradiância. Porto Alegre, fonte autor.

Os valores máximos de irradiância são apresentados nas tabelas a seguir para os períodos indicados na Fig. 6.9.

Tabela 6.8 – Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 18 a 24 de janeiro, Porto Alegre 2014.

Dia	18/01	19/01	20/01	21/01	22/01	23/01	24/01
Rast.	1097	1067	1059	1059	1073	945,5	1031
Fixo	1002	1011	1005	1008	995,7	905,3	983,5

Tabela 6.9 – Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 01 a 07 de julho, Porto Alegre 2014.

Dia	01/07	02/07	03/07	04/07	05/07	06/07	07/07
Rast.	387,9	855,9	575	542	802,8	139,8	858,7
Fixo	305,9	796,7	548,3	518,9	751,8	139,8	801,4



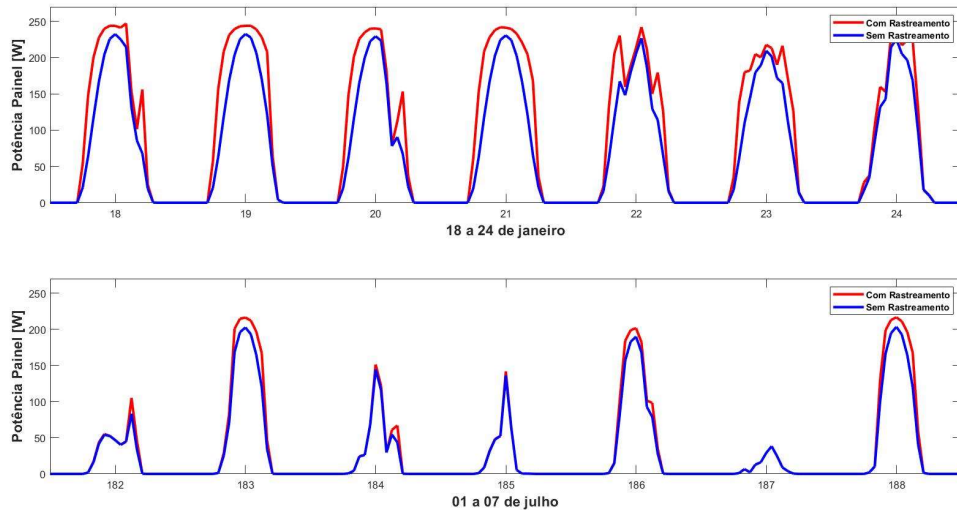


Figura 6.10 – Energia fornecida. Porto Alegre, fonte autor.

Os valores máximos de potência são apresentados nas tabelas a seguir para os períodos indicados na Fig. 6.10.

Tabela 6.10 – **Potência máxima ( $W$ ) fornecida nos dias 18 a 24 de janeiro, Porto Alegre 2014.**

Dia	18/01	19/01	20/01	21/01	22/01	23/01	24/01
Rast.	247,2	243,9	240,0	241,9	242,1	217,7	234,9
Fixo	232,4	232,6	229,4	230,6	226,8	209,5	225,3

Tabela 6.11 – **Potência máxima fornecida nos dias 01 a 07 de julho, Porto Alegre 2014.**

Dia	01/07	02/07	03/07	04/07	05/07	06/07	07/07
Rast.	105,2	216,2	151,3	141,8	201,6	38,32	216,6
Fixo	83,35	202,5	144,6	136,0	189,9	38,32	203,4

Pelo fato desta região possuir verões bem quentes e invernos bem frios e chuvosos, ela acaba por ter características bem peculiares. Nos meses de verão a energia fornecida e a irradiação no painel são maiores, com alguns dias de nuvens, os quais geram picos no gráfico. Já na estação de inverno os valores da energia e irradiação são bem menores, sendo uma estação com baixas temperaturas, com muita nebulosidade e chuvosa, impactando na radiação incidente. Também é importante observar a temperatura de operação do painel, com o viés verificar seu impacto na sua operação, sendo apresentada na Fig. 6.13.

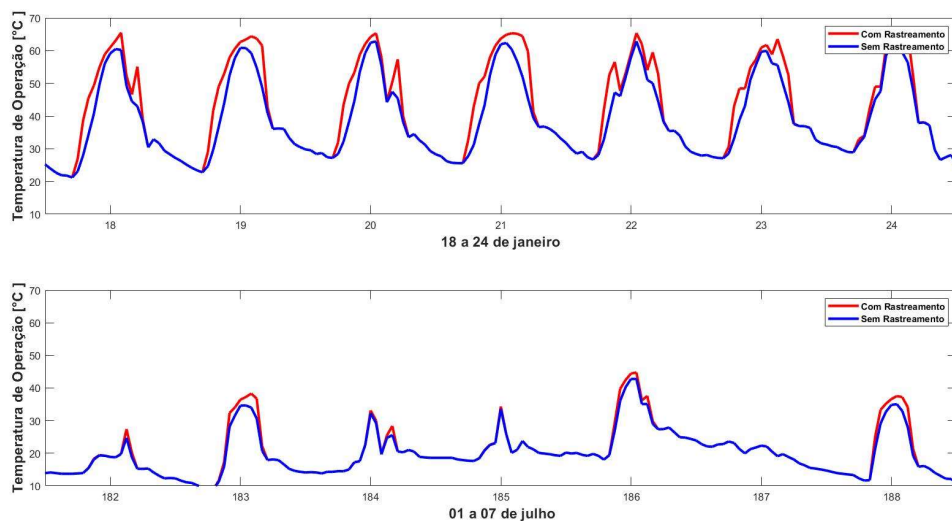


Figura 6.11 – Temperatura de operação. Porto Alegre, fonte autor.

Os valores máximos da temperatura de operação ( $T_{op}$ ) são apresentados nas tabelas a seguir para os períodos indicados na Fig. 6.11.

Tabela 6.12 – **Temperatura máxima de operação (°C) nos dias 18 a 24 de janeiro, Porto Alegre 2014.**

Dia	18/01	19/01	20/01	21/01	22/01	23/01	24/01
Rast.	65,49	64,39	65,33	65,18	65,36	63,54	65,14
Fixo	60,48	62,97	62,80	62,35	68,87	59,94	61,80

Tabela 6.13 – **Temperatura máxima de operação (°C) nos dias 01 a 07 de julho, Porto Alegre 2014.**

Dia	01/07	02/07	03/07	04/07	05/07	06/07	07/07
Rast.	27,39	38,30	33,11	34,36	44,76	22,33	37,53
Fixo	24,73	34,59	32,25	33,62	42,8	22,33	35,05

Já é visível que as temperaturas de operação no período do verão são bem maiores do que no inverno, pois estas são influenciadas pelo frio intenso e céu nublado, levando a temperatura de operação ( $T_{op}$ ) do painel no rastreamento aproximar a do fixo.

### 6.4.1 média mensal energia fornecida e irradiância para porto alegre

Utilizando a média mensal da energia produzida e da irradiância é possível verificar o comportamento anual dessas variáveis conforme apresentado a seguir.

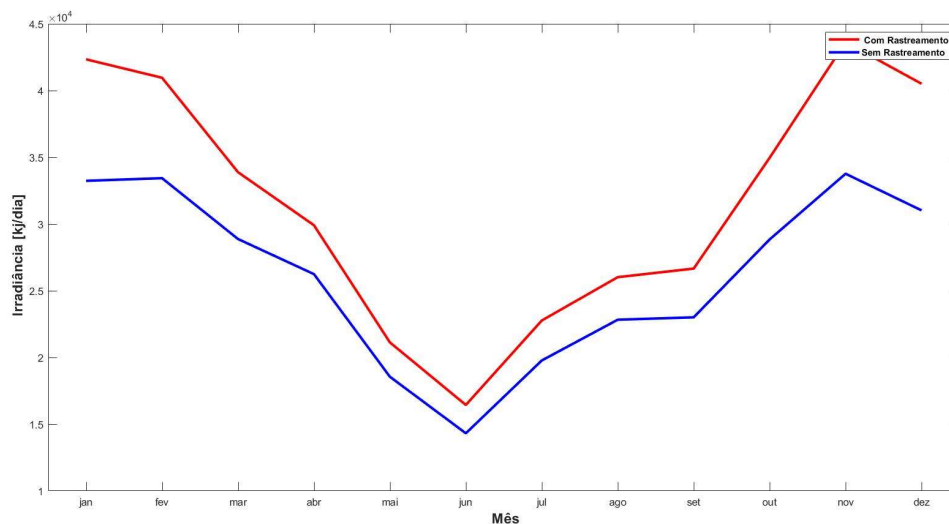


Figura 6.12 – Média mensal irradiância. Porto Alegre, fonte autor.

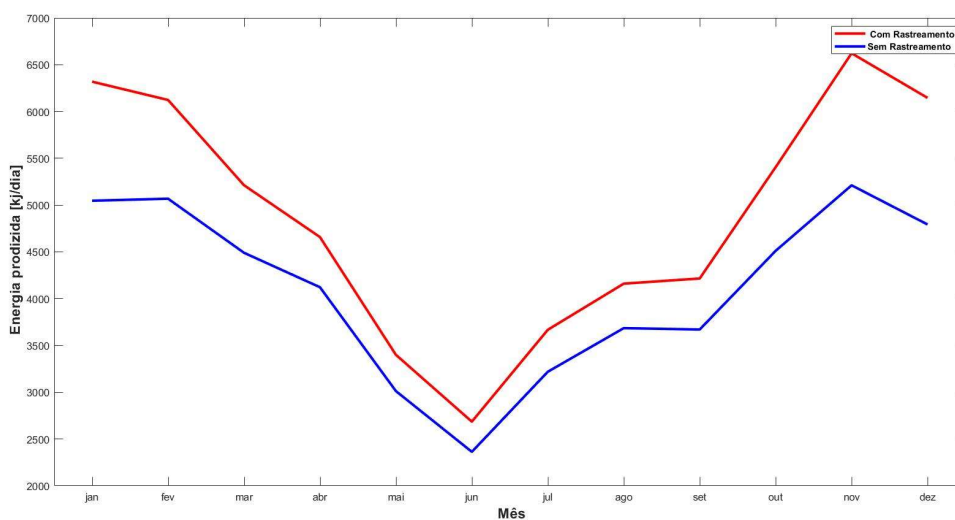


Figura 6.13 – Média mensal energia fornecida. Porto Alegre, fonte autor.

Como ferramenta para uma visualização numérica dos ganhos de Irradiância e energia fornecida, será apresentado a seguir a Tabela 6.14 com as áreas abaixo de cada curva das Fig. 6.12 e 6.13 para comparação

Tabela 6.14 – Valores das áreas abaixo das curvas kj/dia. mês, Porto Alegre 2014.

Valor	Fixo	Rastreável
Irradiância	282000	338000
Energia	44200	51900

No verão, nos meses de janeiro e fevereiro, a inclinação da curva de rastreamento se diferencia da com o painel fixo. Isso ocorre em virtude do painel está apontado para norte, e a posição do sol no deslocamento fique mais a retaguarda, incidindo perpendicularmente sobre o Trópico de Capricórnio. Isso influencia no ângulo de incidência, bem como na quantidade de irradiação. Neste caso o ajuste do ângulo pelo rastreamento melhora a quantidade de radiação recebida e assim na energia produzida. Já no período do solstício de inverno ocorre um queda muito grande na produção e na irradiação, pois é um período de grande nebulosidade e de muitas chuvas, sendo condizente com a localidade e estação climática.

#### 6.4.2 eficiência de geração para porto alegre

A curva para valor da eficiência de geração para Porto Alegre também foi feita entre a razão da energia mensal produzida e a irradiação média incidente mensal, permitindo assim a construção da curva de eficiência de geração a cada mês estudo, indicado na Fig.6.14.

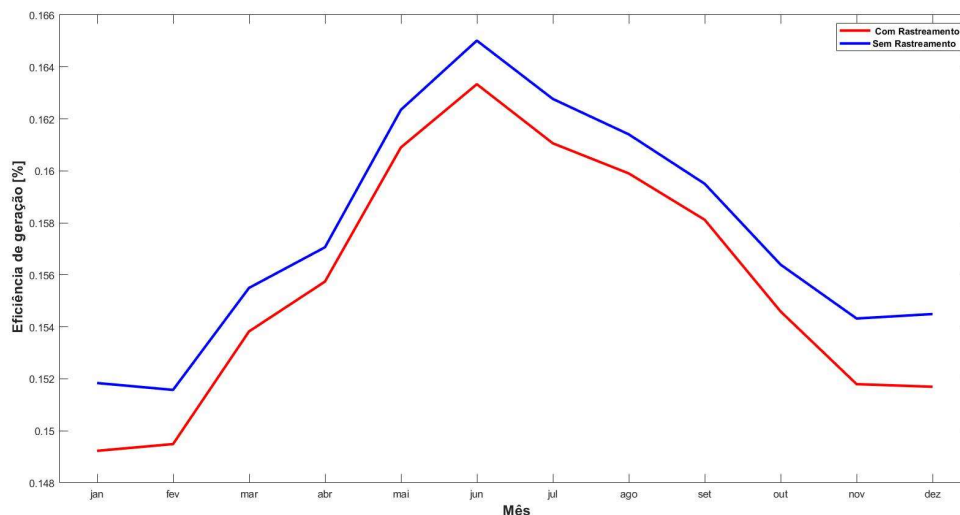


Figura 6.14 – Eficiência de geração. Porto Alegre, fonte autor

Em uma primeira análise, já se vislumbra que no período de inverno a eficiência é bem

maior do que no verão, visto que a temperatura de operação é bem menor como indicado na Fig. 6.11, por causa das baixas temperaturas ambientes e menor irradiação. Também a eficiência de geração para o painel fixo é maior do que o rastreável, com comportamento oposto ao da média de energia fornecida, pois no rastreável gera - se mais energia do que no fixo.

Portanto verifica - se uma diminuição significativa na produção de energia nos períodos de inverno comparados aos de verão, conforme demonstrado na Fig. 6.12 e 6.13. Essa estação é bastante chuvosa e fria impactando também na diminuição da temperatura de operação, e por consequência no aumento da eficiência conforme Fig. 6.14.

## 6.5 ANÁLISE MANAUS

Essa região permeia em um clima equatorial quente e úmido, possuindo médias pluviométricas elevadas. Define - se ainda a ausência de períodos de seca ou estiagem, com as temperaturas bastantes elevadas durante todo o ano, com baixa variação de um período a outro. É apresentado a seguir as Fig. 6.15 e 6.16.

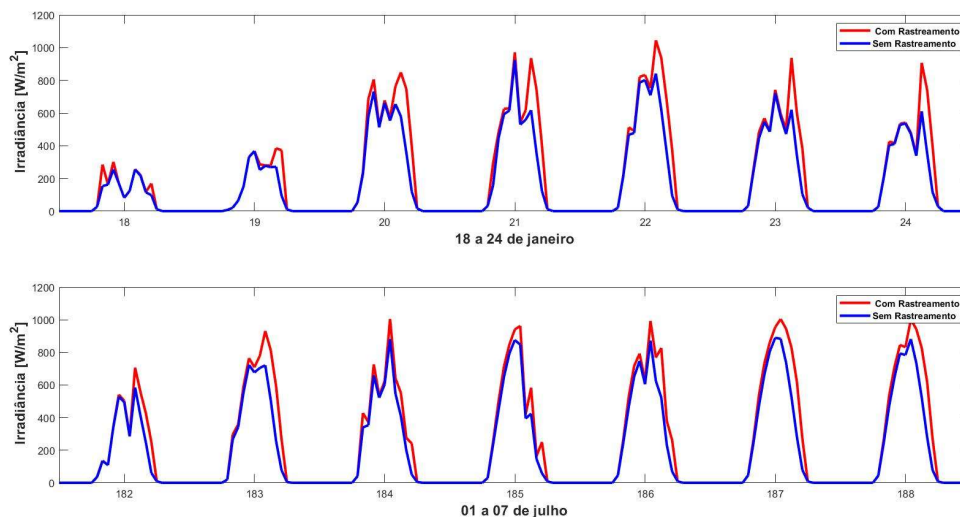


Figura 6.15 – Irradiância. Manaus, fonte autor.

Os valores máximos de irradiância são apresentados nas tabelas a seguir para os períodos indicados na Fig. 6.15.

Tabela 6.15 – Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 18 a 24 de janeiro, Manaus 2014.

Dia	18/01	19/01	20/01	21/01	22/01	23/01	24/01
Rast.	256,6	385,1	848,6	971,2	1045	937,5	907,0
Fixo	254,9	367,0	731,8	923,6	841,6	722,0	610,9

Tabela 6.16 – Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 01 a 07 de julho, Manaus 2014.

Dia	01/07	02/07	03/07	04/07	05/07	06/07	07/07
Rast.	706,3	931,3	1005	962,8	943,6	1005	1002
Fixo	585	723,1	882,5	876,3	873,1	889,6	881,8

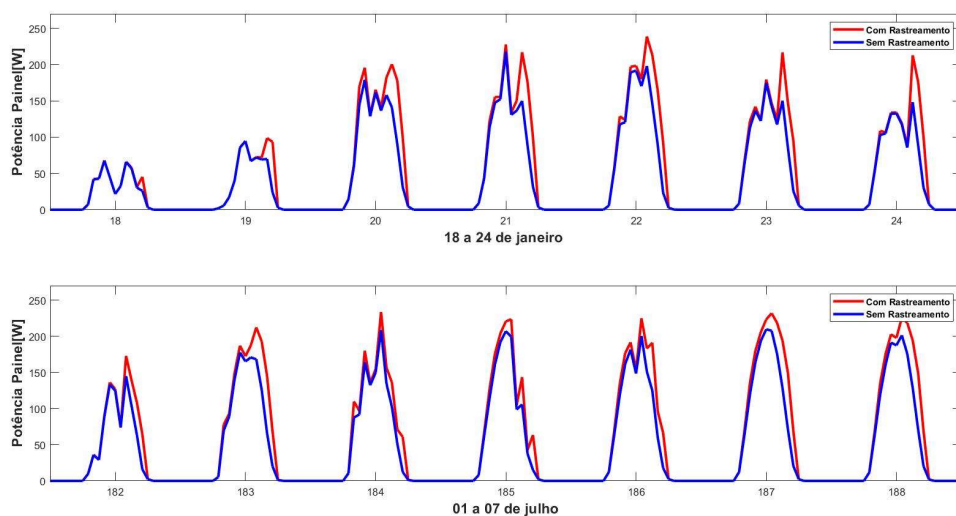


Figura 6.16 – Potência fornecida. Manaus, fonte autor.

Os valores máximos de potência são apresentados nas tabelas a seguir para os períodos indicados na Fig. 6.16.

Tabela 6.17 – Potência máxima ( $W$ ) fornecida nos dias 18 a 24 de janeiro, Manaus 2014.

Dia	18/01	19/01	20/01	21/01	22/01	23/01	24/01
Rast.	68,01	98,72	200,6	227,8	238,8	216,9	212,9
Fixo	67,79	94,53	179,2	217,9	198,2	175	148,3

Tabela 6.18 – **Potência máxima ( $W$ ) fornecida nos dias 01 a 07 de julho, Manaus 2014.**

Dia	01/07	02/07	03/07	04/07	05/07	06/07	07/07
Fixo	172,9	212,3	233,5	223,5	225	231,8	225,6
Rast.	145	177,6	208,7	207	200,6	209,7	201,4

A quantidade de picos já demonstra que nas duas estações, durante os dias selecionados, houve dias de céu com nuvens, diminuindo nesses momentos a irradiação e a produção. No período de verão a quantidade de picos apresentam serem maiores que no inverno, pois esse período é mais nublado e chuvoso. É apresentado a seguir a curva da temperatura de operação para esta região.

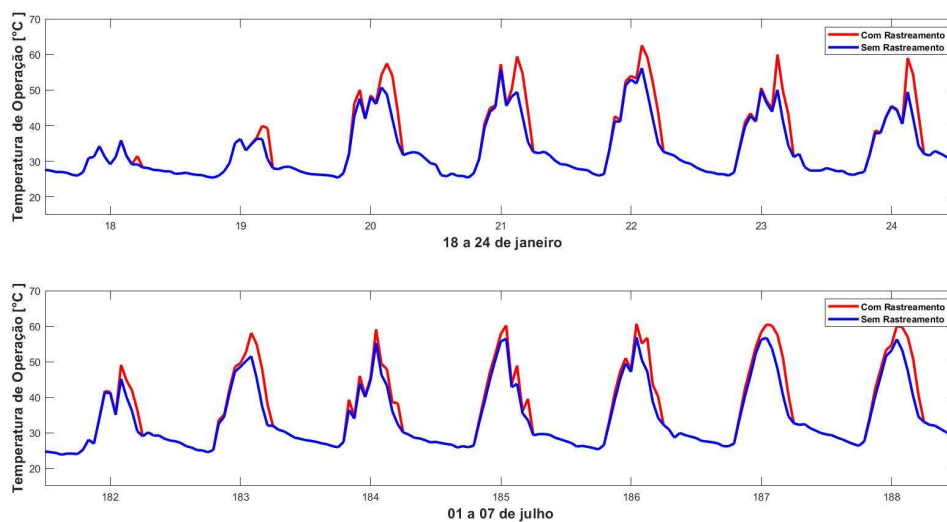


Figura 6.17 – Temperatura de operação. Manaus, fonte autor.

Os valores máximos da temperatura de operação ( $T_{op}$ ) são apresentados nas tabelas a seguir para os períodos indicados na Fig. 6.17.

Tabela 6.19 – **Temperatura máxima de operação ( $^{\circ}C$ ) nos dias 18 a 24 de janeiro, Manaus 2014.**

Dia	18/01	19/01	20/01	21/01	22/01	23/01	24/01
Rast.	35,92	39,97	57,47	59,46	62,46	60,0	59,03
Fixo	35,87	36,28	50,76	55,75	56,19	50,09	49,48

Tabela 6.20 – **Temperatura máxima de operação (°C) nos dias 01 a 07 de julho, Manaus 2014.**

Dia	01/07	02/07	03/07	04/07	05/07	06/07	07/07
Rast.	49,10	58,13	59,12	60,23	60,70	60,49	60,09
Fixo	45,19	51,54	55,28	56,44	56,90	56,72	56,34

Comparando com outras regiões a temperatura de operação do painel ( $T_{op}$ ) é maior em Manaus, pois tem relação direta com a temperatura ambiente conforme Eq. 4.22, sendo portanto influenciada pelas altas temperaturas nesta região equatorial. A diferença de comportamento da  $T_{op}$  do rastreamento ao painel fixo tem relação com a estação climática, já que o verão é bastante chuvoso e quente em relação ao inverno.

### 6.5.1 média mensal energia fornecida e irradiância para manaus

Como feito para outras cidades será Utilizada a média mensal da energia produzida e da irradiância a fim de verificar o comportamento anual dessas variáveis.

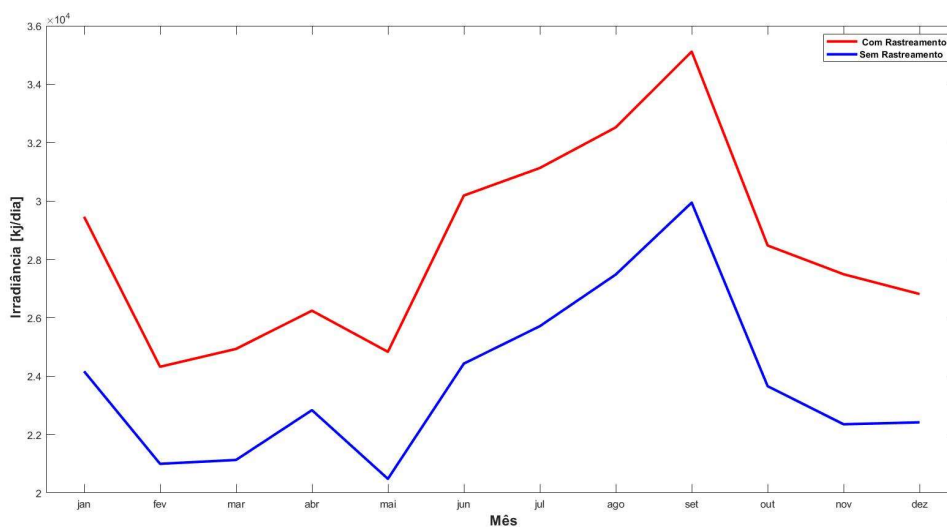


Figura 6.18 – Média mensal irradiância, inverno e verão. Manaus fonte autor.



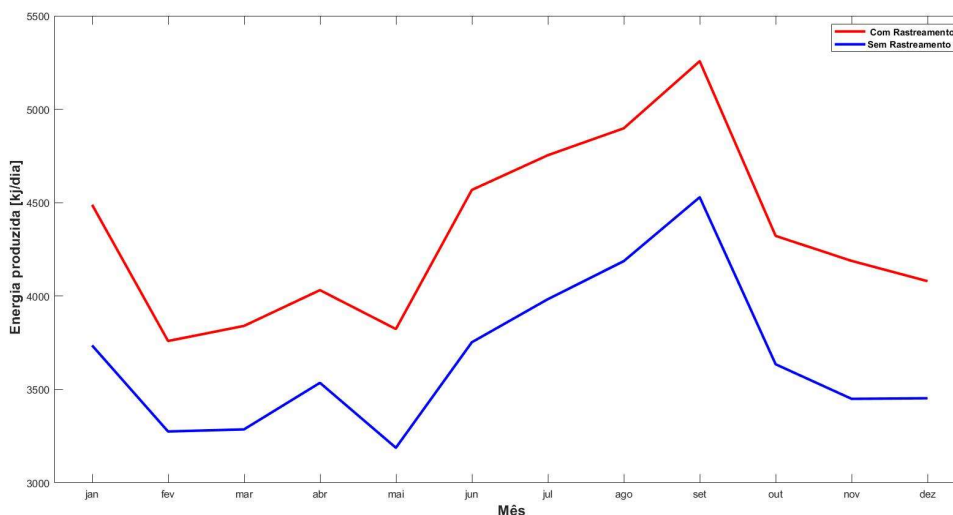


Figura 6.19 – Média mensal energia fornecida. Manaus, fonte autor.

Como ferramenta para uma visualização numérica dos ganhos de Irradiância e energia fornecida, será apresentado a seguir a Tabela 6.21 com as áreas abaixo de cada curva das Fig. 6.18 e 6.19 para comparação

Tabela 6.21 – **Valores das áreas abaixo das curvas kJ/dia. mês, Manaus 2014.**

Valor	Fixo	Rastreável
Irradiância	262000	313000
Energia	40400	47500

A maior quantidade de irradiação e energia produzida ocorre nos períodos de inverno, pois o verão é quente, bastante chuvoso e nublado. Situação bem oposta a Cidade de Porto Alegre, já que o verão é o período de maior produção e energia e no inverno o menor. Outro aspecto a ser observado é que a diferença entre o que se produz com o rastreamento é bem maior do que com o painel fixo, pois ao se encontrar próximo a linha do equador acaba por receber mais radiação do que em outras regiões, pois o rastreamento consegue aproveitar melhor ao acompanhar o posicionamento solar.

### 6.5.2 eficiência de geração para manaus

Como realizado para as cidades anteriores a curva de eficiência de geração para Manaus é obtida pela razão entre a energia fornecida média mensal e a irradiação média incidente mensal, conforme indicado na Fig.6.20.

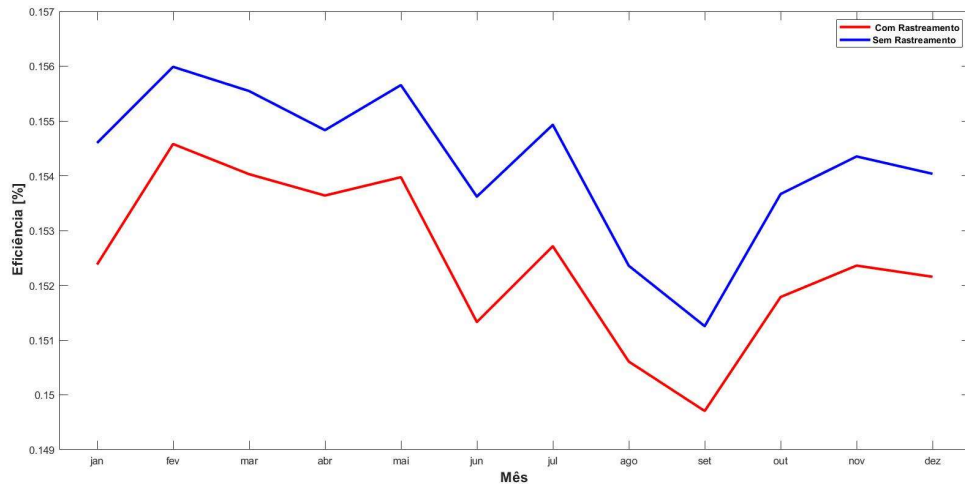


Figura 6.20 – Eficiência de geração. Manaus, fonte autor

Como o observado nas cidades já estudadas, a eficiência na geração é maior no painel fixo. Isso fica claro pelo fato de a amplitude no fixo ser maior do que para o rastreável. Um ponto importante a ser mencionado é que no verão a eficiência de produção é bem superior ao período de inverno. Esse dado implica uma diferença das outras regiões estudadas, pois por se encontrar em uma região de clima equatorial o verão é muito chuvoso e quente, influenciando na  $T_{op}$ . Já no inverno, ao contrário do verão, as  $T_{op}$  são maiores, diminuindo a eficiência na geração. Por esta razão produz uma maior quantidade de energia durante o inverno, pois o verão é quente, bastante chuvoso e nublado.

## 6.6 ANÁLISE FORTALEZA

A cidade de Fortaleza encontra - se em uma região de clima tropical, com períodos bastantes quentes e úmidos. As temperaturas são elevadas durante todo ano, com as chuvas concentrando nos meses de verão e outono. As figuras 6.21 e 6.22 apresentam a irradiação e energia produzida no painel.

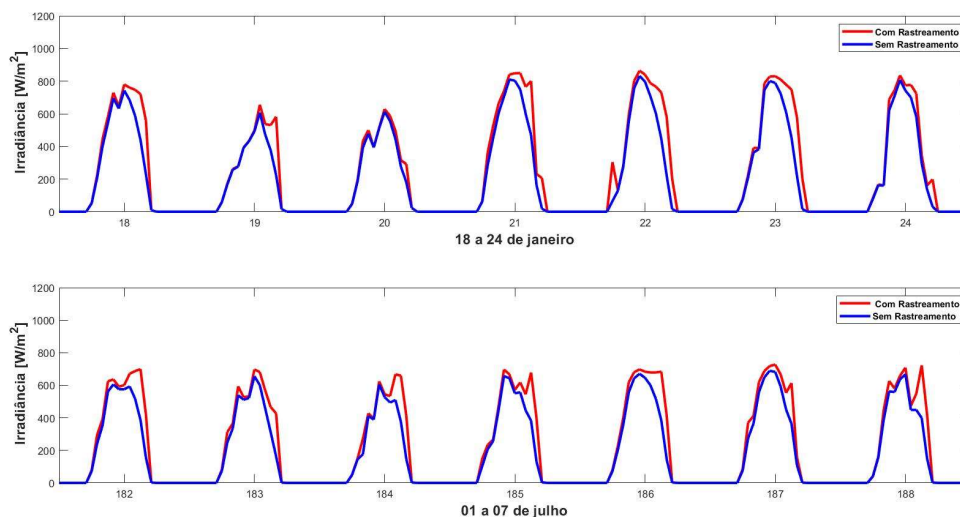


Figura 6.21 – Irradiância, inverno e verão. Fortaleza, fonte autor.

Os valores máximos de irradiância são apresentados nas tabelas a seguir para os períodos indicados na Fig. 6.21.

Tabela 6.22 – **Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 18 a 24 de janeiro, Fortaleza 2014.**

Dia	18/01	19/01	20/01	21/01	22/01	23/01	24/01
Rast.	779,8	655,4	629,0	849,1	864,3	830,2	835,6
Fixo	743,1	607,5	612,8	810,1	832,0	800,9	807,7

Tabela 6.23 – **Irradiância máxima ( $W/m^2$ ) nos dias 01 a 07 de julho, Fortaleza 2014.**

Dia	01/07	02/07	03/07	04/07	05/07	06/07	07/07
Rast.	699,4	696,9	667,6	696,7	697,9	726,9	722,9
Fixo	605,8	656,0	605,5	656,4	670,8	689,4	667,5

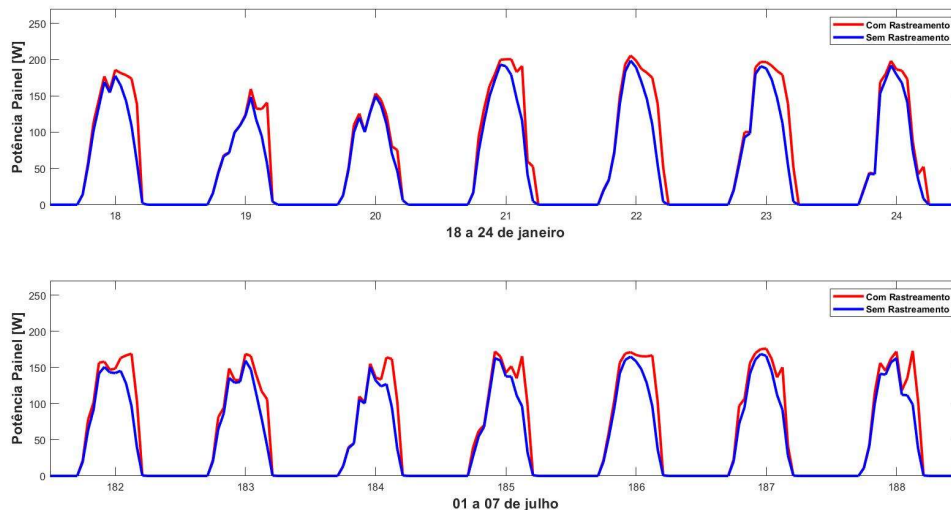


Figura 6.22 – Energia fornecida. Fortaleza, fonte autor.

Os valores máximos de potência são apresentados nas tabelas a seguir para os períodos indicados na Fig. 6.22.

Tabela 6.24 – **Potência máxima ( $W$ ) fornecida nos dias 18 a 24 de janeiro, Fortaleza 2014.**

Dia	18/01	19/01	20/01	21/01	22/01	23/01	24/01
Rast.	185,9	159,6	153,4	200,5	205,7	196,9	198,3
Fixo	177,8	148,6	149,6	193,2	198,7	190,9	192,3

Tabela 6.25 – **Potência máxima ( $W$ ) fornecida nos dias 01 a 07 de julho, Fortaleza 2014.**

Dia	01/07	02/07	03/07	04/07	05/07	06/07	07/07
Rast.	169,1	168,8	163,9	172,1	171,2	176,0	173,0
Fixo	150,8	159,5	150,8	162,8	165,0	168,7	162,8

No verão, em comparação com a estação de inverno, ocorre uma maior irradiação, como demonstrado na Fig. 6.21, levando a uma maior produção de potência pelo painel. Esse fator se dá pela da proximidade da cidade a linha do equador, recebendo uma quantidade significativa de radiação solar no verão. Por ser uma localidade com incidência de ventos alísios, que sopram constantemente dos trópicos para o Equador, os quais são muito úmidos, possui períodos de nebulosidade durante todo o ano, sendo visível na quantidade de picos vistos tanto no verão quanto no inverno, o que impacta sensivelmente na geração. Nesse

raciocínio, importa verificar as curvas da temperatura de operação conforme apresentado a seguir.

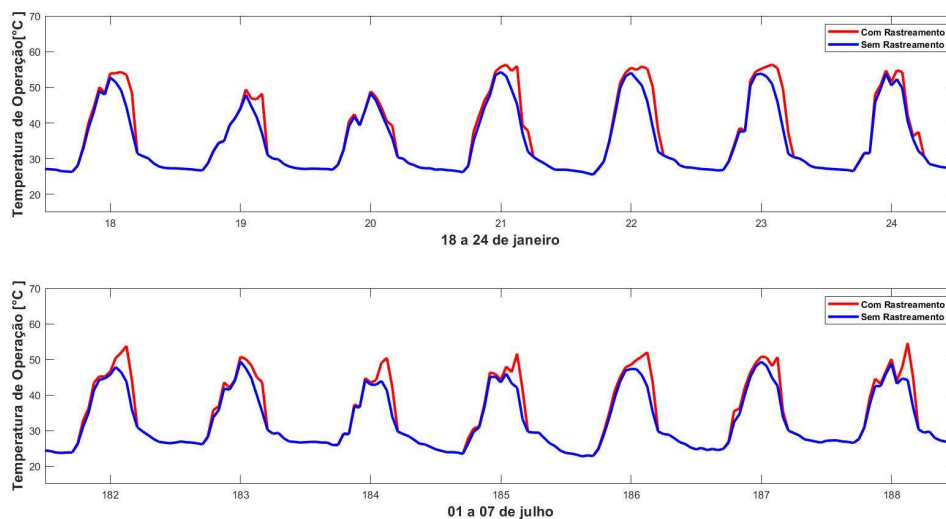


Figura 6.23 – Temperatura de operação. Fortaleza, fonte autor.

Os valores máximos da temperatura de operação ( $T_{op}$ ) são apresentados nas tabelas a seguir para os períodos indicados na Fig. 6.23.

Tabela 6.26 – **Temperatura máxima de operação (°C) nos dias 18 a 24 de janeiro, Fortaleza 2014.**

Dia	18/01	19/01	20/01	21/01	22/01	23/01	24/01
Rast.	54,29	49,43	48,87	56,32	55,80	56,39	54,76
Fixo	52,71	47,88	48,35	54,29	54,09	54,41	53,83

Tabela 6.27 – **Temperatura máxima de operação (°C) nos dias 01 a 07 de julho, Fortaleza 2014.**

Dia	01/07	02/07	03/07	04/07	05/07	06/07	07/07
Rast.	53,78	50,73	50,40	51,60	51,99	50,64	54,58
Fixo	47,84	49,41	44,13	46,01	47,27	49,33	48,77

No geral a temperatura de operação no painel no verão é maior do que no inverno, em virtude da maior radiação incidente pela proximidade com o equador, e as altas temperaturas ambientes. Importante ressaltar que os picos e as diferenças entre as curvas se deve ao fato do rastreamento permitir uma maior incidência, aumentando a radiação e aquecendo o painel.

### 6.6.1 média mensal energia fornecida e irradiância para fortaleza

No mesmo raciocínio feito anteriormente será Utilizada a média mensal da energia produzida e a média mensal de irradiância a fim de verificar o comportamento anual dessas variáveis.

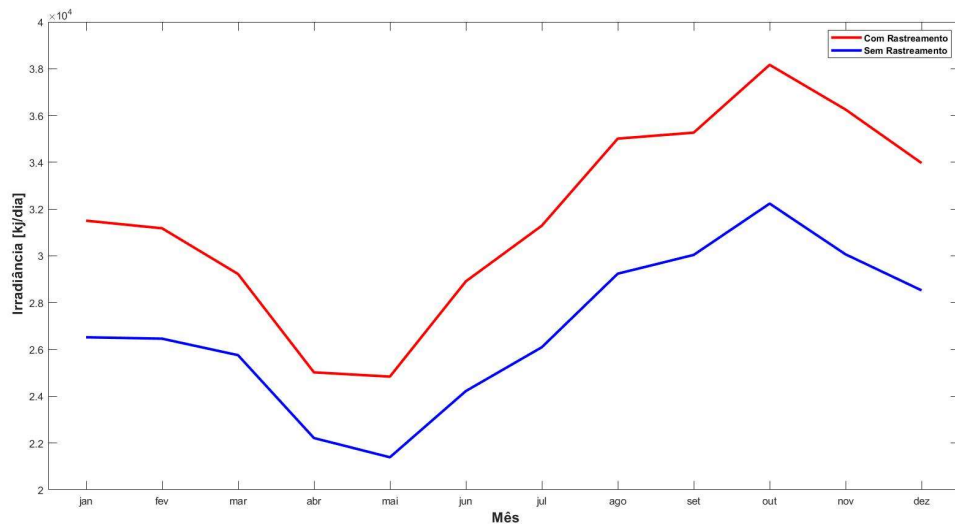


Figura 6.24 – Média mensal irradiância, inverno e verão. Fortaleza fonte autor.

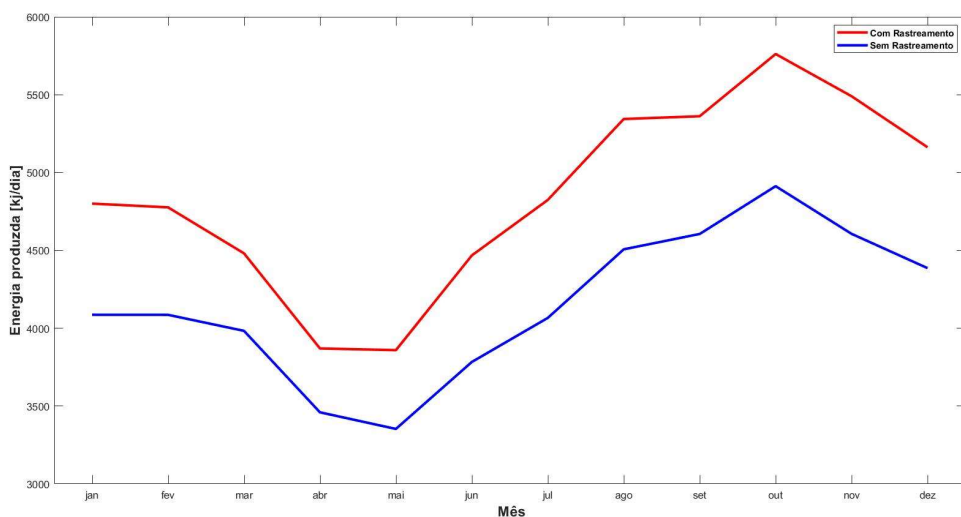


Figura 6.25 – Média mensal energia fornecida. Fortaleza, fonte autor.

Como ferramenta para uma visualização numérica dos ganhos de Irradiância e energia

fornecida, será apresentado a seguir a Tabela 6.28 com as áreas abaixo de cada curva das Fig. 6.24 e 6.25 para comparação

Tabela 6.28 – **Valores das áreas abaixo das curvas kj/dia. mês, Fortaleza 2014.**

Valor	Fixo	Rastreável
Irradiância	295000	348000
Energia	45600	52900

Fica claro, ao observar a média mensal de irradiância e energia produzida, que a menor produção ocorre no do inverno, coincidindo com os períodos de maior nebulosidade e de chuvas, as quais geralmente acontecem de março a julho. As maiores diferenças entre as amplitudes observando as duas curvas ocorrem no verão, já que o rastreamento favorece uma maior incidência com o ajuste do painel aos ângulos solares.

### 6.6.2 eficiência de geração para fortaleza

O valor para a eficiência de geração foram obtidos fazendo a razão entre a energia fornecida média mensal e a irradiação média incidente mensal, permitindo assim a a curva da eficiência de geração a cada mês estudo, indicado na Fig.6.26.

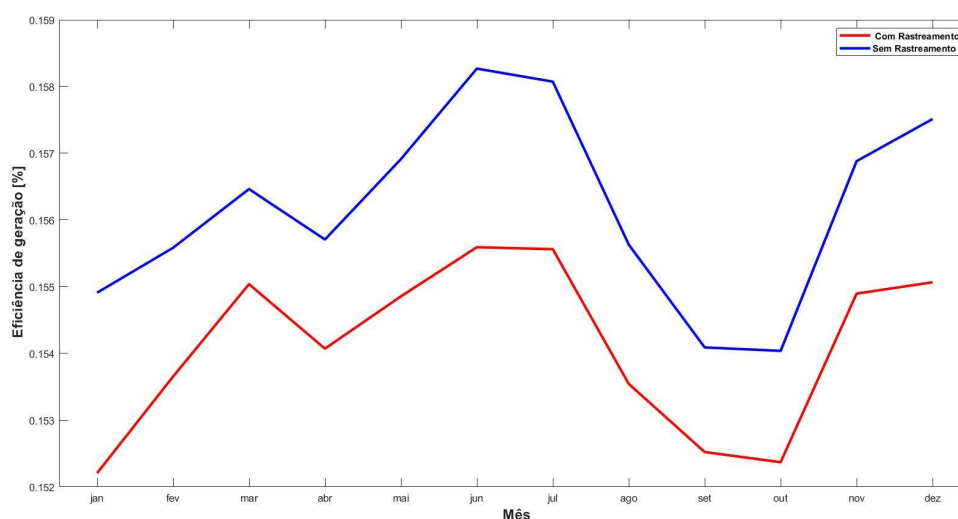


Figura 6.26 – Eficiência de geração. Fortaleza, fonte autor

Da mesma forma como ocorreu nas outras localidades, a eficiência da geração para o

painel fixo foi maior do que para o painel rastreável, em contraste com a irradiação e a geração. Já foi observado que isso se dá em função da temperatura de operação, no entanto um aspecto importante é que nos meses mais chuvosos e eficiência na geração é bem maior em virtude da  $T_{op}$  ser menor no painel. Também é importante ressaltar que a diferença na magnitude entre a curva do rastreamento e do painel fixo acontece por que quanto mais próximo do equador maior será a irradiação, levando a uma maior aquecimento do painel. Ainda que a diferença da inclinação das curvas durante o verão se relaciona ao posicionamento do sol mais a retaguarda durante seu trajeto, já que o painel é apontado para o norte, favorecendo o rastreamento, e assim diminuindo ainda mais sua eficiência.

Importante mencionar que a cidade de Fortaleza está mais próxima da linha do equador, com uma  $T_{op}$  elevada pela radiação incidente e altas temperaturas ambientes. Também por ser uma localidade com ocorrência dos ventos alísios possui períodos de nebulosidade durante todo o ano, sendo visível na quantidade de picos na curva. Quanto a média mensal de energia produzida observa-se que ela é menor no do inverno, coincidindo com os períodos de maior nebulosidade e de chuvas, que geralmente acontecem de março a julho, possuindo nesse período maior eficiência de geração.

## **6.7 ENERGIA TOTAL GERADA E EFICIÊNCIA ENTRE REGIÕES**

### **6.7.1 comparativo energia total gerada**

Para construção de uma usina de geração com painéis fotovoltaicos é interessante analisar comparativamente, ante as regiões estudadas, a diferença de produção de potência elétrica nessas localidades comparando o painel fixo e ao painel com rastreamento. A potência geral anual produzida anual nos dois modelos é apresentada na Fig.6.27.



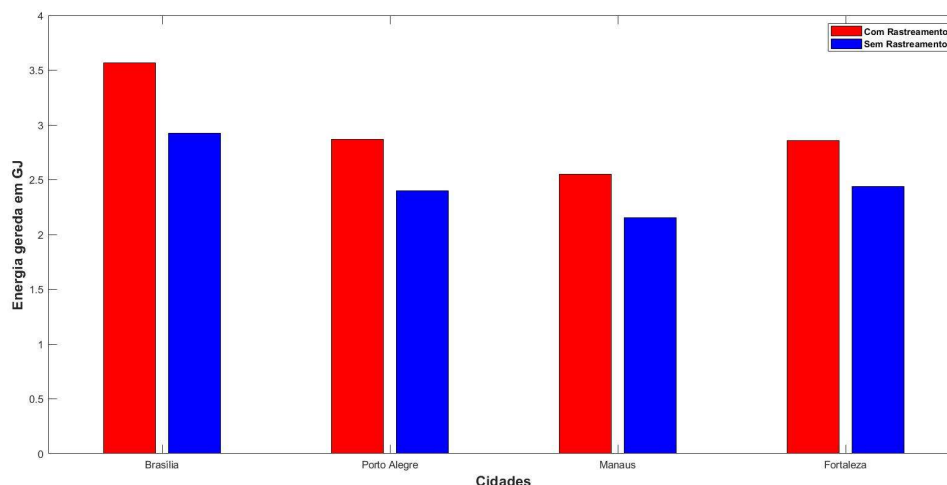


Figura 6.27 – Energia produzida anualmente por região, fonte autor

Um ponto interessante na Fig 6.27 é o comportamento de geração total anual para cada região. Isso permite visualizar quais regiões são melhores candidatas para a construção de uma usina de geração, e quais são melhores para o uso do sistema de rastreamento em face ao fixo, denotando portanto como o clima e posição geográfica podem influenciar no ganho de potência, usando o mesmo modelo para localidades diferentes. Visualmente já fica claro que a região de Brasília possui uma geração no ano estudado maior do que para outras regiões, e portanto, considerando essa informação é importante conhecer o total que pode ser gerado durante um ano, e desse modo segue a Tabela 6.1 indicando a soma da potência fornecida para o ano de 2014 em Giga Joule (GJ).

Tabela 6.29 – Total de Energia gerada anualmente por região.

Cidade	Painel fixo	Painel Rastreável	Ganho percentual
Brasília	2,92 GJ	3,55 GJ	22,26 %
Porto Alegre	2,40 GJ	2,87 GJ	19,58 %
Manaus	2,15 GJ	2,55 GJ	18,60 %
Fortaleza	2,44 GJ	2,86 GJ	17,21 %

É notório que de todas as regiões a cidade de Brasília é a que possui os maiores valores para a geração no painel fixo quanto ao rastreável. Isso é importante para análise de qual a melhor região para a construção de uma usina de geração, pois quanto maior for a possi-

bilidade de geração, menor será os custos com os insumos para a sua construção e também a quantidade de módulos geradores, considerando a mesma quantidade de energia gerada para cada região. O fato é que por possui um período de grande estiagem, com temperaturas baixas e com poucas nuvens a eficiência na geração é favorecida.

No lado contrário, a região amazônica foi a que menos apresentou o valor da energia produzida durante o ano estudado. Períodos de muitas chuvas pela elevada umidade e altas temperaturas influenciam de forma sensível na geração, como indicado na tabela 6.1 e na Fig. 6.27

As cidades de Fortaleza e Porto Alegre possuem valores próximos na geração anual de energia, e se encontram em regiões com climas bem diferentes, sendo a primeira em uma localidade de clima tropical e a segunda em Subtropical (Temperado). A diferença marcante entre as duas regiões é na produção mensal média de energia e na eficiência durante o processo de geração, vinculadas a temperatura de operação que está função das condições climáticas dessas cidades. Cabe também mencionar que na cidade de Porto Alegre ocorre uma maior sazonalidade em relação ao clima, com estações bem definidas, sendo observado nas Fig. 6.11 e 6.13.

Importante mencionar que baseado nos valores da Tabela 6.1, o painel rastreado gerou anualmente 22,26 % a mais que o fixo em Brasília, 19,58 % em Porto Alegre, 18,60 % em Manaus e 17,21 % em Fortaleza. Que o potencial de geração de Brasília é alto em relação a outras regiões por ter um período bem logo de clima seco e frio como já mencionado, o que aumenta o ganho percentual na geração devido a maior irradiação no painel e as baixas temperaturas ambientes neste período. Relata - se inda que não está sendo considerado no referido estudo os custos energéticos quanto ao rastreamento, já que esse mecanismo necessita de fomento de energia para seu funcionamento.

# 7 CONCLUSÃO

---

Nos aspectos mostrados, é interessante verificar que cada região possui comportamento e características diferentes, influenciando na potência fornecida, a qual tem significativa relação com o clima e temperatura local, assim em regiões mais ao sul do país o comportamento da potência fornecida será diferente de regiões ao norte e nordeste. No caso da região central do país existe uma amplitude significativa entre o rastreamento e o painel fixo, demonstrados pelos valores indicados na Tabela 6.1, sendo respectivamente 3,67 GJ e 2,92 GJ. Quanto a eficiência de geração foi possível observar como o efeito da temperatura de operação é prejudicial, de modo que ao receber mais radiação no rastreamento mais o painel irá aquecer e por consequência será menos eficiente.

Em de Porto Alegre, devido a um inverno bastante frio e chuvoso ocorre uma diminuição na produção de energia, e por consequência no aumento da eficiência. Já no caso de Manaus existe uma maior produção durante o inverno, devido a períodos de grande nebulosidade no verão. Para fortaleza, Quanto a média mensal de energia produzida observa-se que ela é menor no do inverno, coincidindo com os períodos de maior nebulosidade e de chuvas, que geralmente acontecem de março a julho.

Quanto a potência total gerada no ano de 2014 o rastreamento é uma boa pratica para melhorar o ganho na produção de energia, mas impacta sensivelmente na eficiência. Ainda durante este estudo observa-se que Brasília é a região que melhor proporciona a construção de uma usina de geração de potência, visto que forneceu os melhores resultados na geração, como muito satisfatório na eficiência de produção tanto no rastreamento quanto no painel fixo, conforme Fig 6.27. O que deve definir qual modelo a ser adotado, se o fixo ou o móvel, irá depender dos custos de construção e de operação, visto que parte da energia produzida deve ser canalizada para mover o sistema de rastreamento se essa for a escolha.

A região onde se localiza a cidade de Brasília apresentou os melhores resultados para ser candidata a sediar uma usina de geração de potência, possuindo o maior valor encontrado com o painel fixo, e o maior ganho para o painel rastreável, devendo assim verificado economicamente pelos gastos da construção da usina qual modelo é mais viável.

Para trabalhos futuros sugere-se a elaboração de um modelo experimental construído para verificar as hipóteses e informações apresentadas nos resultados. Também pode ser sugerido um estudo para verificar financeiramente qual o melhor modelo de produção de para implementar uma usina para geração de potência, verificando os insumos necessários para sua construção e seus custos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- 1 GE, M.; FRIEDRICH, J.; VIGNA, L. 4 charts explain greenhouse gas emissions by countries and sectors. 4.
- 2 SEME, S.; ŠTUMBERGER, B.; HADŽISELIMOVIĆ, M. A novel prediction algorithm for solar angles using second derivative of the energy for photovoltaic sun tracking purposes. *Solar Energy*, Elsevier, v. 137, p. 201–211, 2016.
- 3 GREEN, M. A. Photovoltaic principles. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Elsevier, v. 14, n. 1-2, p. 11–17, 2002.
- 4 HSIEH, H.-I. et al. Performance study of photovoltaic power-slope-aided incremental-conductance maximum power point tracking. In: IEEE. *2017 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*. [S.l.], 2017. p. 483–489.
- 5 HEUSINGER, J. et al. Introduction, evaluation and application of an energy balance model for photovoltaic modules. *Solar Energy*, Elsevier, v. 195, p. 382–395, 2020.
- 6 GIL-ANTONIO, L. et al. Flatness-based control for the maximum power point tracking in a photovoltaic system. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 10, p. 1843, 2019.
- 7 ARMGHAN, H. et al. Backstepping based non-linear control for maximum power point tracking in photovoltaic system. *Solar Energy*, Elsevier, v. 159, p. 134–141, 2018.
- 8 SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar energy*, Elsevier, v. 83, n. 5, p. 614–624, 2009.
- 9 GARCÍA, F. H. Análise experimental e simulação de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos. 2004.
- 10 ATLAS BRASILEIRO de Energia Solar. 2023. Disponível em:<[https://cenariossolar.editorabrasilenergia.com.br/wp-content/uploads/sites/8/2020/11/Atlas\\_Brasileiro\\_Energia\\_Solar\\_2a\\_Edicao\\_compressed.pdf](https://cenariossolar.editorabrasilenergia.com.br/wp-content/uploads/sites/8/2020/11/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao_compressed.pdf)>. Acesso em 13 de janeiro 2023.
- 11 OLIVEIRA, H. E. Tecnologia fotovoltaica em filmes finos (películas delgadas). *Universidade Federal de Lavras, Brasil*, 2008.
- 12 PORTAL SOLAR, Componentes de um painel fotovoltaico. 2022. Disponível em:<<https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>. Acesso em 15 de dezembro 2022.
- 13 PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Grupo de trabalho de energia solar (gtes). *CEPEL-GTES. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro*, 2014.
- 14 INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2022. Disponível em:<<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/climatologia/15817-clima.html>>. Acesso em 16 de dezembro 2022.

15 DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. [S.l.]: Wiley New York, 1980.

16 DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

17 ELDIN, S. S.; ABD-ELHADY, M.; KANDIL, H. Feasibility of solar tracking systems for pv panels in hot and cold regions. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 85, p. 228–233, 2016.