

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

FRANCESCO JURINIC

**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS ATUAIS SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS E PROJEÇÕES DE LONGO PRAZO**

TESE DE DOUTORADO

**Santa Maria, RS, Brasil
2024**

FRANCESCO JURINIC

**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS ATUAIS SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS E PROJEÇÕES DE LONGO PRAZO**

Tese Apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Prof. Felix Alberto Farret, PhD.

**Santa Maria, RS, Brasil
2024**

Jurinic, Francesco
IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS ATUAIS SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS E PROJEÇÕES DE LONGO PRAZO / Francesco
Jurinic.- 2024.
132 p.; 30 cm

Orientador: Felix Alberto Farret
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2024

1. Eficiência fotovoltaica 2. Mudanças Climáticas 3.
Temperatura 4. Sistema Fotovoltaico 5. Irradiância I.
Farret, Felix Alberto II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, FRANCESCO JURINIC, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

© 2024

Todos os direitos autorais reservados a Francesco Jurinic. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Avenida São Miguel, 1243, Bairro: Centro, Guarani das Missões, RS. 97950-000
Fone (+55) 55 996032215; E-mail: francesco.jurinic@hotmail.com

FRANCESCO JURINIC

**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS ATUAIS SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS E PROJEÇÕES DE LONGO PRAZO**

Tese Apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 12 de abril de 2024:

Prof. Felix Alberto Farret, PhD (UFSM)
(Presidente/Orientador) - Videoconferência

Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix (UFFS)
(Videoconferência)

Prof. Dr. Fabiano Cassol (UFFS)
(Videoconferência)

Prof. Dr. Frank Gonzatti (UFSM)
(Videoconferência)

Prof. Dr. Ghendy Cardoso Junior (UFSM)
(Videoconferência)

Santa Maria, RS, Brasil
2024

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer especialmente a minha esposa Carla que sempre me apoiou e me acompanha em mais uma fase da minha vida, meu filho que nasceu quando estava nesta etapa e me acompanhou até o final desse caminho me inspirando e trazendo ainda mais alegria, e ao meu professor e orientador Felix A. Farret que sempre em sua sabedoria me ajudou e seus conselhos valiosos ficarão comigo para o resto da minha vida.

RESUMO

IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS ATUAIS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E PROJEÇÕES DE LONGO PRAZO

AUTOR: Francesco Jurinic
ORIENTADOR: Prof. Felix Alberto Farret, PhD

Esta tese traz algumas propostas relacionadas com as mudanças climáticas que podem influenciar os sistemas fotovoltaicos e, possivelmente, inferir a influência dos ciclos solares no rendimento dos mesmos. Nesta tese foram realizadas projeções dessas mudanças climáticas em relação à temperatura ambiente, localização, precipitação e irradiância para todos os estados do Brasil. Como os dados da irradiação solar só começaram a serem coletados a partir do ano 2000 em algumas localidades do Brasil, foi preciso converter os dados da insolação solar em irradiação solar usando a equação de Ångström-Prèscott. Para haver maior confiabilidade nos resultados de predição, esta fórmula foi ajustada às características específicas de cada localidade utilizando coeficientes para todos os estados brasileiros, pois tais informações ainda não estão disponíveis na literatura. Estas simulações baseiam-se em séries temporais com a utilização de regressões e de dois softwares. Com o uso dos dados de todos os sistemas fotovoltaicos residenciais existentes no Brasil que já superaram 818 mil instalações, propõe-se um método simples e preciso que pode ser facilmente expandido mundialmente. Analisou-se 658 estações meteorológicas, selecionando uma de cada estado, no período de 1961 a 2020, totalizando 59 anos de informações, com as quais foram projetadas previsões de climas futuros para até 100 anos. Com os resultados obtidos constatou-se que todos os estados brasileiros já sofrem grandes perdas de eficiência devido à alta temperatura ambiental. Estas temperaturas estão aumentando gradativamente ainda mais, podendo chegar a um nível médio máximo anual de mais de 5 °C nos estados do norte-nordeste do país. Observaram-se dois ciclos predominantes para todos os estados brasileiros em relação à irradiância solar, com duração aproximada de 22 e 65 anos. Mesmo com estas perspectivas de redução no rendimento da geração elétrica PV é pouco provável que tais alterações climáticas venham a ameaçar esse setor no Brasil, pois ele ainda permanece com um forte potencial de utilização.

Palavras-chave: Eficiência fotovoltaica. Mudanças Climáticas. Temperatura. Sistema Fotovoltaico. Irradiância. Projeções para energia fotovoltaica.

ABSTRACT

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON CURRENT PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AND LONG TERM PROJECTIONS

AUTHOR: Francesco Jurinic
ADVISOR: Prof. Felix Alberto Farret, PhD

This thesis presents some proposals related to climate change that can influence photovoltaic systems and, possibly, infer the influence of solar cycles on their performance. Projections of these climate changes were carried out in relation to ambient temperature, location, precipitation and irradiance for all states in Brazil. As solar irradiation data only began to be collected from the year 2000 in some locations in the country, it was necessary to convert solar insolation data into solar irradiation using the Ångström-Prèscott search. To ensure greater reliability in the prediction results, this search was adjusted to the specific characteristics of each location using coefficients for all Brazilian states, as such information is not yet available in the literature. These simulations are based on time series using regressions and two software programs. This work used data from all existing residential photovoltaic systems in Brazil, which have already surpassed 818 thousand installations, and proposes a simple and accurate method that can be easily expanded worldwide. 658 meteorological stations were analyzed, with at least one from each state, for the period from 1961 to 2020, totaling 59 years of information, with which future climate forecasts were projected for up to 100 years. With the results obtained, it was found that all Brazilian states already suffer large efficiency losses due to high environmental temperatures, which are gradually increasing even further, reaching a maximum average annual increase of more than 5 °C in the north-northeast states. of the country and two predominant cycles were observed for all Brazilian states in relation to solar irradiance, lasting approximately 22 and 65 years. Even with these prospects for a reduction in the yield of PV electrical generation, it is unlikely that such climate changes will threaten this sector in Brazil, as with all this there remains a strong potential for use.

Keywords: Climate changes. Efficiency. Temperature. Photovoltaic System. Irradiance. Projections for photovoltaic energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes básicos de uma placa fotovoltaica de silício cristalino	16
Figura 2 - Representação de uma célula fotovoltaica.....	23
Figura 3 - Etapas na fabricação de células fotovoltaicas monocristalinas	25
Figura 4 - Etapas na construção das células fotovoltaicas policristalinas. (a) minério de silício purificado, (b) fundição em bloco de silício, (c) os “tijolos de silício” cortados e (d) a fatia (wafers) e a célula fotovoltaica policristalina	26
Figura 5 - Na primeira figura mostra a variação da irradiação sobre o módulo e na segunda à variação da temperatura	31
Figura 6 - Relação entre o Sol e a Terra	33
Figura 7 - Características dos solstícios e equinócios (inclinação do eixo de rotação).....	34
Figura 8 - Variação da altura do Sol com a latitude	35
Figura 9 - Estrutura vertical da atmosfera terrestre até 120 km de altura	37
Figura 10 - Distribuição espectral da irradiação solar.....	38
Figura 11 - Balanço energético da Terra	38
Figura 12 - Média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado na latitude no Brasil.....	40
Figura 13 - Duração dos dias em Porto Alegre – RS	41
Figura 14 - Duração do dia em horas	42
Figura 15 - Mancha solar na região ativa NOAA 12192 observada no visível pelo instrumento HMI a bordo do SDO.....	45
Figura 16 - Previsão do ciclo solar 25	48
Figura 17 - Ciclo de Gleissberg (90 anos).....	49
Figura 18 - Mínimos durante o último milênio de ¹⁴ C	50
Figura 19 - Oscilações do Sol em torno do centro de massa do Sistema Solar, no período de 1945 a 2010.....	51
Figura 20 - Total de placas fotovoltaicas residenciais instaladas em cada estado no Brasil....	86
Figura 21 - Total de inversores instalados em residências em cada estado do Brasil	86
Figura 22 - Dispersão das temperaturas médias anuais de Goiás (GO) de 1961 até 2020 e sua linha de tendência	89
Figura 23 - Aumento da temperatura média anual em cada estado brasileiro.....	90
Figura 24 - Perdas na potência máxima em placas fotovoltaicas em decorrência da temperatura média anual de 2020	92
Figura 25 - Projeção das perdas na potência máxima em decorrência do aumento das temperaturas para geração fotovoltaica	93
Figura 26 - Resultado de estudo comparativo da redução de eficiência de três tipos de módulos fotovoltaicos de silício (filme-fino, monocristalino e policristalino) em função da temperatura de operação	94
Figura 27 - Irradiância média anual ao longo do período estudo para cada estado brasileiro..	97
Figura 28 - Irradiância solar média do Distrito Federal - DF, e dos estados do Amapá - AP, Paraíba - PB e Paraná - PR, desde 1961 a 2020	97
Figura 29 - Irradiância Solar Média mensal do Distrito Federal - DF de 1961 a 2020.....	98
Figura 30 - Média anual de irradiância solar nos estados de Piauí (a) e Amazonas (b) desde 1961 a 2020.....	99
Figura 31 - Mapa do Brasil de cada estado com a média de irradiância solar ao longo de todo o período estudado	101
Figura 32 - Média geral de insolação solar de cada estado brasileiro desde 1961 a 2020	103

Figura 33 - Média de cada ano de insolação solar dos estados do Acre-AC, Roraima-RR e Amapá-AP, desde 1970 a 2020.....	103
Figura 34 - Mapa do coeficiente de determinação (R ²) dos dados interpolados pelo CRU com os dados observados pelas estações do INMET para a Precipitação	105
Figura 35 - Mapa do coeficiente de determinação (R ²) dos dados interpolados pelo CRU com os dados observados pelas estações do INMET para a temperatura média.....	105
Figura 36 Mudanças projetadas na precipitação média anual (%) para o período de 2071-2100 (em relação às médias de 1961-2011) no cenário A2 (alta emissão).....	106
Figura 37 - Mudanças projetadas na precipitação média anual (%) para o período de 2071-2100 (em relação às médias de 1961-2011) no cenário B2 (alta emissão).....	107
Figura 38 - Mudanças projetadas na temperatura média anual (°C) para o período de 2071-2100 (em relação às médias de 1961-2011) no cenário A2 (alta emissão).....	108
Figura 39 - Mudanças projetadas na temperatura média anual (°C) para o período de 2071-2100 (em relação às médias de 1961-2011) no cenário B2 (baixa emissão).....	109
Figura 40 – Estimativa da eficiência em módulos comerciais PV para o ano de 2070.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese dos ciclos do clima, seus períodos, mecanismos e causas	53
Tabela 2 - Projeção das temperaturas para cada bioma brasileiro até 2100	58
Tabela 3 - Estações meteorológicas utilizadas inicialmente neste estudo com coordenadas geográficas	65
Tabela 4 - Estações meteorológicas selecionadas neste estudo com coordenadas geográficas	66
Tabela 5 - Datasheet de algumas placas fotovoltaicas monocristalinas mais utilizadas no Brasil	81
Tabela 6 - Quantidade de sistemas residenciais que utilizam determinada marca de placas fotovoltaicas no Brasil e suas respectivas porcentagens.....	85
Tabela 7 - Projeção dos aumentos de temperaturas médias anuais (°C) em relação a cada cidade/estado estudados	88
Tabela 8 - Diferenças nas temperaturas médias anuais em °C com referência ao padrão de 25 °C.....	91
Tabela 9 - Coeficientes b_0 e b_1 utilizados neste estudo para cada estado do Brasil	96
Tabela 10 - Número médio de horas de brilho do sol mensal e anual dos estados brasileiros	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

14C	Carbono 14
A	Ampere
AM	Massa de ar
a-Si	Silício amorfo
a-Si:H	Silício hidrogenado
a _t	Ruído/Irregularidade
B	Boro
b ₀ e b ₁	Coefficientes empíricos estimados através de regressão linear
B ₂ H ₆	Hidreto de boro
CaTiO ₃	Óxido de cálcio e titânio com estrutura cristalina
CdS	Sulfato de cádmio
CdTe	Célula de Telureto de Cádmio
CH ₄	Metano
CIGS	Célula de Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio
CIS	Célula de Seleneto de cobre índio
CMEs	Ejeções de massa coronal
CO ₂	Dióxido de carbono
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRU	Climatic Research Unit
C _t	Ciclo
EMAs	Estações meteorológicas automáticas
EMCs	Estações meteorologias convencionais
ENSO	El Niño-Oscilação Sul
ESP	Earth System Physics
Eta-HADCM3	Modelo de Previsão e Pesquisa
g	Número de grupos de manchas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ITCP	International Center for Theoretical Physics
k	Fator de correção
LAI	Lei de acesso à informação

MA	Médias móveis
MCGs	Modelos Climáticos Globais
MM4	Modelos de mesoescala
n	Número médio de horas de brilho solar
N	Duração do período diurno
N ₂ O	Óxido nitroso
NCAR	National Center of Atmospheric Research
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
OMA	Oscilação Multidecadal do Atlântico
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
P _{max}	Coefficiente de Temperatura
PV	Fotovoltaica
$PV_{pot}(t)$	Capacidade instalada
R ²	Coefficiente de determinação
R _a	Densidade de fluxo de radiação solar recebida no topo da atmosfera
RegCM4	Modelo Climático Regional
R _g	Densidade de fluxo de radiação solar global
RSDS	Radiação Solar Descendente Superficial
s	Número de manchas observadas individualmente
SDO	Solar Dynamics Observatory
SDSM	Modelos Estatísticos de Redução de Escala
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory
S _t	Sazonalidade
TAS	Temperatura do Ar de Superfície
TSM	Temperatura da superfície do mar
T _t	Tendência
UV	Ultravioleta
V	Volts
V _{cc}	Tensão de circuito aberto
VIS	Visível
V _{oc}	Tensão de circuito aberto

VWS	Velocidade do Vento de Superfície
W	Watts
W/m ²	Watts por metro quadrado
Z _t	Série temporal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO	17
1.2	PROBLEMA	18
1.2	OBJETIVOS DESTA TESE	18
1.2.1	Objetivo Geral.....	18
1.2.2	Objetivos Específicos	18
1.3	JUSTIFICATIVA	19
1.4	CONTRIBUIÇÃO DESTA TESE.....	20
1.5	ESTRUTURA DESTA TESE	21
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	22
2.1.1	Tipos de células fotovoltaicas.....	24
2.1.1.1	Primeira geração de células fotovoltaicas.....	24
2.1.1.2	Segunda geração de células fotovoltaicas.....	26
2.1.1.3	Terceira Geração de Células Fotovoltaicas	28
2.1.2	Módulos fotovoltaicos.....	30
2.1.3	Parâmetros operacionais dos módulos fotovoltaicos.....	30
2.2	ENERGIA SOLAR E SUAS CARACTERÍSTICAS	31
2.2.1	Gases atmosféricos.....	35
2.2.2	Radiação solar	36
2.2.2.1	Duração da exposição ao sol.....	40
2.2.3	Impactos na Geração de Energia Solar	42
2.2.3.1	Impactos das Temperaturas na Geração PV	43
2.2.4	Variação da Irradiação Solar e suas causas.....	43
2.2.5	Ciclos solares	44
2.2.5.1	Manchas Solares	44
2.2.5.2	Fáculas e Redemoinhos Solares.....	46
2.2.5.3	Ejeções de Massa Coronal (CMEs)	46
2.2.5.4	Ciclo Solar de Schwabe	47
2.2.5.5	Ciclo Solar de Hale.....	47
2.2.5.6	Ciclo Inferior e Superior de Gleissberg	48
2.2.5.7	Ciclo de Suess.....	50
2.2.5.8	Ciclos de Hallstatt.....	51
2.2.5.9	Outros Ciclos Solares	52
2.2.5.10	Dióxido de Carbono (CO ₂)	52
2.2.5.11	Erupções vulcânicas.....	54
2.2.5.12	Fenômenos El Niño e La Niña.....	54
2.3	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	55
2.3.1	Previsão Climática.....	56
2.3.2	Cenários Futuros	58
2.4	ENERGIA SOLAR NO BRASIL.....	59
3	MATERIAIS E MÉTODOS	61
3.1	DADOS E ÁREA DE ESTUDOS	62
3.1.1	Dados das Estações Meteorológicas	64
3.1.2	Série Temporal.....	67

3.1.2.1	Análise espectral	68
3.1.3	Sistemas fotovoltaicos no Brasil	69
3.2	RADIAÇÃO SOLAR	70
3.2.1	Duração da Exposição Solar	72
3.2.2	Insolação Solar	73
3.2.3	Softwares Estatísticos de Projeção dos Cenários Futuros	74
3.2.3.1	Modelo Climático Regional (RegCM3)	75
3.2.3.2	Modelo de Previsão e Pesquisa (Eta-HADCM3)	75
3.2.4	Regressão Linear e R²	76
3.3	PERDAS FOTOVOLTAICAS POR TEMPERATURA	78
3.4	PROJEÇÕES FUTURAS	81
4	RESULTADOS	84
4.1	QUANTITATIVOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL	84
4.2	TEMPERATURA AMBIENTE	87
4.2.1	Perda fotovoltaica em decorrência da temperatura	92
4.3	RADIAÇÃO SOLAR	95
4.3.1	Duração da exposição solar	100
4.3.2	Insolação solar	100
4.3.3	Softwares estatísticos modelos regionais (RegCM3, HadRM3)	104
4.4	PROJEÇÕES FUTURAS PARA OS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	110
4.4.1	Mudanças na temperatura ambiente	110
4.4.1.1	Tecnologias de resfriamento para placas fotovoltaicas	111
4.4.1.2	Eficiência dos módulos fotovoltaicos	112
4.4.2	Mudança na Irradiação solar	113
5	CONCLUSÕES FINAIS	115
5.1	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	116
5.2	SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE E TRABALHOS FUTUROS	117
5.3	PUBLICAÇÕES	118
	REFERÊNCIAS	119

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento populacional no mundo e a crescente demanda por energia elétrica, surge a preocupação com o meio ambiente. Por isso, várias nações no planeta se reúnem anualmente na Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, sendo a última conhecida como COP-26 (COP-26). Estas reuniões visam criar iniciativas para redução de emissão de gases poluentes oriundos, por exemplo, das fontes de energia. Para compensar essas emissões surge a ideia da COP-26 de incentivar a utilização das fontes renováveis e sustentáveis como a eólica, a fotovoltaica (PV), as células a combustível, das marés e ondas marinhas. Em particular, os sistemas fotovoltaicos têm a característica especial de utilizar a irradiação solar como fonte direta para geração de energia elétrica.

A energia solar é uma fonte muito relevante, reunindo características como: autonomia, funcionamento que não polui a atmosfera (ou seja, não prejudica nenhum ecossistema), e é uma fonte inesgotável e renovável (FARRET e GODOY 2018).

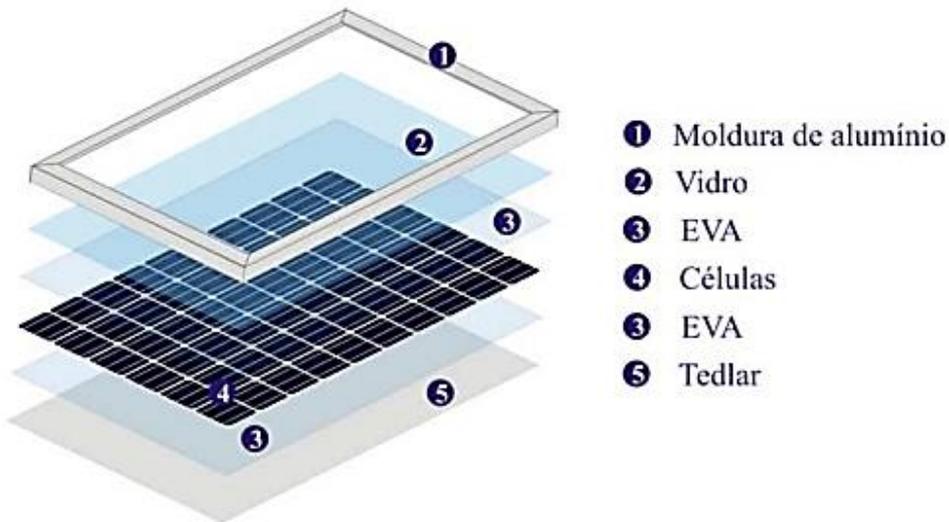
Embora o clima mude naturalmente, os resultados das pesquisas e simulações atualizadas evidenciam que as emissões excessivas de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), e óxido nitroso (N_2O) podem provocar mudanças permanentes e irreversíveis no clima. Como resultado disso surgem novos padrões de classificação do vento, temperatura, pluviosidade, áreas estéreis e circulação dos oceanos (MARENGO, 2001).

No século 21 surgiram duas ideias praticamente consolidadas: primeiro que a temperatura do planeta está aumentando (IPCC, 2013) e, segundo, a implantação de sistemas fotovoltaicos cada vez aumenta mais (IEA 2017 e HAEGEL 2019). Então surge a dúvida: como as mudanças climáticas afetarão a geração de energia no futuro? Considerando essas ideias em conjunto, verifica-se que as condições meteorológicas influenciam no rendimento das placas fotovoltaicas. No caso do silício, o qual é a tecnologia mais predominante hoje em dia (FRAUNHOFER, 2018), sabe-se que ele é muito sensível a essas variações (DUPRÉ, 2015).

As células PV são atualmente o principal componente das placas fotovoltaicas, e é nesta camada que se converte a luz em energia elétrica por meio de uma reação físico-química. O silício representa aproximadamente 60% do custo de um módulo solar. Tais módulos são formados por camadas de silício que têm aproximadamente 0,2 mm de espessura que são feitas a partir de um filme fino de cristal de silício ultrapuro que precisam ser manuseadas com cuidado, pois trincam com facilidade (PORTAL SOLAR, 2024).

Para compensar a fragilidade do silício, as células PVs são construídas com vidro temperado, filme encapsulado, tedlar e uma moldura de alumínio para protegê-las de intempéries, isolar os componentes elétricos e dar maior rigidez, resultando em um aumento de vida útil, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Componentes básicos de uma placa fotovoltaica de silício cristalino



Autor: Fonseca, 2020.

A eficiência dos módulos PV é medida e depois informada aos usuários por uma folha de dados fornecida pelos fabricantes sob as condições padrões de teste STC (Standard Test Conditions). O STC estabelece uma temperatura de teste de 25 °C, irradiância de 1000 W/m² e massa de ar AM (Air Mass) = 1,5 apesar de um sistema fotovoltaico raramente operar nessas condições (SCHWINGSHACKL, 2013 e DGS, 2007). Via de regra, o rendimento do painel PV sofre grande influência em relação à temperatura ambiente, ventos e a irradiação incidente sobre ele. Devido a tais características surge a necessidade de se estudar os fenômenos do planeta Terra ao longo dos próximos anos e desta forma entender-se melhor como essas tecnologias vão reagir.

O desempenho de um painel PV é influenciado principalmente pela tecnologia de fabricação. Além disto, a temperatura de funcionamento de um módulo fotovoltaico depende de alguns fatores climáticos, como radiação solar incidente, temperatura ambiente, velocidade e direção dos ventos, além das propriedades físicas dos materiais das células e estrutura de montagem (AKHSASSI, 2018). Um módulo fotovoltaico típico hoje em dia converte entre 3 e 23% a radiação solar incidente em energia elétrica, dependendo do tipo de tecnologia de

fabricação das células solares e das condições climáticas a que elas estão expostas. Deve-se levar em conta que boa parte da radiação solar incidente é convertida também em calor, o que aumenta significativamente a temperatura do módulo fotovoltaico e reduz sua eficiência (DUBEY, 2012).

Além dos sistemas fotovoltaicos sofrerem uma redução na geração de energia devido ao aumento da temperatura, eles também sofrem degradação, influenciada pela umidade e pela radiação ultravioleta (UV). Essa degradação afeta também o comportamento elétrico do dispositivo e causa uma instabilidade nos componentes, mostrando que as previsões climáticas podem auxiliar nas projeções futuras dos sistemas fotovoltaicos.

Sabe-se que o sol é a maior fonte primária de toda a energia existente no planeta Terra e ela é inesgotável, se for considerado o tempo terrestre. A utilização direta dessa fonte com células fotovoltaicas convertendo a energia luminosa em energia elétrica é um fator decisivo para a sua escolha como fonte conversora. Deve-se isto ao fato de que o PV é considerado um dos poucos sistemas que podem gerar energia sem partes móveis, reduzindo drasticamente as manutenções necessárias.

A pesquisa proposta nesta tese sugere a busca por um método que auxilie na projeção dos cenários futuros para todos os sistemas fotovoltaicos no Brasil e no mundo, visando aprofundar os conhecimentos na área e auxiliar as instalações futuras com novos parâmetros de temperatura ambiente e irradiação em cada estado. Esta abordagem demonstrará que o tema é atual, inovador e se enquadra na linha de pesquisa do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – UFSM. Com isto espera-se uma grande contribuição para o Brasil e para o mundo no cenário de previsões climáticas e energias renováveis que só está aumentando cada vez mais.

1.1 MOTIVAÇÃO

A alta temperatura ambiente combinada com o aumento da temperatura de operação das células fotovoltaicas afetam diretamente o rendimento e a potência de saída dos painéis fotovoltaicos submetidos a radiação solar. Conforme Farret e Simões (2006), Odeh e Behnia (2009) e Bahaidarah et al. (2013), quando o painel solar fica exposto ao sol por muito tempo, sua temperatura tende a aumentar, reduzindo significativamente o rendimento e a potência.

1.2 PROBLEMA

Qual a influência das mudanças climáticas nos sistemas fotovoltaicos existentes e nas futuras instalações em cada estado do Brasil e no mundo?

1.2 OBJETIVOS DESTA TESE

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo detalhado dos impactos das mudanças climáticas nos atuais sistemas fotovoltaicos usando dados históricos, com propostas para minimizar possíveis impactos e projeções de longo prazo.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta tese são:

- 1) Analisar os efeitos climáticos sobre todos os sistemas fotovoltaicos residenciais já instalados no Brasil e assim expansível mundialmente com os dados meteorológicos sob os quais eles funcionam nos estados com maior período de dados registrados e disponíveis; com isto espera-se fazer uma associação entre a temperatura do ambiente, a precipitação, a irradiação e a potência gerada por esses sistemas com uma projeção associada para os tempos futuros;
- 2) Demonstrar as diferenças de geração de energia em relação aos parâmetros dos painéis PV e se estes estão conforme as características estipuladas pelos fabricantes e se sua vida útil também não foi alterada;
- 3) Fazer projeções de 25, 50, 75 e 100 anos em relação às mudanças climáticas sobre temperatura e radiação solar, tendo como referência até 59 anos de dados meteorológicos disponíveis;
- 4) Projetar como estarão as temperaturas e precipitações no futuro para o Brasil em relação as mudanças climáticas em até 100 anos para dois cenários: o pessimista e o otimista;
- 5) Analisar as mudanças nas temperaturas e radiação solar que ocorrem no Brasil e assim verificar quais estados sofrerão um maior aumento ao longo dos anos e qual terá uma maior propensão em mudanças nas instalações dos sistemas fotovoltaicos novos;

- 6) Propor métodos estatísticos que possibilitem uma melhor interpretação das mudanças climáticas previstas para os sistemas fotovoltaicos e que possam também serem replicadas mundialmente;
- 7) Encontrar os coeficientes empíricos (b_0 e b_1) da equação de Ångström-Prèscott de cada estado brasileiro para a conversão da insolação solar em radiação solar global;
- 8) Verificar se existem ciclos evidentes na radiação solar no Brasil e em cada estado e qual é seu período de variação.

1.3 JUSTIFICATIVA

Esta tese visa reunir os principais efeitos do ambiente e da fabricação sobre as placas fotovoltaicas instaladas em residências pelo Brasil e no planeta devido às mudanças climáticas, incluindo projeções de aumento das temperaturas e das incertezas relacionadas à irradiação solar nos próximos anos. Para isto, pretende-se fazer previsões usando dados de vários sistemas fotovoltaicos já instalados ao longo dos anos e de dados das principais estações meteorológicas de cada estado do Brasil. Essa abordagem de utilizar dados de sistemas fotovoltaicos já instalados ao longo dos anos, juntamente com dados das principais estações meteorológicas de cada estado de um país das dimensões do Brasil, é muito promissora para realizar previsões e análises sobre a perspectiva dos sistemas fotovoltaicos no país e até mesmo globalmente.

Com as informações obtidas para os sistemas fotovoltaicos nesta tese pretende-se analisar em detalhes os ciclos solares existentes com dados históricos milenares obtidos na natureza de geleiras, árvores e corais. Com isto, pode-se analisar como foram as temperaturas no planeta Terra há mais de 1000 anos e é possível projetar possíveis cenários futuros de temperatura e incidência solar para poder-se avaliar os impactos potenciais dessas mudanças no desempenho dos sistemas fotovoltaicos.

Se houver um aumento significativo na incidência solar devido a uma maior atividade solar, isso pode impulsionar ainda mais a instalação de sistemas fotovoltaicos e incentivar o desenvolvimento de projetos de energia solar em larga escala. Se houver uma redução na incidência solar devido a uma recessão solar ou outras variações climáticas, pode ser necessário propor sistemas fotovoltaicos maiores para gerar a mesma quantidade de energia elétrica que em condições normais. Isso pode envolver o uso de tecnologias mais eficientes e a implementação de estratégias de mitigação para lidar com condições climáticas adversas. Em qualquer caso, a análise cuidadosa das tendências climáticas passadas e presentes, juntamente

com projeções futuras, é essencial para informar decisões de planejamento e investimento no setor de energia solar e garantir uma transição bem-sucedida para uma economia de baixo carbono.

Encontrar os coeficientes empíricos da equação de Ångstrom-Prèscott de todos os estados brasileiros é de muita importância. Essa análise proporciona uma valiosa contribuição para a comunidade científica e para profissionais envolvidos no setor de energia solar no Brasil, permitindo estimativas mais precisas da irradiação solar e uma melhor implementação de sistemas fotovoltaicos em todo o país. Embora não exista atualmente nenhum trabalho na literatura apresentando esses valores para todo o Brasil, essa iniciativa certamente preencheria uma lacuna importante no conhecimento e poderia levar a avanços significativos no campo da energia solar no país e no mundo. Esses estudos e análises podem fornecer informações valiosas para tomadores de decisão, pesquisadores e profissionais da indústria de energia solar, ajudando a orientar políticas públicas, investimentos e estratégias de desenvolvimento sustentável no Brasil e no mundo.

1.4 CONTRIBUIÇÃO DESTA TESE

O estudo desta tese é original, pois é o primeiro trabalho que calcula e encontra dados de irradiação solar de 59 anos atrás para todos os estados do Brasil, possibilitando a metodologia ser replicada mundialmente. Praticamente todos os sites e bancos de dados disponíveis com informações sobre irradiação solar, só têm estado disponíveis a partir do ano de 2000 ou trazem como uma média diária, mensal ou anual. Sabe-se por estas informações demonstradas nesta tese, que tais valores sofrem alterações ao longo dos anos e continuarão a ser modificadas futuramente também.

Essa tese traz as informações de todos os sistemas fotovoltaicos residenciais instalados no Brasil até junho de 2022, maximizando a compreensão dos impactos das mudanças climáticas nos sistemas fotovoltaicos. Ao calcular e disponibilizar dados de irradiação solar de vários anos para todo o Brasil, preenche-se uma lacuna importante na disponibilidade de informações sobre irradiação solar histórica e regional. Com isso pressupõe-se um melhor conhecimento do futuro potencial em cada estado brasileiro, facilitando a tomada de decisão para implantações de novas unidades geradoras visando máximo potencial gerador possível para cada região e assim expansível para o mundo.

A disponibilidade de dados de irradiação solar de longo prazo também é importante para se estudar como as condições climáticas e a disponibilidade de energia solar. Tais condições podem ter mudado ao longo do tempo devido a fatores como variações solares, mudanças na cobertura de nuvens e outras influências climáticas, além do potencial de impactar positivamente a pesquisa e o desenvolvimento de energia solar em escala global. Essa abordagem original e abrangente certamente abrirá novas oportunidades de pesquisa e aplicação no campo da energia solar e da climatologia.

1.5 ESTRUTURA DESTA TESE

Esta Tese é estruturada da seguinte forma:

- O atual capítulo 1 estabelece o contexto da pesquisa, destacando a área de estudo e a importância do problema investigado. Define-se claramente os objetivos da pesquisa e as questões que serão abordadas. Justifica a relevância da pesquisa, explicando por que ela é necessária e como pode contribuir para o conhecimento existente sobre o assunto.
- O Capítulo 2 é uma revisão abrangente da literatura existente na área de estudo, citando autores relevantes e destacando teorias e conceitos importantes. Aqui é demonstrada a aplicabilidade e a base teórica para o desenvolvimento deste assunto, contextualizando-a no campo acadêmico. Explora as tecnologias existentes de sistemas fotovoltaicos e discute suas características em relação ao clima, fornecendo um embasamento teórico para o estudo.
- O capítulo 3 apresenta as metodologias que serão empregadas na pesquisa, explicando as escolhas feitas e justificando a sua aplicação. Detalha os procedimentos e técnicas utilizadas para coletar e analisar os dados, garantindo a transparência e a replicabilidade do estudo.
- O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação das metodologias descritas no capítulo 3. Desenvolve análises e interpretações dos dados coletados, mostrando como os objetivos da pesquisa foram atingidos e quais insights foram obtidos.
- O capítulo 5 resume os principais resultados e conclusões da pesquisa. Destaca as contribuições específicas da tese para o campo de estudo. Sugere possíveis direções para trabalhos futuros com base no conteúdo desta pesquisa.
- As referências bibliográficas listam todas as fontes citadas ao longo da tese, seguindo um padrão de formatação específico.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO DA LITERATURA

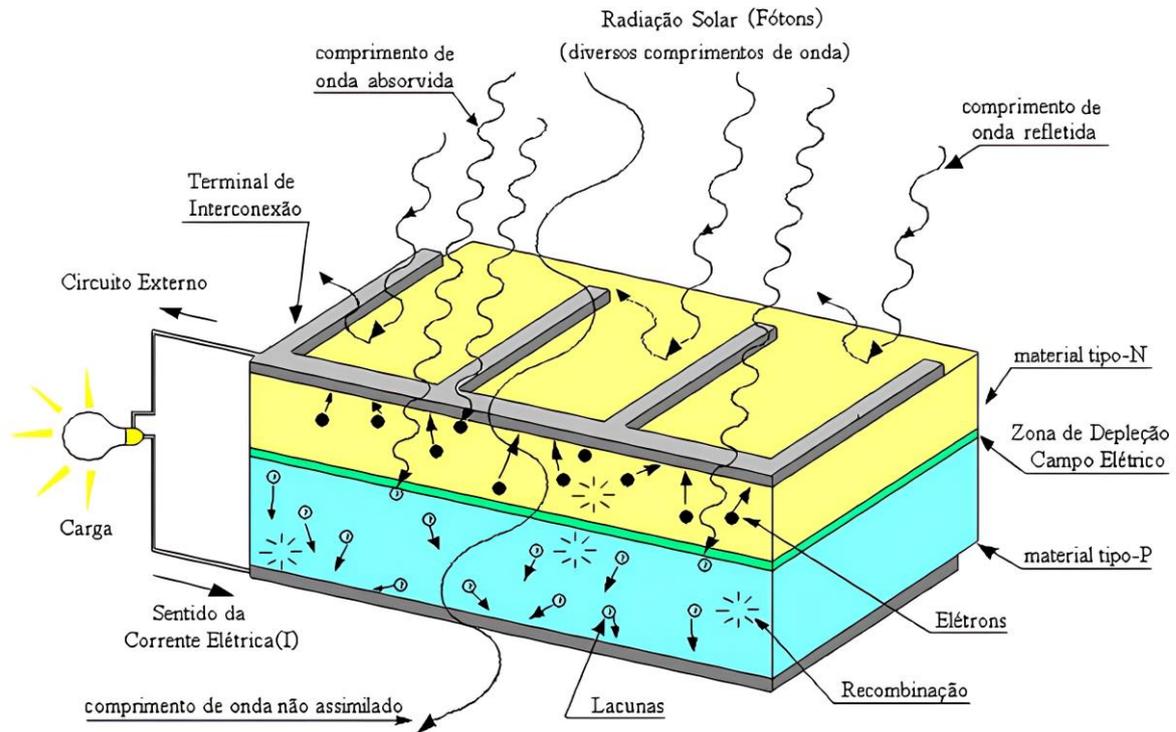
Apresenta-se neste capítulo uma revisão da literatura sobre os impactos das mudanças climáticas nos sistemas fotovoltaicos e os principais assuntos abordados nesta tese. Descreve-se como o desenvolvimento sustentável está relacionado a mitigação das mudanças climáticas, pois as fontes de energia tiveram acentuado desenvolvimento no início da revolução industrial. Tais fontes eram altamente poluidoras e desde então interferem diretamente no clima do planeta, afetando cada vez mais as cidades e regiões com essas instalações. Felizmente nas últimas décadas, os países estão iniciando uma transição energética para as energias renováveis. No entanto, essas mudanças climáticas podem e afetam as energias renováveis também, aumentando as variáveis do clima e tornando mais frequentes as condições extremas.

2.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A principal utilização dos sistemas de geração fotovoltaica começou na corrida espacial, pois eram necessários equipamentos com capacidade para gerar energia no espaço sem precisar de algum tipo de combustível a ser levado da terra. Essas células PV são basicamente compostas de materiais semicondutores, capazes de transformar a energia luminosa em energia elétrica proveniente do sol ou até mesmo de outras fontes de luz.

O Silício (Si) é um dos materiais semicondutores mais utilizados em camadas para a fabricação das células fotovoltaicas por apresentarem ótimas características na geração de energia e existirem em grande abundância no mundo. O semicondutor (geralmente Si) tem metade no seu átomo trivalente (em geral, o boro B) uma camada do tipo p, outra camada com dopagem de átomos pentavalentes (em geral, o fósforo P) do tipo n. Estes materiais formam a junção PN, onde o movimento das cargas gera um campo elétrico. A luz ao incidir sobre uma célula semicondutora faz com que na junção pn, os fótons sejam absorvidos desalojando elétrons dos átomos da célula, conforme ilustra a Figura 2. Estes elétrons livres movem-se na estrutura cristalina do material, criando pares do tipo elétron-lacuna. O movimento de elétrons e lacunas forma a corrente elétrica num processo físico chamado efeito fotovoltaico, com intensidade proporcional à intensidade da luz incidente (PINHO e GALDINO, 2014).

Figura 2 - Representação de uma célula fotovoltaica



Fonte: Ghensev, 2006.

Em alguns países europeus, a produção de energia fotovoltaica já atinge 30% da produção geral em dias de céu claro (PELLAND et al., 2013). Na Alemanha, a produção PV já excede 40% da demanda elétrica atualmente (PEREZ et al., 2013).

Visando uma crescente inserção do sistema fotovoltaico no Brasil, surge a preocupação com a sua confiabilidade e a preocupação por ser uma fonte intermitente e importada que está sendo inserida no Sistema Elétrico de Potência (SEP). Este aumento na dependência da energia fotovoltaica comprova a importância dos estudos relacionados com a intenção de se gerar mais dados e aumentar sua confiabilidade.

Com relação à geração de energia fotovoltaica, existem alguns fatores climáticos que são mais críticos e que devem ser levados em consideração, tais como a radiação de ondas curtas descendentes (BICHET et al. 2019), intensidades dos ventos, duração da exposição ao sol (CROOK et al. 2011) e temperatura ambiente da superfície (SAWADOGO; ABIODUN; OKOGBUE, 2020). Por estas razões, é grande o interesse do Operador Nacional de Sistema (NOS) em prever as consequências de tais fatores climáticos. Muitos trabalhos foram publicados a respeito da previsão de radiação solar. Entre eles, os trabalhos de Diagne et al.

(2013), de Voyant et al. (2017) e de Inman et al. (2013) que fazem uma profunda revisão dos modelos mais empregados nessa área.

2.1.1 Tipos de células fotovoltaicas

Nesta seção traz-se a descrição sobre alguns tipos de células fotovoltaicas. Deve-se dizer inicialmente que a sua fabricação, na grande maioria, usa o silício (Si) que pode ser constituído de cristais de silício monocristalinos, policristalinos ou amorfos. Com isto, a classificação das células fotovoltaicas pode ser dividida em 3 gerações. A primeira delas teve seu início nos anos 50 e utilizam o silício cristalizado como material semicondutor, ficando até hoje como a tecnologia mais empregada no mundo.

Na década de 90, surgiu a segunda geração baseada em filme fino. Esta, porém, não ganhou espaço no mercado por apresentar menores eficiências. Já a terceira geração surgiu apenas nos últimos anos, com vários estudos e inúmeros materiais diferentes, resultando em eficiências maiores. Esta terceira geração, contudo, ainda não ganhou mercado devido à dificuldade da produção em larga escala e seu preço elevado.

2.1.1.1 Primeira geração de células fotovoltaicas

2.1.1.1.1 Célula de Silício Monocristalino (mono-Si)

Assumindo-se que as células de silício monocristalino são os conversores solares diretos mais comumente usados e comercializados, sua tecnologia de produção é um processo básico muito bem montado.

A produção das células de silício começou com a exploração dos cristais de dióxido de silício. O material é desoxigenado, purificado e curado em um grande forno. Este método atinge 98% a 99% de pureza, o que é bastante eficiente do ponto de vista energético e de custo. Todavia, o silício para uso em células fotovoltaicas requer outros dispositivos semicondutores e de maior pureza, na faixa de 99,9999%. (BARROS, 2011).

Para o silício ser usado na indústria eletrônica, além do alto grau de pureza, o material deve ter uma estrutura monocristalina e uma baixa densidade de defeitos na rede. O processo mais utilizado para se chegar às qualificações desejadas é chamado “processo Czochralski”. Neste processo, o silício do tipo p é fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante, que é normalmente o boro (FURTADO, 2011). Através da partícula de um cristal

adequadamente orientado e sob rígido controle de temperatura vai-se tirando do material fundido um grande cilindro de silício monocristalino superficialmente dopado. As barras são então cortadas em forma de pastilhas finas, com aproximadamente 0,3 mm de espessura, ficando sua eficiência com uma conversão da luz solar em eletricidade entre 15% e 19%. Está entre as mais eficientes e também as mais caras no mercado devido ao seu processo de fabricação e da necessidade de um alto teor de pureza do silício. (DOS PASSOS et al. 2017).

Na Figura 3 pode-se ver algumas fases do processo de fabricação das células fotovoltaicas monocristalinas, sendo da esquerda para direita, o minério de silício purificado, o forno de Czochralski, o lingote de silício, as fatias (wafers) e finalmente a célula fotovoltaica monocristalina.

Figura 3 - Etapas na fabricação de células fotovoltaicas monocristalinas



Fonte: PORTAL SOLAR, 2024.

2.1.1.1.2 Célula de Silício Policristalino (multi-Si)

Muito semelhante a célula monocristalina, a célula de silício policristalino tem um processo de fabricação levemente diferente. O silício já purificado é derretido em um cadinho de quartzo e moldado em um lingote. A partir de um processo de aquecimento e resfriamento, o bloco torna-se sólido e consegue-se assim obter uma formação cristalina muito uniforme. Ao contrário do processo de formação de um único cristal, este silício cristaliza livremente, formando múltiplos cristais, daí o nome policristalino. Consequentemente, por esse motivo, essas células apresentam uma menor eficiência em relação à monocristalina porque os múltiplos cristais fazem com que os elétrons dos átomos se recombinem mais facilmente. Com isto, há um aumento na perda por recombinação, ficando com uma eficiência de 13% a 15% (PORTAL SOLAR, 2024).

As etapas de fabricação das células policristalinas são as mesmas das células monocristalinas, ou seja, cortes de lingotes e lascas, dopagem e aplicação de camadas antirreflexo e dos contatos. Devido ao processo de fabricação mais simples, as células de silício policristalino possuem custos mais baixos e, até recentemente, eram o tipo de painel fotovoltaico mais comercializados no mundo. No entanto, as melhorias no processo de fabricação das células monocristalinas reduziram os custos e vêm progredindo desde 2019 pela sua maior eficiência (PORTAL SOLAR, 2024).

Na Figura 4, podem ser observadas da esquerda para a direita as etapas de fabricação das células fotovoltaicas policristalinas.

Figura 4 - Etapas na construção das células fotovoltaicas policristalinas. (a) minério de silício purificado, (b) fundição em bloco de silício, (c) os “tijolos de silício” cortados e (d) a fatia (wafers) e a célula fotovoltaica policristalina



Fonte: PORTAL SOLAR, 2024.

2.1.1.2 Segunda geração de células fotovoltaicas

Apesar de apresentarem menor eficiência, a segunda geração de células fotovoltaicas tem um preço de produção muito reduzido, levando várias indústrias a optarem pela utilização de alguma dessas opções. Um exemplo muito visto delas é a célula fotovoltaica das calculadoras e de alguns brinquedos, capazes de recarregar suas baterias apenas com uma pequena célula exposta à luz.

Os melhores painéis de filme fino da segunda geração apresentam entre 2% e 3% menos eficiência que as de silício cristalino. Os materiais de telureto de cádmio (CdTe), seleneto de cobre, gálio e índio (CIGS) e silício amorfo (a-Si) são os três mais utilizados para essa tecnologia.

2.1.1.2.1 Célula de Silício Amorfo (a-Si)

A célula de Silício Amorfo (sem forma) recebe este nome apenas por não ser feita de uma estrutura cristalina e sim de uma rede irregular, produzida a partir do silicato gasoso (SiH_4), aquecido em reatores de plasma para formar um silício hidrogenado (a-Si:H). O processo de dopagem utiliza o hidreto de boro (B_2H_6) nas camadas Tipo-P e a fosfina (PH_3) para a camada Tipo-N.

A célula de silício amorfo além de apresentar uma baixa eficiência devido à hidrogenação do seu material, vai ter uma queda durante o primeiro ano de uso decorrente da degradação induzida pela luz, conhecida como efeito Staebler-Wronski.

2.1.1.2.2 Célula de Seleneto de Cobre e Índio (CIS)

As células de seleneto de cobre e índio são produzidas a partir de uma fina camada de cobre, índio e selênio (CuInSe_2) depositada sobre um substrato revestido primeiramente com uma camada de molibdênio (Mo). Esse substrato pode ser vidro ou metal flexível. Essas células não apresentam degradação igual ao silício amorfo pela luz, mas sofrem instabilidade devido a ambientes úmidos e quentes, necessitando uma boa selagem dos módulos. Sua eficiência fica entre 11% e 14%.

2.1.1.2.3 Célula de Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS)

A construção da célula de Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio é semelhante as CIS, porém com a adição do gálio, que se junta com o Índio formando uma liga que permite melhores desempenhos. Com isto, no entanto, há uma redução de sua eficiência que é pouco menos que 10%.

2.1.1.2.4 Célula de Telureto de Cádmio (CdTe)

O substrato da célula de Telureto de Cádmio tem o vidro revestido na parte traseira com uma camada de óxido transparente condutivo (TCO), que vai agir como um contato frontal. As camadas semicondutoras, são feitas de sulfato de cádmio (CdS), Tipo-N, e telureto de cádmio (CdTe), Tipo-P, que podem ser aplicados por meio de silk screen (como uma impressão), pirólise pulverizada e deposição galvânica. Também não apresentam degradação devido à luz, porém a sua fabricação apresenta riscos ambientais em decorrência da toxicidade do cádmio.

Sua eficiência em módulos comerciais fica entre 6% e 9%, embora já tenha alcançado em laboratório 16,5%.

2.1.1.2.5 Célula de Arseneto de Gálio (GaAs)

A célula de Arseneto de Gálio apresenta a maior eficiência entre as de filme fino de junção única, podendo ultrapassar os 30%. Além de apresentar um bom desempenho e boas propriedades elétricas, são mais resistentes ao calor. Só não são muito utilizadas atualmente, devido ao valor elevado do processo de fabricação, ficando restritas a usos espaciais e militares.

2.1.1.2.6 Célula de Multijunção

Uma célula fotovoltaica multijunção é basicamente uma célula de filme fino com múltiplas camadas do Tipo-PN, com diferentes tipos de materiais, obtendo uma maior eficiência por aproveitar uma faixa mais ampla do espectro eletromagnético da radiação solar. Esta célula possui duas técnicas de fabricação. Uma delas é o empilhamento mecânico, onde cada camada é considerada como um dispositivo diferente e recebe contatos próprios para captação dos elétrons. Na segunda técnica, as camadas semicondutoras são ligadas em série, resultando em apenas dois terminais, e por isto essa configuração é chamada de monolítica.

As maiores eficiências da célula fotovoltaica multijunção foram encontradas em células solares utilizando células multijunção, onde uma com quatro junções pode ultrapassar os 46% de eficiência. Porém, ambas as técnicas são muito complexas e onerosas para fabricação, resultando numa baixa utilização comercial.

2.1.1.3 *Terceira Geração de Células Fotovoltaicas*

As células fotovoltaicas da terceira geração, também conhecidas como a última geração, são as mais recentes e com tecnologias ainda em desenvolvimento.

2.1.1.3.1 Célula Híbrida de Heterojunção (HIT/HJT)

Mesmo a célula híbrida de heterojunção sendo considerada da terceira geração, ela começou a ser desenvolvida há 20 anos pela antiga empresa Sanyo. A partir de 2010 voltou-se a utilizar técnicas e tecnologias diferentes com a queda da patente.

As células HIT são basicamente feitas de células fotovoltaicas de silício cristalino com camadas de silício amorfo, uma pura e duas dopadas em suas superfícies. Além do ganho de eficiência devido às camadas de silício amorfo, há um aumento de aproximadamente 17%. Estas células fotovoltaicas de heterojunção possuem um coeficiente de temperatura menor, resultando em uma menor influência da temperatura e funcionando melhor que as células tradicionais em lugares quentes.

2.1.1.3.2 Célula de Perovskita

A Perovskita é um minério de óxido de cálcio e titânio com estrutura cristalina (CaTiO_3). Para produzir o efeito fotovoltaico são compostas por cátion inorgânico (chumbo ou estanho), um cátion orgânico e um halogênio (RAPHAEL et al. 2018). Essas células fotovoltaicas apresentam um forte potencial de utilização no futuro devido ao seu baixo preço de produção e uma eficiência que já ultrapassa os 22%. Além disso, apresentam algumas características das células de filme fino, tais como: flexibilidade, semitransparência e leveza (RAPHAEL et al. 2018). Os empecilhos por enquanto para sua utilização estão na baixa durabilidade e estabilidade em locais quentes e úmidos, além do grande problema com o chumbo, que é altamente tóxico e perigoso para o meio ambiente, ainda que seja o que garante a alta eficiência a esse modelo.

2.1.1.3.3 Célula orgânica (OPV)

As células orgânicas são produzidas por polímeros conjugados, que apresentam propriedades elétricas e ópticas parecidas com a dos metais e aos semicondutores (LOURENÇO JUNIOR et al., 2020). Essas células, de apenas uma camada, possuem uma eficiência muito baixa, aproximadamente 0,1%. No entanto, utilizando diferentes técnicas de heterojunção conseguem alcançar até 18% em laboratório (LIU et al., 2020).

As células orgânicas têm a vantagem de serem flexíveis, ter baixo custo de produção e ter menor impacto ambiental. A sua grande desvantagem está na instabilidade de operação devido à degradação ambiental, caso não tenha uma proteção eficiente.

2.1.1.3.4 Célula Sensibilizada por Corante (DSSC)

As células sensibilizadas por corante, também conhecidas como células grätzel, são construídas a partir de um substrato de alta condutividade com mais de 80% de transparência, onde são aplicadas duas folhas de material transparente condutor que vão agir como coletores de corrente. Em conjunto com esta estrutura são depositados o semicondutor e o catalisador (O'REGAN, 1991). As vantagens de sua fabricação estão na resistência mecânica, composição híbrida (inorgânico e orgânico), fabricação simples, matéria-prima barata, leveza e podem possuir diferentes cores. Estas células podem apresentar uma eficiência de até 13% (MATHEW, 2014). As desvantagens delas, porém, estão na instabilidade em climas adversos, perigo de toxicidade e corrosão quando fabricadas com chumbo e, a principal, elas têm uma baixa vida útil que fica em apenas 10 anos.

2.1.2 Módulos fotovoltaicos

Um módulo é a junção de células fotovoltaicas ligadas internamente em séries e/ou paralelo, conforme características do fabricante para atingir certa configuração de saída. As células de silício operaram em aproximadamente 0,6 Volts (V) cada, conforme a dimensão do módulo e a potência necessária, utilizam entre 60 a 72 células em média.

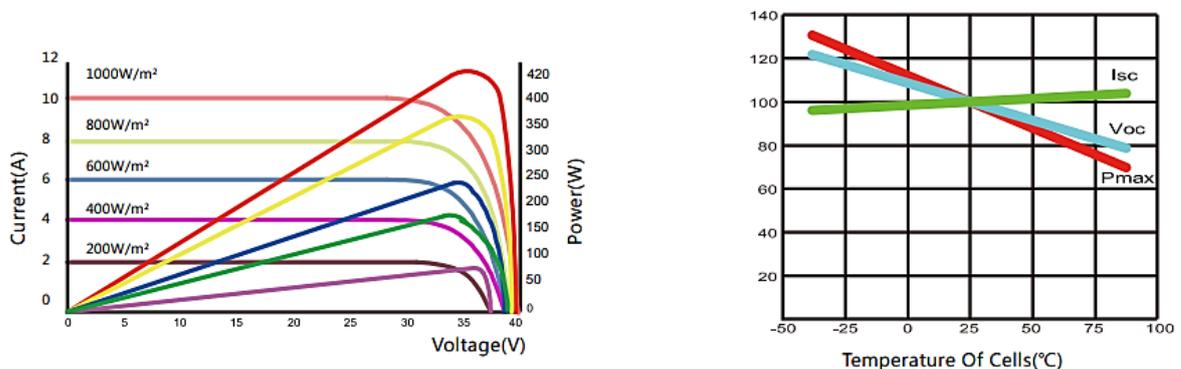
Os módulos fotovoltaicos ficam com uma faixa de 45 V de V_{oc} (tensão de circuito aberto) e de I_{sc} (corrente de curto-circuito) entre 8 a 10 Amperes (A) nos módulos de silício padrão. No entanto, estes módulos podem ter muita variação conforme for necessário para a sua configuração com um inversor e o sistema fotovoltaico completo (PINHO; GALDINO, 2014). Atualmente, a quantidade de células por módulo está aumentando cada vez mais para poderem atingir maiores potências.

2.1.3 Parâmetros operacionais dos módulos fotovoltaicos

Para a operação dos módulos fotovoltaicos existem algumas características que influenciam seu funcionamento que são geralmente os parâmetros elétricos, obtidos empiricamente quando expostos a determinadas condições de referência para medição, chamadas de condições padrão de teste (STC). Para atender às STC, a radiação deve estar numa faixa espectral suficiente (1,5 AM) e Irradiância (G, definida como a intensidade da radiação solar incidente em uma superfície vertical 1000 W/m^2) a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Os fabricantes fornecem esses

dados, revelando informações importantes para o uso dos módulos (como potência, tensão, corrente, durabilidade, etc.) na forma de ficha técnica. As condições padrão de operação real dos módulos dificilmente vão estar nessa faixa, mesmo em condições controladas. Deve-se dizer que com a passagem da corrente elétrica, mesmo que a temperatura do ar seja os 25 °C, a temperatura da célula vai ultrapassar esse valor em no mínimo 10 °C chegando até mais que 30 °C. Como exemplo, a Figura 5 mostra os gráficos do Datasheet de uma placa solar fotovoltaica da marca LEAPTON, modelo LP166*166-M-72-MH, de 430 W de potência, demonstrando como a influência da irradiação e da temperatura afetam diretamente toda a geração.

Figura 5 - Na primeira figura mostra a variação da irradiação sobre o módulo e na segunda à variação da temperatura



Fonte: LEAPTON solares, 2024.

As placas fotovoltaicas têm quase uma resposta linear em relação à temperatura que é proporcional à irradiação incidente.

2.2 ENERGIA SOLAR E SUAS CARACTERÍSTICAS

O Sol é a estrela mais próxima da Terra e, consequentemente, a melhor e mais bem estudada. Muito do que se sabe sobre as estrelas deve-se ao Sol (Silva, 2006). Sua idade é de aproximadamente 4,6 bilhões de anos, com uma composição de 92% de hidrogênio e o restante hélio, porém tem uma pequena parte de 0,1% que é composta principalmente de carbono, nitrogênio, oxigênio e outros materiais.

Segundo Calvin J. Hamilton, 1997:

A camada externa visível do Sol é chamada fotosfera, e tem uma temperatura de 6.000 °C. A energia solar é gerada no núcleo do Sol. Lá, a temperatura (15.000.000 °C) e a pressão (340 bilhões de vezes a pressão atmosférica da Terra ao nível do mar) são tão intensas que ocorrem reações nucleares. Estas reações transformam quatro prótons ou núcleos de átomos de hidrogênio em uma partícula alfa, que é o núcleo de um átomo

de hélio. A partícula alfa é aproximadamente 0,7% menos massiva do que quatro prótons. A diferença em massa é expelida como energia e carregada até a superfície do Sol, através de um processo conhecido como convecção, e é liberada em forma de luz e calor. A energia gerada no interior do Sol leva um milhão de anos para chegar à superfície. A cada segundo, 700 milhões de toneladas de hidrogênio são convertidos em cinzas de hélio. Durante este processo, 5 milhões de toneladas de energia pura são liberados; portanto, com o passar do tempo, o Sol está se tornando mais leve.

Sabe-se que o Sol terá ainda uma vida útil de aproximadamente 5 bilhões de anos, então podendo ser considerado uma fonte inesgotável de energia para os padrões terrestres, além de ser responsável por todos os processos atmosféricos.

A energia recebida do Sol na Terra vem em forma de ondas eletromagnéticas e é chamada de irradiação, sendo a principal responsável pela influência das mudanças climáticas. A quantidade de energia solar absorvida pela superfície da Terra depende da irradiância que penetra no sistema e das propriedades reflexivas da Terra. Com qualquer mudança nesses parâmetros, a distribuição de temperatura do sistema atmosfera-superfície tende a se ajustar para restaurar o equilíbrio (PIDWIRNY, 2006). Com isso o planeta tenta se manter entre absorver irradiação e emitir radiação infravermelha para o espaço, na tentativa de manter uma temperatura de equilíbrio na Terra.

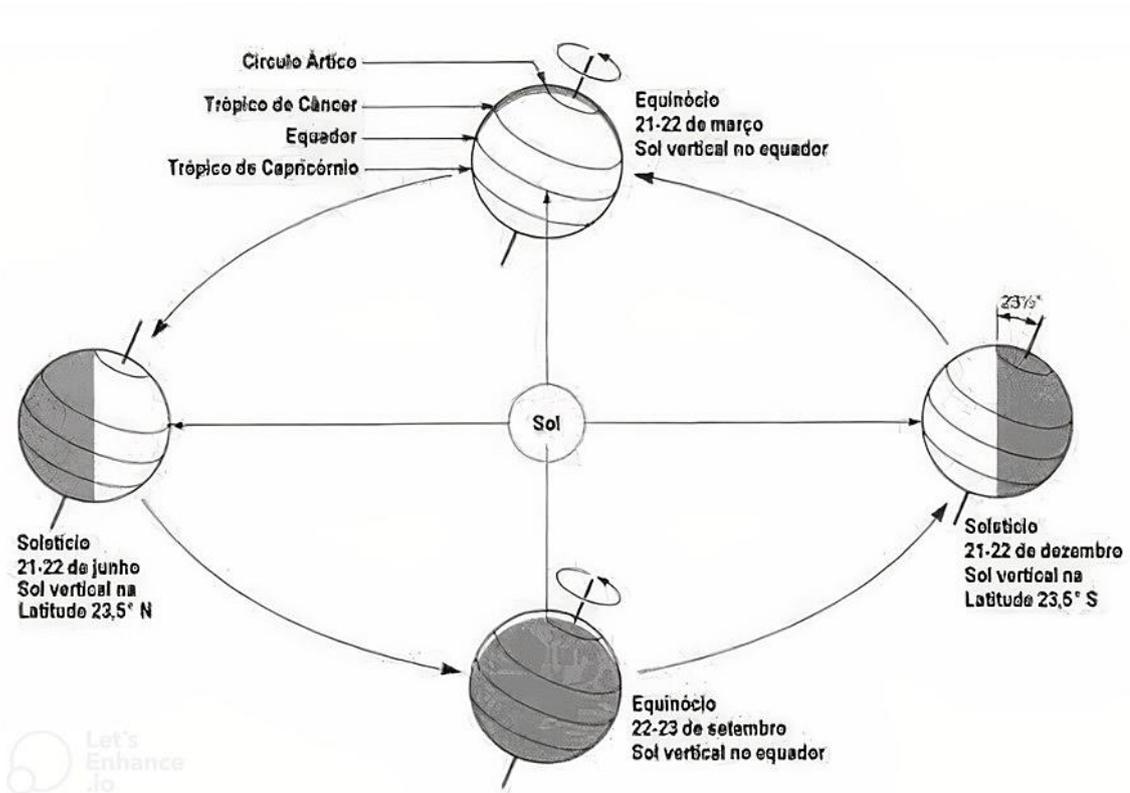
A Terra é o terceiro planeta em distância em relação ao Sol, com uma média de 150 milhões de quilômetros. Leva 365,256 dias para a Terra girar em torno do Sol e 23,9345 horas para efetuar uma rotação completa. Possui um diâmetro de 12.756 quilômetros, apenas poucas centenas de quilômetros, maior que o de Vênus. A atmosfera da Terra é composta por 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio, e 1% de outros componentes (HAMILTON, 1997).

O núcleo da Terra é composto de níquel-ferro derretido girando rapidamente, o que acarreta um extenso campo magnético. Este composto em conjunto com a atmosfera, protege a Terra da irradiação prejudicial oriunda do Sol e de outras estrelas, além de evitar asteroides, que são queimados em sua maioria antes de atingir a superfície.

A Terra possui dois movimentos principais: Rotação e Translação (Figura 6).

- Rotação: é um movimento entorno do seu eixo, e é responsável pelos ciclos de dia e noite.
- Translação: é o movimento da Terra em sua órbita elíptica em torno do Sol, tendo a posição mais próxima do Sol (periélio) 147 milhões de quilômetros, atingido em janeiro e o ponto mais distante (afélio) com 152 milhões de quilômetros em julho.

Figura 6 - Relação entre o Sol e a Terra

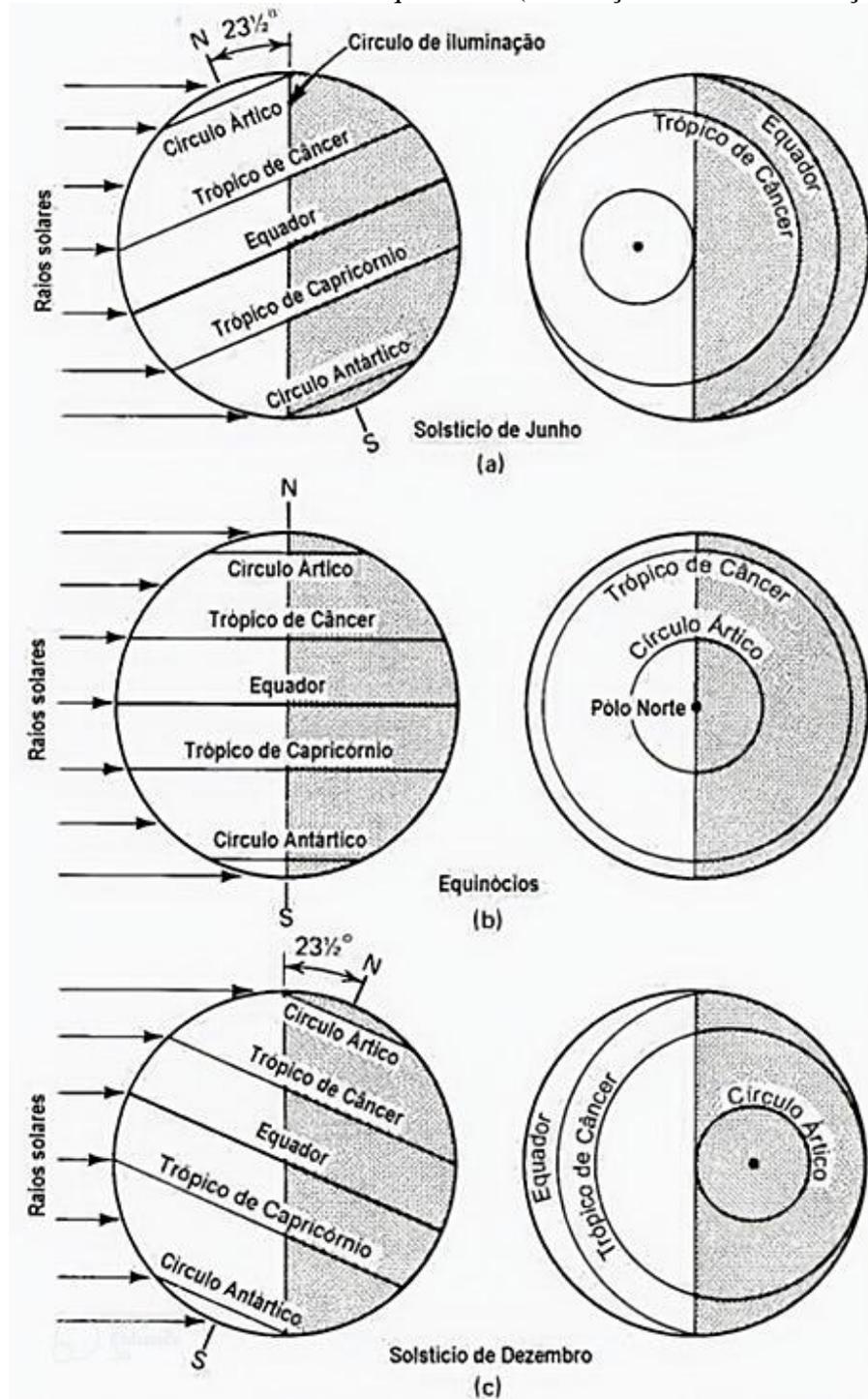


Fonte: Grimm, 1999.

As estações do ano são causadas pela inclinação do eixo de rotação da Terra em relação à perpendicular ao plano definido pela sua órbita, significando que o hemisfério sul se inclina em até $23^{\circ} 27'$ para longe do Sol no inverno e em $23^{\circ} 27'$ para perto do Sol no verão, conforme mostram as Figura 7 e Figura 8.

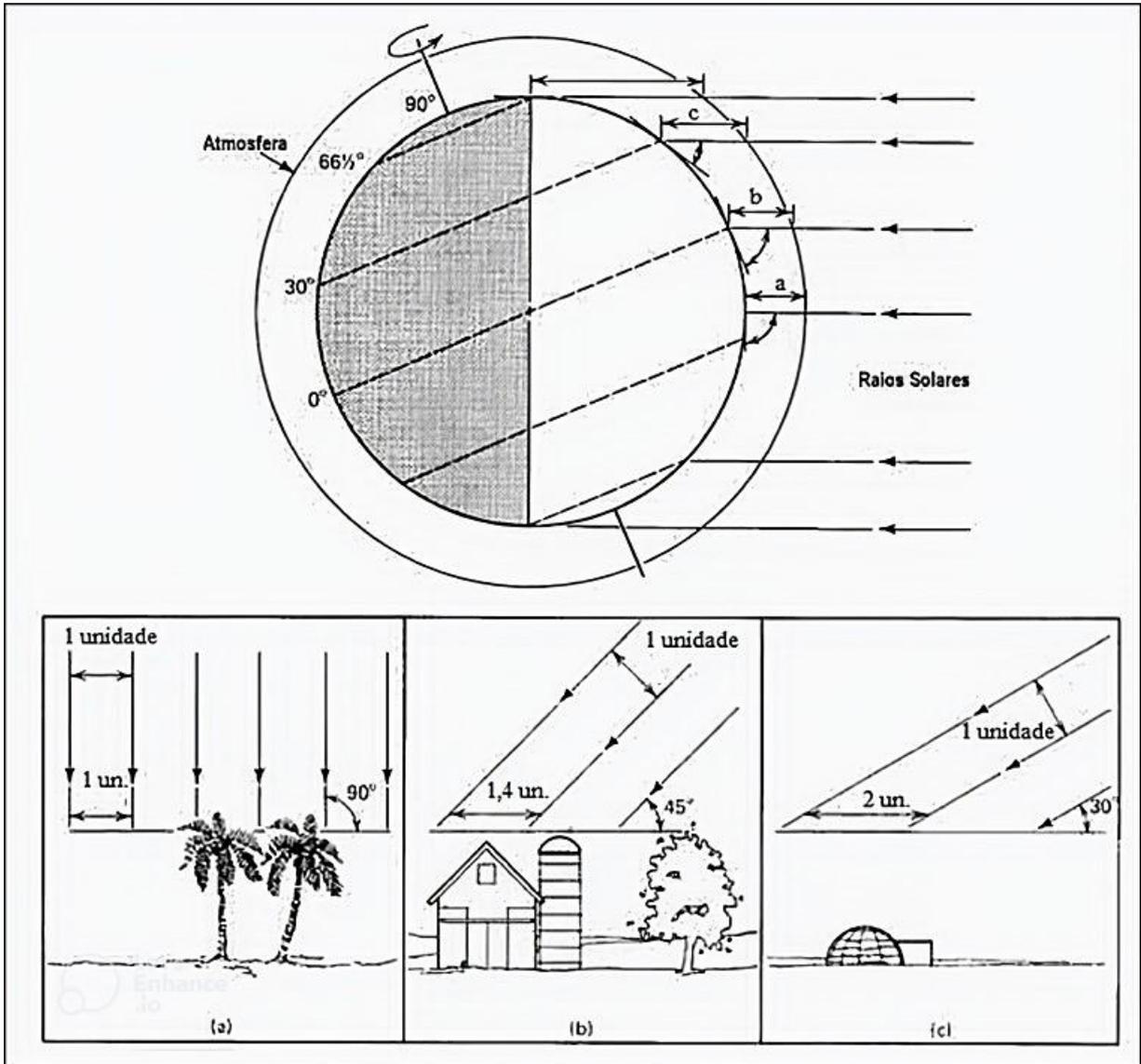
A altura da posição do Sol em relação à Terra é importante para se determinar a quantidade de irradiação que vai atingir a superfície. Se essa altura for pequena, significa que os raios solares terão que percorrer uma distância maior na atmosfera, resultando em uma redução muito significativa na irradiação.

Figura 7 - Características dos solstícios e equinócios (inclinação do eixo de rotação)



Fonte: Grimm, 1999.

Figura 8 - Variação da altura do Sol com a latitude



Fonte: Grimm, 1999.

2.2.1 Gases atmosféricos

A atmosfera terrestre é composta por vários gases, porém o tipo responsável pelo efeito estufa ocorre geralmente de forma natural. Aumentos significativos em suas concentrações aconteceram nos últimos 250 anos devido à atividade humana. Essas concentrações dos gases na atmosfera são resultado (líquido) do balanço entre as emissões e remoções da atmosfera (MACDOUGALL; EBY; WEAVER, 2013).

A atmosfera terrestre acompanha o planeta Terra desde a sua formação, mas teve alterações ao longo desse tempo. Nos tempos de hoje, a atmosfera divide-se em 5 camadas

importantes, conforme mostra a Figura 9, em função das suas características físico-químicas de cada uma:

Primeira camada: Troposfera – Camada mais próxima do solo, onde as condições climáticas e meteorológicas ocorrem e têm uma extensão de 10 a 20 km.

Segunda camada: Estratosfera – Chega a uma altura de 50 km do solo e as temperaturas vão a 60 °C negativos, composta com ozônio, que é um gás responsável por absorver os raios ultravioleta do Sol. Porém, a poluição afetando essa camada resulta em buracos, que chamamos de “buracos na camada de ozônio”.

Terceira camada: Mesosfera – Vai até 80 km do solo e tem temperaturas abaixo dos 100 °C negativos na parte inferior e é um pouco mais quente, porque absorve calor da estratosfera.

Quarta camada: Termosfera – O final da termosfera pode chegar até 450 km da Terra. É a camada mais quente, pois algumas raras moléculas de ar absorvem a radiação do Sol. As temperaturas no topo podem chegar a 2000 °C.

Quinta camada: Exosfera – O final dessa camada pode chegar a aproximadamente 900 km da Terra. O ar é muito rarefeito e as moléculas de gás escapam constantemente para o espaço.

2.2.2 Radiação solar

O Sol envia energia para a Terra por meio de ondas eletromagnéticas, que formam a chamada irradiação solar abrigando uma ampla gama de comprimentos de ondas e intensidades (ultravioleta e infravermelho) que variam de 0,20 a 100 μm . Aproximadamente 99% desta radiação solar que chega na superfície terrestre está contida na região de 300 a 3.000 nm (0,3 a 3,0 μm) do espectro solar. Esse espectro consiste nas radiações Ultravioleta (UV), Visível (VIS) e Infravermelho (IR), sendo divididas em:

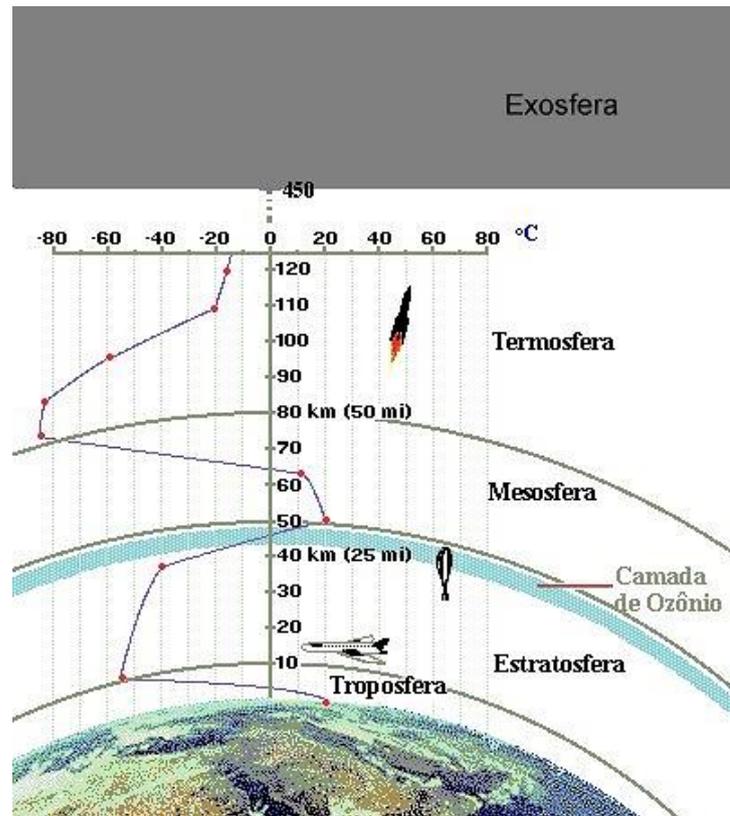
Ultravioleta (UV): 3 a 5%

Visível (VIS): 42 a 43%

Infravermelho (IV): 52 a 55%

A Figura 10 mostra o espectro solar com distribuição espectral da irradiação solar, onde a intensidade máxima ocorre a 500 nm (0,5 μm) quase no final da faixa visível do azul.

Figura 9 - Estrutura vertical da atmosfera terrestre até 120 km de altura

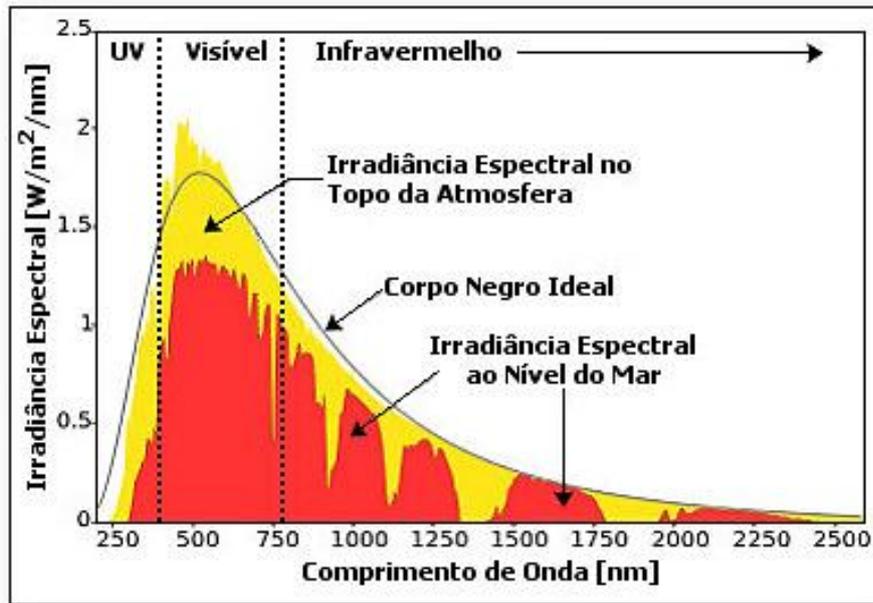


Fonte: Extraído do artigo “Investigando a Terra 2000”, do instituto astronômico e geofísico – USP. Disponível em: <https://www.iag.usp.br/siae98/atmosfera/estrutura.htm>

Segundo GeoDesign 2016, no topo da atmosfera terrestre a irradiância solar tem uma intensidade de aproximadamente $1.360,8 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$ considerando a distância média Terra-Sol. Ela foi recentemente denominada Irradiância Solar Total (TSI: Total Solar Irradiance), apesar de ter sido indevidamente chamada de Constante Solar por vários anos. Desde 2003, a TSI tem sido medida pelo instrumento Total Irradiance Monitor (TIM) lançado pela NASA a bordo do Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE). Este instrumento monitora a luz solar incidente no topo da atmosfera terrestre usando um radiômetro de cavidade ativa na temperatura ambiente, comprovando que a irradiação solar incidente no topo da atmosfera não é constante.

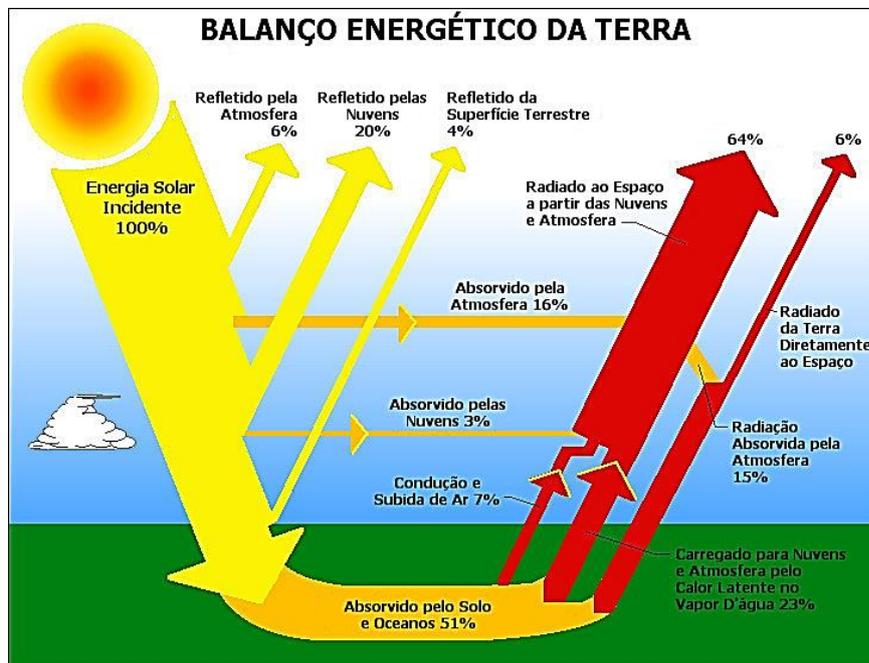
Na superfície da terra, em um dia pleno sem nuvens ao meio-dia, a irradiação solar direta é tomada como um padrão de aproximadamente 1000 W/m^2 , conforme mostra a Figura 11. Os motivos que levam a reduzir o valor total de irradiação solar, porém, ainda são afetados pela localização (latitude, longitude e elevação) e estações do ano.

Figura 10 - Distribuição espectral da irradiação solar



Autor: GeoDesign, 2016.

Figura 11 - Balanço energético da Terra



Fonte: GeoDesign, 2016.

A radiação disponível na superfície terrestre pode ser dividida em três componentes principais:

Radiação direta: esta é a radiação solar que atinge a superfície terrestre diretamente do disco solar, sem ser dispersa ou refletida pela atmosfera. A radiação direta é mais intensa quando o sol está alto no céu, como durante o meio-dia solar em um dia claro.

Radiação difusa: a radiação difusa é a radiação solar dispersa pela atmosfera e chega à superfície terrestre proveniente de todas as direções, exceto diretamente do sol. Isso inclui a luz espalhada pelas moléculas de ar, partículas de poeira e gotículas de água na atmosfera.

Radiação refletida: esta é a radiação solar refletida pela superfície terrestre e por objetos circundantes, como nuvens, água e superfícies reflexivas, como neve, gelo ou superfícies metálicas. A quantidade de radiação refletida depende das propriedades refletivas da superfície.

A soma das três componentes - radiação direta, radiação difusa e radiação refletida - é conhecida como radiação global. Essa é a quantidade total de energia solar que atinge a superfície terrestre em um determinado local e momento. O conhecimento desses componentes é importante para entender a distribuição e o comportamento da radiação solar, bem como para projetar e dimensionar sistemas de energia solar e realizar estudos climáticos e ambientais.

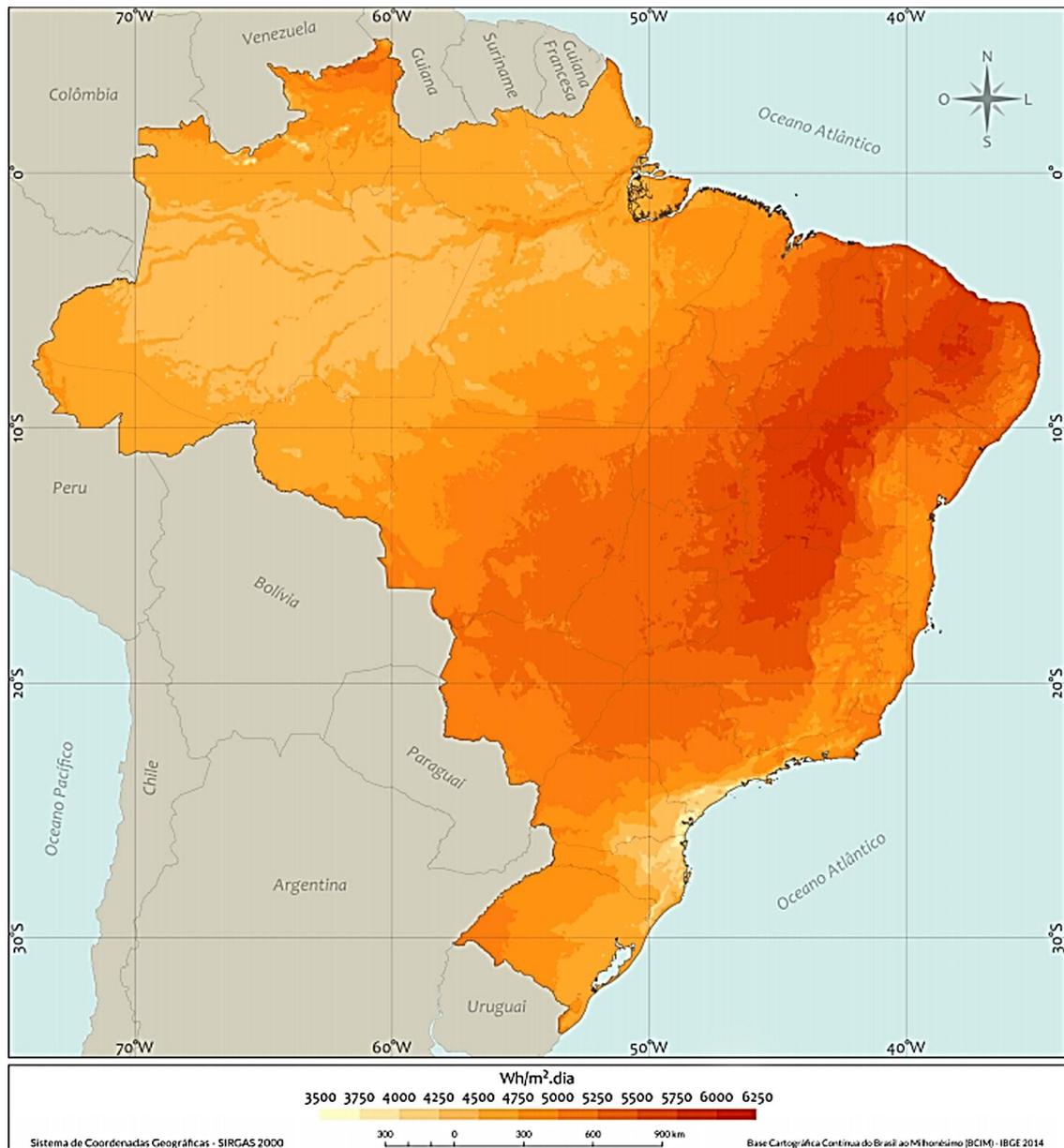
Para um mesmo dia e horário solar, os níveis de radiação solar se tornam maiores quanto mais próximos estiverem do equador, pois os raios solares atingem a Terra com uma maior elevação média em relação ao plano do horizonte, atravessando uma camada mínima da atmosfera antes de atingir a superfície terrestre (ANDRADE, 2016). Conforme a distância do equador, a elevação solar sobre o horizonte se reduz e os raios solares percorrem uma maior trajetória na atmosfera antes de chegarem ao solo (Figura 8).

O Brasil tem potencial para uso de energia solar muito maior que a maioria dos países europeus, sendo inclusive maior que a Alemanha, sendo este último o país que mais investe atualmente nesse tipo de energia no mundo (PEREIRA et al., 2017; FERREIRA et al., 2018).

Na Figura 12 pode-se observar a média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado no Brasil. Isto evidencia a variação do potencial energético ao longo de todo o país, porém em todas as regiões ainda são de grande potencial e superiores a muitos países da Europa.

A radiação solar varia conforme a estação do ano e a região, sendo de 1500 a 2300 kWh/m²/ano, enquanto na Alemanha é de 900 a 1250 kWh/m²/ano. Sua extensa localização entre os trópicos de Câncer e Capricórnio faz com que receba altas taxas de radiação, quase que perpendiculares, aumentando assim seu potencial de geração da energia fotovoltaica (FRANCISCO et al. 2019).

Figura 12 - Média anual do total diário da irradiação solar no plano inclinado na latitude no Brasil



Fonte: Pereira et al. (2017).

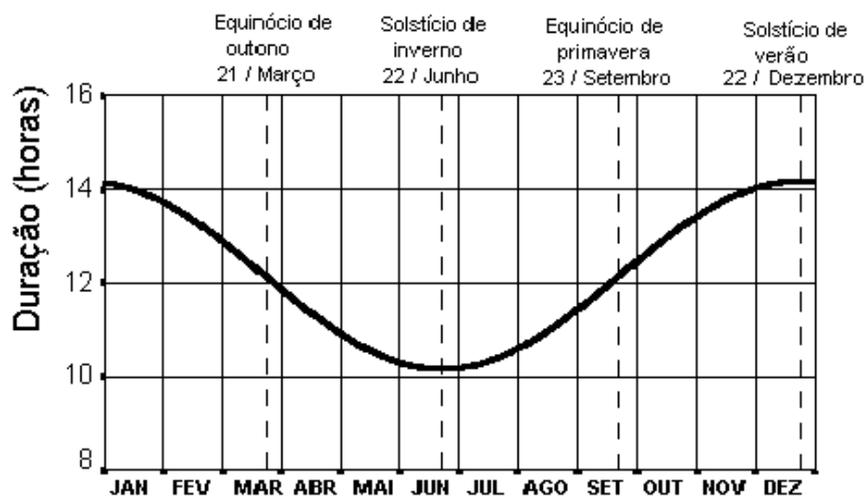
2.2.2.1 Duração da exposição ao sol

No decorrer da história da humanidade, os homens se baseavam naquilo que enxergavam no céu. Com referência a isso, conseguiam prever épocas de plantação, de colheita, e os períodos de chuva e de seca. A partir dessa ideia pensava-se que metade do tempo terrestre fosse diurno, apenas com variações de horários e intensidades. Porém, além dessas alterações, a duração do tempo diurno também sofre alterações ao longo dos dias do ano.

Se o Sol for observado atentamente, ele nasce sempre no mesmo lado do horizonte. Todavia, em pontos que variam no decorrer do ano, sua trajetória no céu também se modifica. No transcorrer de um mesmo período, que nem sempre é ao meio-dia dos relógios, o Sol está verticalmente posicionado. A Lua também está presente no céu diurno, o que a faz ter uma trajetória similar à do Sol. As estrelas não são visualmente estáticas no decorrer da noite, mas sim, se movimentam de leste para oeste. As constelações que se veem da Terra não são as mesmas no decorrer de um ano. Tudo isso só mostra que existe uma infinidade de fenômenos a serem explorados que apenas uma atenta observação poderia revelar (LONGHINI E GOMIDE, 2014).

Um exemplo da duração dos dias para Porto Alegre - RS pode ser visto na Figura 13, que também pode ser utilizada aproximadamente para todo o estado do Rio Grande do Sul. As latitudes extremas não diferem por mais de 4° em relação à esta capital. Tudo isso comprova que conforme os meses do ano mudam, as durações dos dias vão mudando e a quantidade de horas de sol é alterada, impactando diretamente na produção de energia elétrica com placas fotovoltaicas.

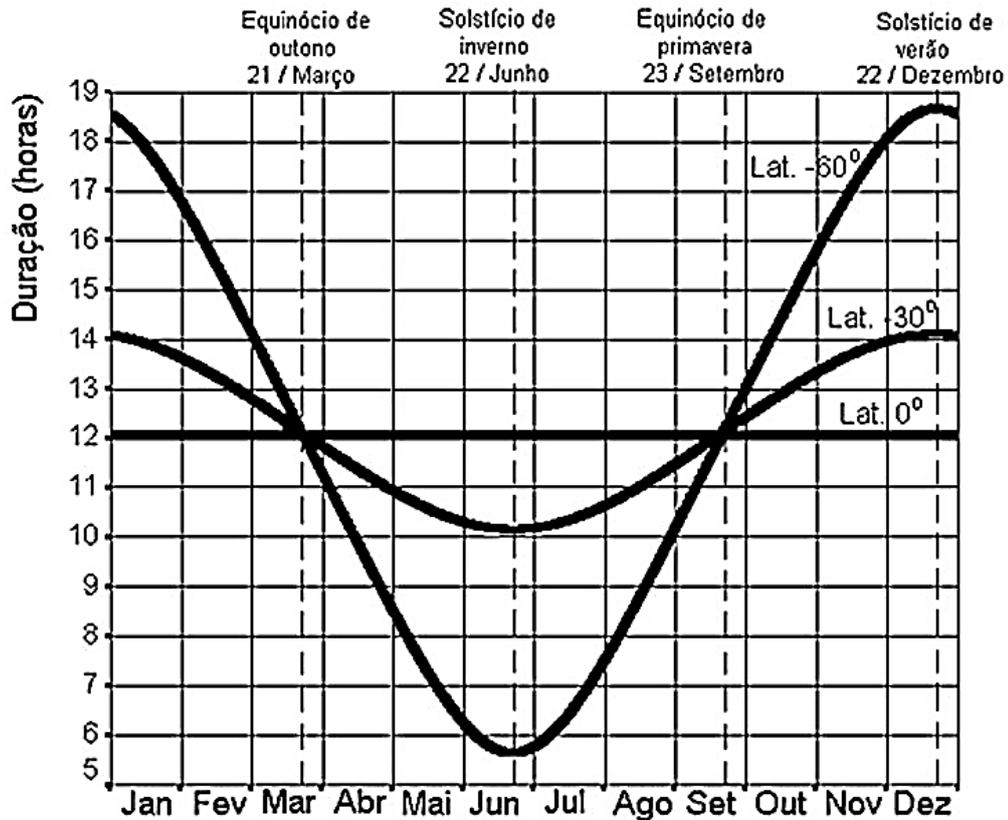
Figura 13 - Duração dos dias em Porto Alegre – RS



Fonte: Silveira, 2017.

Conforme se altera a latitude no local a ser estudado, que é a distância angular que separa um ponto da superfície da Terra do plano equatorial terrestre, a duração dos dias também muda. A Figura 14 é um exemplo para as outras latitudes que pode ser utilizada em todo o mundo.

Figura 14 - Duração do dia em horas



Fonte: Silveira, 2017.

2.2.3 Impactos na Geração de Energia Solar

Para a geração de energia solar, é essencial entender como a radiação solar varia para se poder prever a produção de energia. No entanto, o impacto direto dos ciclos solares na geração de energia solar é relativamente menor, uma vez que as variações de curto prazo (como a presença de nuvens) têm uma influência muito maior. No entanto, em termos de planejamento de longo prazo, conhecer o estágio do ciclo solar pode ajudar a fazer variações mais precisas sobre a produção média de energia.

Para decidir-se sobre locais para novas instalações de geração da energia solar, é crucial considerar fatores geográficos (latitude, altitude), meteorológicos (cobertura de nuvens, descobertas) e também a atividade solar. Embora o ciclo solar tenha uma influência relativamente menor, pode ser um dos muitos fatores a se considerar, especialmente quando se trata do planejamento e da previsão de longo prazo.

A interação entre clima e sociedade é um tema amplamente discutido na literatura. A influência climática acontece em diversos setores da sociedade, desde a agricultura até a saúde.

Para a geração de energia elétrica, compreender essas influências é fundamental, especialmente quando se consideram as fontes renováveis.

2.2.3.1 Impactos das Temperaturas na Geração PV

As mudanças climáticas afetam os aspectos financeiros dos projetos de energia renovável, criando diversos desafios financeiros e operacionais. Isso impacta diretamente no planejamento, operação e manutenção de sistemas energéticos, incluindo os sistemas fotovoltaicos (VIEIRA, 2023).

As temperaturas elevadas podem impactar negativamente na eficiência dos sistemas fotovoltaicos, uma vez que os módulos podem aquecer, reduzindo seu desempenho (Pazinatto, 2020). O cenário ideal para a produção eficiente de energia inclui um dia ensolarado com temperaturas em torno de 25 °C (PAZINATTO, 2020). Contudo, o aumento das temperaturas globais, provocado pelas mudanças climáticas, pode levar a uma diminuição da tensão elétrica nos painéis fotovoltaicos, reduzindo sua eficiência e geração de eletricidade (PAZ, 2022).

A eficiência medida ou real só será igual à eficiência padrão estipulada pelo fabricante quando as temperaturas do módulo forem menores do que 10 °C, e para o caso de a temperatura do módulo chegar a 25 °C, ele só atingirá 94% da eficiência dada pelo fabricante para condições STC (CANTOR, 2017).

O coeficiente de temperatura é crucial para os projetos de sistemas fotovoltaicos, pois é necessário levar em conta o impacto da temperatura no desempenho do sistema (PAZINATTO, 2020). A relação entre a temperatura e os sistemas solares fotovoltaicos é fundamental para que os integradores possam explicar aos clientes em caso de reclamações de desempenho (FREIRE, 2023). A tendência de se usar módulos monocristalinos no mercado deve-se ao seu melhor desempenho em condições de alta temperatura (VILLALVA, 2019).

2.2.4 Variação da Irradiação Solar e suas causas

A variação da irradiação solar de um ponto para outro do planeta, frequentemente denominada "constante solar", refere-se às mudanças na quantidade de energia radiante do Sol que atinge a atmosfera superior da Terra. Embora a designação "constante" possa sugerir uma quantidade fixa, a irradiação solar não é absolutamente constante. Ela apresenta variações ao longo do tempo devido a diversos fatores associados principalmente à atividade solar.

A Terra vive em constante mudança climática, ocorrendo em escalas de meses, anos e até milhares de anos. As causas naturais das mudanças climáticas estão relacionadas às alterações na quantidade de radiação solar incidente na Terra, erupções vulcânicas que injetam gases e aerossóis na atmosfera, mudanças nas correntes oceânicas e a circulação atmosférica (MARAFIGA, 2015).

Além das causas naturais, os efeitos dos seres humanos estão cada vez mais gradativos, como a queima de combustíveis fósseis, aumentos das áreas de ocupação das cidades, poluição, queimadas, entre outras. Como consequência dessas escolhas, o planeta está sofrendo grandes mudanças na temperatura da superfície e nos níveis de irradiação solar.

Embora as variações na irradiação solar sejam pequenas em termos percentuais, elas têm o potencial de influência sobre o clima da Terra, principalmente quando combinadas com outros fatores. Portanto, a geração fotovoltaica, que depende basicamente de todas essas alterações que podem ocorrer, vai ser uma das mais impactadas por tais variações, revelando assim a importância desta pesquisa.

2.2.5 Ciclos solares

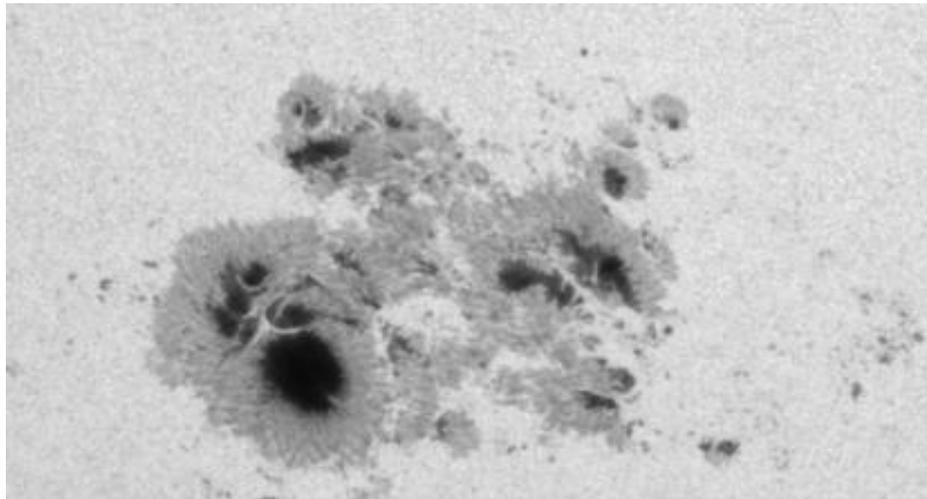
De acordo com Beer et al. (2000), as reconstruções de ^{14}C (Carbono 14) e, por inferência, as atividades solares, indicam que, além do ciclo de Schwabe, que é o mais conhecido com aproximadamente 11 anos, o Sol possui outros ciclos mais importantes como: ciclo solar de Hale a cada 22 anos; ciclo inferior de Gleissberg de 88 anos; ciclo superior de Gleissberg com 120 anos; ciclo de Suess (ou também Ciclo De Vries) com 200 anos; e os ciclos de Hallstatt de 2.300 anos (USGS 2000, ABREU et al. 2010, KERN et al. 2012). A maioria destes ciclos solares é baseada no número de manchas solares descritas na subseção a seguir.

2.2.5.1 Manchas Solares

As manchas solares são fenômenos temporários na fotosfera do Sol, que aparecem como manchas mais escuras do que as áreas circundantes. Elas são regiões de temperaturas superficiais reduzidas, causadas por concentrações de fluxo de campo magnético que inibem a convecção. O número de manchas solares é o índice mais antigo da atividade solar, com observações notadas de manchas solares estendendo-se por centenas de anos. Ele serve como uma medida da atividade magnética geral do Sol (ECHER et al. 2003).

As manchas solares geralmente aparecem como pares de polos magnéticos opostos e consistem em duas partes: a umbra e a penumbra. A umbra faz parte do centro mais escuro, onde o campo magnético é aproximadamente vertical (perpendicular à superfície do sol) e mais intenso; a penumbra corresponde à área ao redor da umbra, que aparece mais clara na Figura 15. O campo magnético na umbra é mais acentuado e menos intenso (TRITSCHLER, 2009).

Figura 15 - Mancha solar na região ativa NOAA 12192 observada no visível pelo instrumento HMI a bordo do SDO



Fonte: <https://heliviewer.org/>.

As manchas solares são criadas por um campo magnético toroidal trazido à superfície do Sol por efeito de um empuxo. Durante o mínimo solar, manchas se formam a cerca de 40° de latitude em ambos os hemisférios solares. Essas manchas são raramente vistas em latitudes superiores a 40° e nunca no equador. À medida que o ciclo solar progride, o número de manchas inicialmente aumenta e depois diminui em uma ampla região que se move gradualmente em direção ao equador (ECHER et al. 2003).

Uma mancha solar grande pode cobrir uma área de cerca de 700 vezes a área superficial da Terra, medindo 20×10^6 m em diâmetro (HOYT e SCHATTEN, 1997).

O número de manchas solares (R) pode ser calculado a partir do índice de Wolf, expresso pela equação 1 (DAVIES, 1990).

$$R = k(10g + s) \quad (1)$$

onde:

- g representa o número de grupos de manchas
- s é o número de manchas observadas individualmente
- k é um fator de correção usado para possibilitar a comparação de resultados obtidos por diferentes observadores em locais distintos e com diferentes equipamentos.

2.2.5.2 *Fáculas e Redemoinhos Solares*

As fáculas são áreas estendidas que frequentemente cercam as manchas solares e irradiam mais energia que a média solar. Redemoinhos solares, por outro lado, são áreas menores e mais estendidas do que as fáculas. Juntas, fáculas e redemoinhos solares podem compensar a redução da irradiação causada pelas manchas solares.

Fáculas e redemoinhos solares são características específicas da superfície do Sol que desempenham um papel na atividade solar e nas variações da irradiação solar. Ambos estão relacionados com os campos magnéticos solares, mas se manifestam de maneiras diferentes e em escalas diferentes.

As fáculas aumentam a luminosidade solar. Durante períodos de alta atividade solar, o efeito das fáculas (aumentando a luminosidade) pode compensar em parte ou até superar o efeito protetor das manchas solares, resultando em um aumento líquido na irradiação solar.

Os redemoinhos solares, devido ao seu tamanho pequeno, têm um impacto muito menor na luminosidade solar total em comparação com as fáculas ou manchas solares. No entanto, eles são indicativos da complexidade e variabilidade do campo magnético solar.

2.2.5.3 *Ejeções de Massa Coronal (CMEs)*

As ejeções de Massa Coronal são enormes explosões de radiação e partículas solares. Elas podem causar variações temporárias na irradiação solar, especialmente nos comprimentos de onda específicos.

Os CMEs são geralmente causados pela liberação súbita de energia magnética armazenada na atmosfera solar. Isto pode acontecer quando as linhas de campo magnético, que são retorcidas e enroladas, realinham-se e reconectam-se em uma configuração de menor energia. Podem lançar bilhões de toneladas de matéria em velocidades que variam de 250 a 2.500 km/s ou até mais rápido, dependendo da intensidade da ejeção.

Diversos satélites e observatórios, como o SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) e o SDO (Solar Dynamics Observatory), monitoram constantemente o Sol para detectar CMEs e outras características solares.

2.2.5.4 *Ciclo Solar de Schwabe*

O Ciclo Solar de Schwabe, conhecido popularmente apenas como ciclo solar, é um ciclo com uma série de fenômenos determinados pelo Sol que ocorrem em intervalos de aproximadamente onze anos (FREITAS, 2022). O atual ciclo é o de número 25 (HELLO SOLAR, 2020).

O Sol é uma enorme bola de gás quente eletricamente carregada com matéria que se move gerando um poderoso campo magnético. A cada 11 anos, aproximadamente, os polos norte e sul da estrela se invertem, completando um ciclo cada vez que isso ocorre. Essas etapas às vezes ocorrem de maneira mais “tranquila” e outras mais “agitada”, devido a erupções solares e ejeções de massa coronal que acarretam explosões poderosas que enviam abundância de energia e matéria para o espaço.

A duração máxima de um ciclo solar é de treze anos e oito meses, e pertence ao ciclo 4 (de setembro de 1784 a maio de 1798). O ciclo de menor duração foi o número 2, com nove anos exatos (de junho de 1766 a junho de 1775). Nos períodos de atividade mais elevada, conhecidos como “máximo solar”, as manchas solares aparecem, enquanto em períodos de atividades mais baixas são denominados de “mínimo solar” (FREITAS, 2022).

O Painel Internacional de Previsão do Ciclo Solar, em conjunto com a NOAA/NASA, divulgou a previsão do Ciclo Solar 25 e o consenso do painel prevê um pico em julho de 2025, com tolerância de 8 meses, com um número de manchas solares em torno de 115. O ciclo será de intensidade média, semelhante ao ciclo 24, conforme mostra a Figura 16 (ARRL, 2019).

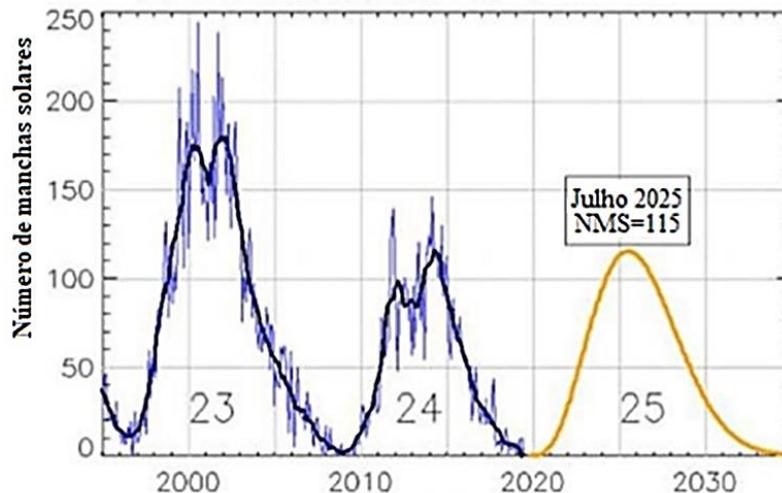
2.2.5.5 *Ciclo Solar de Hale*

O Ciclo Solar de Hale ganhou este nome em homenagem a George Ellery Hale [1868-1938], astrônomo norte-americano que, com colaboradores, elucidou as bases físicas do ciclo solar em 1908.

Como a cada 11 anos a polaridade magnética solar se inverte, manchas líderes em um dado hemisfério terão polaridades opostas em cada fase do ciclo solar, agora chamado de Hale (22 anos). No início do ciclo, época de mínimo solar, a polaridade de um polo é positiva (linhas de campo magnético saindo do Sol) e no outro é negativa (linhas de campo magnético entrando

no Sol). Próximo ao máximo solar parece não existir polaridade dominante em nenhum polo e uma reversão da polaridade do Sol começa a tornar-se aparente cerca de 2 anos após o máximo solar (KIVELSON e RUSSEL, 1995; HOYT e SCHATTEN, 1997).

Figura 16 - Previsão do ciclo solar 25



Fonte: Traduzido de ARRL, 2019.

A inversão do campo magnético solar influencia uma variedade de manifestações, desde o vento solar, condições do clima espacial, incluindo o aumento da atividade de manchas solares, erupções solares, ejeções de massa coronal e os cinturões de radiação da Terra. Esses eventos podem afetar a comunicação, a navegação por satélite, a eletrônica e a infraestrutura de energia na Terra.

2.2.5.6 Ciclo Inferior e Superior de Gleissberg

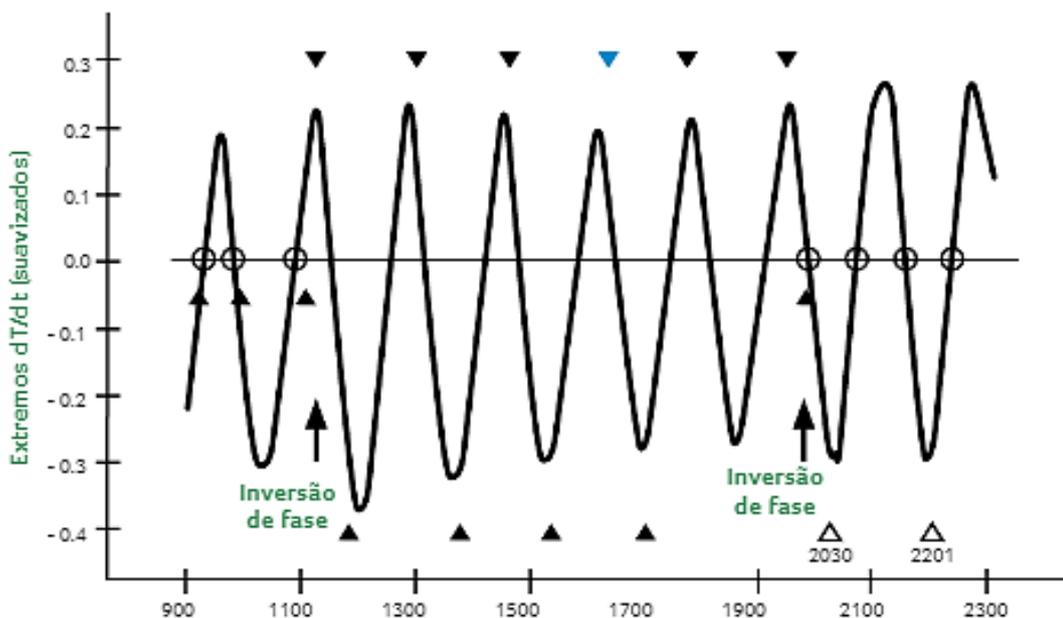
Foi descoberto em 1958 por Wolfgang Gleissberg, um astrônomo, matemático e físico alemão que, além de descobrir o ciclo de aproximadamente 90 anos, também desenvolveu métodos de previsão da atividade solar. Este ciclo terá um efeito direto no ciclo de Schwabe e está relacionado à variação do diâmetro do Sol em $0'5''$ de arco, que é aproximadamente a mesma fase do período de 900 dias ou 27 meses e, também, está relacionado ao movimento do Sol perto do centro de massa do sistema solar. O máximo de Gleissberg ocorreu por volta de 1984 e foi o primeiro de uma longa lista de máximos associados à fase zero no ciclo de 166 anos. Espera-se que seus próximos máximos sejam por volta de 2069, 2159 e 2235 (ZUFFO, 2015).

- Ciclo Inferior de Gleissberg (ou fase inferior): durante esta fase, a atividade de manchas solares tende a ser abaixo da média. Isso implica em um Sol relativamente mais calmo, com menos eventos de ejeção de massa coronal e explosões solares de grande magnitude.
- Ciclo Superior de Gleissberg (ou fase superior): durante esta fase, a atividade de manchas solares tende a ser acima da média. A atividade solar é, portanto, intensificada, levando a mais eventos solares significativos, podendo levar a mais frequentes e intensas auroras boreais e austrais.

Quase todos os mínimos de Gleissberg depois de 300 d.C. coincidiram com climas muito frios no Hemisfério Norte, como, por exemplo, nos anos de 1670, 1810, 1895 (ZUFFO, 2015).

Na Figura 17 pode-se observar o ciclo de Gleissberg comprovando que as temperaturas máximas da superfície da Terra coincidem com a máxima solar ocorrida em 1984, e que tais temperaturas permanecem em seus máximos por um período de 10 a 18 anos (GUERRERO, 2009). Estas fases ajudam os pesquisadores a entender e prever a atividade solar de longo prazo, que pode ter implicações em diversas características, desde o clima espacial até as mudanças climáticas terrestres.

Figura 17 - Ciclo de Gleissberg (90 anos)



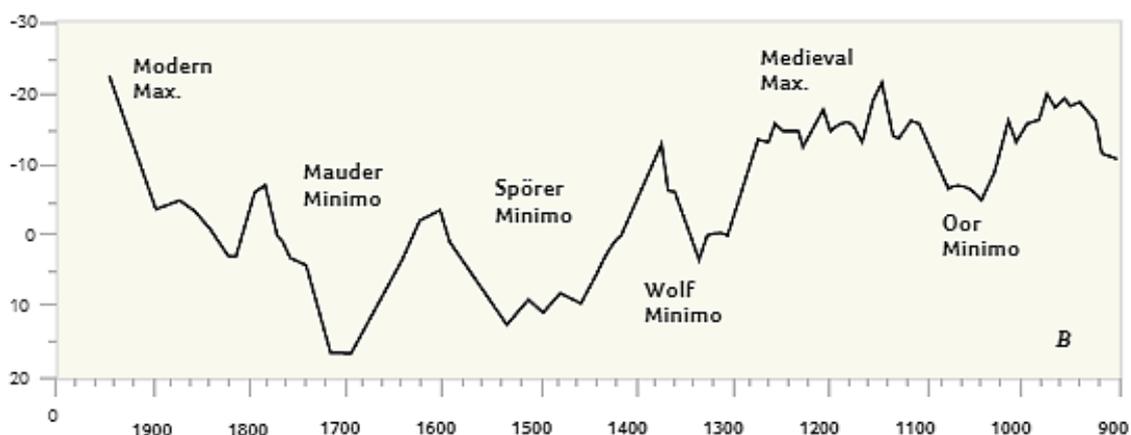
Fonte: Guerrero, 2009.

2.2.5.7 Ciclo de Suess

O Ciclo de Suess não deve ser confundido com o ciclo solar de 11 anos, embora esteja relacionado à atividade solar. O Ciclo de Suess refere-se a uma variação de longo prazo na concentração de radiocarbono (^{14}C) na atmosfera terrestre.

O físico-químico e físico nuclear americano, nascido na Áustria, Hans Eduard Suess [1909-1993], encontrou uma variação significativa de 200 anos em registros de radiocarbono nos anéis de árvores. Os dados de concentração de carbono-14 também mostraram uma periodicidade de cerca de 150 a 200 anos. As datas dos mínimos de Oort, Wolf, Spörer, Maunder e Dalton, apresentados na Figura 18, sugerem uma frequência de cerca de um a dois séculos. Isto leva à variabilidade de amplitude no ciclo de Schawbe, por exemplo, ao se comparar o ciclo de 1715 com o de 1958 (GUERRERO, 2009).

Figura 18 - Mínimos durante o último milênio de ^{14}C



Fonte: Guerrero, 2009.

O radiocarbono é produzido na atmosfera principalmente pela interação dos raios cósmicos galácticos com o nitrogênio atmosférico. Essa produção é sensível à atividade solar, uma vez que a intensidade dos raios cósmicos galácticos que alcançam a Terra é afetada pelas variações no campo magnético solar.

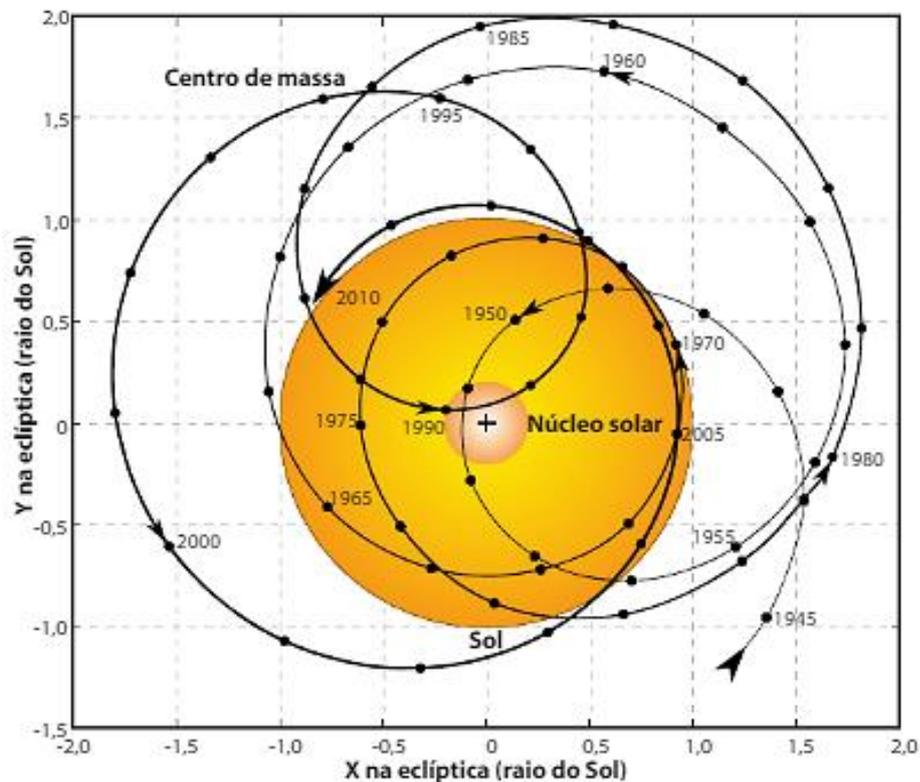
A identificação e compreensão do Ciclo de Suess são essenciais em diversas áreas da ciência. Na paleoclimatologia e na arqueologia, por exemplo, as variações no radiocarbono atmosférico podem afetar a datação por carbono-14, potencialmente essas oscilações não foram levadas em consideração, introduzindo erros.

Além disso, ao se estudar as variações de longo prazo na atividade solar e sua relação com o clima terrestre, o Ciclo de Suess pode fornecer insights relevantes sobre as interações entre o Sol e a Terra em escalas de tempo de séculos.

2.2.5.8 Ciclos de Hallstatt

Jose (1965) descobriu que o Sol possui um movimento baseado nas posições celestes anuais do baricentro (pequenos círculos) em relação ao centro do Sol (cruz) que o faz retornar à mesma posição a cada 179 anos. Este fenômeno é conhecido como ciclo de Jose e pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 - Oscilações do Sol em torno do centro de massa do Sistema Solar, no período de 1945 a 2010



Fonte: Oliveira et al. 2018.

Encontrado em testemunhos da atividade solar com análise da concentração de ^{14}C , nos últimos 8.000 anos, o ciclo de Hallstatt (aproximadamente 2.300 anos) tem como causa o movimento solar (Charvátová, 2000), especificamente causado por uma grande ressonância estável envolvendo os quatro planetas jovianos – Júpiter, Saturno, Urano e Netuno

(SCAFETTA, 2016). Alguns pesquisadores associam-no às atividades solares, enquanto outros creem que seria um tipo de oscilação do sistema oceano-atmosfera. Seu próximo máximo deverá ser alcançado por volta do ano 2800 e seu mínimo em 3950, o qual vai coincidir com o mínimo de Maunder, ocorrido entre o final do século XVII e o início do século XVIII (1645-1715) (EDDY, 1976; GUERRERO, 2009). Como consequência, essa combinação ocasionou uma pequena idade do gelo, devido aos invernos mais rigorosos.

O ciclo de Hallstatt é de grande importância para a compreensão das mudanças climáticas e das atividades solares ao longo do tempo. Além das implicações climáticas, as variações na atividade solar associadas a esse ciclo, podem influenciar a quantidade de raios cósmicos galácticos que atingem a Terra. Isso é crucial para a produção de certos isótopos usados em estudos geológicos e climáticos tornando-se um exemplo da complexa interação entre a atividade solar e o clima da Terra em escalas de tempo geológicas. Estudar essas interações e padrões de longo prazo é crucial para entender as forças naturais que influenciam o clima da Terra e para contextualizar as mudanças climáticas causadas pelo homem no quadro mais amplo da variabilidade climática natural.

2.2.5.9 Outros Ciclos Solares

Os diversos ciclos climáticos naturais permitem entender que os mecanismos responsáveis pelas mudanças climáticas na Terra envolvem, além de fatores puramente terrestres, o Sol, a Lua, a dinâmica dos planetas do Sistema Solar e até mesmo os ritmos da Galáxia. Esses vários ciclos solares podem ser vistos na Tabela 1 que é uma síntese da relação do tempo de duração de cada ciclo, nome, mecanismo de influência e causas.

2.2.5.10 Dióxido de Carbono (CO₂)

O aumento das concentrações de certos gases na atmosfera, como o dióxido de carbono, também pode afetar as tendências temporais dos parâmetros atmosféricos, resultando em mascarar os efeitos solares. O dióxido de carbono é transparente à radiação de ondas curtas, mas não a radiação de ondas longas (infravermelha), então devolvendo parte da energia à Terra. Quanto maior a concentração de CO₂ na atmosfera, menor a quantidade de radiação emitida para o espaço (YAMASOE, 2006), levando ao aquecimento global.

O dióxido de carbono não tem uma vida útil específica, porque é continuamente reciclado entre a atmosfera, os oceanos e a biosfera terrestre e sua remoção da atmosfera envolve uma série de processos com diferentes escalas de tempo (SOLOMON et al., 2007).

Tabela 1 - Síntese dos ciclos do clima, seus períodos, mecanismos e causas

	Ciclo	Período		Mecanismo/causa	
		Tempo	(Anos)		
Ciclos curtos	Ciclo diário	1 d.	$2,7 \times 10^{-3}$	Movimento de rotação terrestre	
	Ciclo sinóptico	3 a 7 d.	$1,4 \times 10^{-2}$	Movimentação de massas de ar	
	Oscilação Madden-Julian (OMJ)	30 a 60 d.	$1,2 \times 10^{-1}$	Onda atmosférica	
	Ciclo intra-estações	180 d.	$1,6 \times 10^{-1}$	Inclinação do eixo terrestre	
	Ciclo anual	365 d.	$1,0 \times 10^0$	Movimento de translação terrestre	
Ciclos médios	Oscilação Quase-Bienal (OQB)	2 a 2,5 a.	$2,3 \times 10^0$	Oscilação atmosférica	
	Oscilação “El Niño – Oscilação Sul (ENOS)”	2 a 7 a.	$5,0 \times 10^0$	Influência lunar/planetária	
	Ciclo de Schwabe	11 a.	$1,1 \times 10^1$	Influência planetas (Júpiter e Saturno)	
	Ciclo de Saros	18,1 a.	$1,8 \times 10^1$	Parâmetro orbital lunar	
	Ciclo nodal lunar (ou Ciclo Draconiano)	18,6 a.	$1,9 \times 10^1$	Parâmetro orbital lunar	
	Ciclo de Hale	22 a.	$2,2 \times 10^1$	Influência planetas (Júpiter e Saturno)	
	Ciclo de Brückner	35 a.	$3,5 \times 10^1$	Influência lunar/planetária	
	Oscilação Interdecadal do Pacífico (OIP)	15 a 30 a.	$2,3 \times 10^1$	Influência lunar/planetária	
	Oscilação do Atlântico Norte (OAN)	25 a 35 a.	$3,0 \times 10^1$	Influência lunar/planetária	
	Oscilação Decadal do Pacífico (ODP)	50 a 70 a.	$7,0 \times 10^1$	Influência lunar/planetária	
	Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA)	50 a 90 a.	$7,0 \times 10^1$	Influência lunar/planetária	
	Ciclo inferior de Gleissberg	88 a.	$8,8 \times 10^1$	Influência planetas (Júpiter e Saturno)	
	Ciclo superior de Gleissberg	120 a.	$1,2 \times 10^2$	Influência planetas (Júpiter e Saturno)	
	Ciclo de Jose	179 a.	$1,8 \times 10^2$	Influência planetas (Júpiter e Saturno)	
	Ciclo de Suess (ou Ciclo de De Vries)	208 a.	$2,1 \times 10^2$	Influência planetas (Júpiter e Saturno)	
	Ciclo de 500 anos	500 a.	$5,0 \times 10^2$	Influência planetas (Júpiter e Saturno)	
	Ciclo de Eddy	1.000 a.	$1,0 \times 10^3$	Influência planetas (Júpiter e Saturno)	
	Eventos de Dansgaard-Oeschger	1.500 a.	$1,5 \times 10^3$	Influência solar, proc. atmosf./oceanos	
	Eventos de Bond	1.500 a.	$1,5 \times 10^3$	Influência solar, proc. atmosf./oceanos	
	Ciclo de Hallstatt	2.300 a.	$2,3 \times 10^3$	Influência planetas (Júpiter e Saturno)	
Eventos de Heinrich	10 ma.	$1,0 \times 10^4$	Influência solar, proc. atmosf./oceanos		
Ciclo longos	Ciclo de Milankovitch - Interglacial/Glacial	Interglacial	10 ma.	$1,0 \times 10^4$	Combinação de parâmetros orbitais terrestres
		Glacial	100 ma.	$1,0 \times 10^5$	Combinação de parâmetros orbitais terrestres
	C. de Milankovitch - Precessão equinócios	20 ma.	$2,0 \times 10^4$	Parâmetro orbital terrestre	
	C. de Milankovitch - Inclinação axial	40 ma.	$4,0 \times 10^4$	Parâmetro orbital terrestre	
	C. de Milankovitch - Excentricidade orbital	100 ma.	$1,0 \times 10^5$	Parâmetro orbital terrestre	
C. de Milankovitch - Excentricidade orbital longa	400 ma.	$4,0 \times 10^5$	Parâmetro orbital terrestre		
Superciclos	Impactos de grandes asteroides/meteoritos	30 Ma.	$3,0 \times 10^7$	Oscilação vertical do Sistema Solar através do plano galáctico	
	Modo de Estufa/Modo de Geladeira/Modo Quente/Modo Frio Ciclo tectonismo/vulcanismo Ciclo de supercontinentes Ciclo de Wilson	250 a 500 Ma.	$2,5 \times 10^8$ a 5×10^8	Movimento de translação do Sistema Solar em torno do centro da Galáxia	

Legenda: C. = Ciclo; d. = dia(s); a. = ano(s); ma. = milhares anos; Ma. = milhões de anos.

Fonte: Oliveira et al. 2018.

Nos últimos 200 anos foi emitido uma quantidade crescente de dióxido de carbono antropogênico que começou a desequilibrar o tráfego natural. Até meados do século XX, poucos cientistas acreditavam que as atividades dos seres humanos poderiam causar alterações na composição química da atmosfera que, por sua vez, pode ser capaz de alterar

significativamente o clima do planeta (LACERDA e NOBRE, 2010). Segundo o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera terrestre é a maior em pelo menos 800 mil anos, sendo 40% maior quando comparada à da era pré-industrial, devido à queima de combustíveis fósseis (IPCC, 2014).

Uma das maneiras de se reduzir as emissões de gases do efeito estufa é adotar energias sustentáveis, diminuindo a queima de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, a concentração de CO₂ na atmosfera.

2.2.5.11 *Erupções vulcânicas*

As erupções vulcânicas são uma estrutura geológica criada quando o magma, gases e partículas quentes (como cinzas) escapam para a superfície terrestre. Eles ejetam altas quantidades de poeiras, gases e aerossóis na atmosfera, sendo responsáveis pela redução significativa de irradiação solar incidente na superfície, o que resulta em resfriamento climático temporário. Calcula-se que as erupções vulcânicas das últimas décadas tenham provocado um arrefecimento global na ordem de 0,1 a 0,5 °C (SALSTEIN et al. 1995).

O impacto mais significativo das erupções vulcânicas ocorre na estratosfera, onde o dióxido de enxofre (SO₂) liberado pela erupção se converte em ácido sulfúrico, que condensa rapidamente formando aerossóis de sulfato. Esses aerossóis na estratosfera aumentam a reflexão da radiação solar de volta para o espaço, o que colabora para um esfriamento da camada inferior da atmosfera (BUENO, 2018).

As erupções vulcânicas estão relacionadas diretamente com a eficiência na geração de energia elétrica via sistemas fotovoltaicos. Segundo Michalsky et al. 1994, a geração das centrais de energia solar após a erupção foram 30% menores, comparada com os anos sem poluentes vulcânicos.

2.2.5.12 *Fenômenos El Niño e La Niña*

Os fenômenos climáticos El Niño e La Niña são chamados ENSO (El Niño-Oscilação Sul) e são fases opostas de um padrão de clima natural em todo o Oceano Pacífico tropical que oscila a cada 3 a 7 anos em média. O ciclo ENSO é um termo científico que descreve as flutuações de temperatura entre o oceano e a atmosfera no leste central do Pacífico Equatorial.

Esses eventos levam a diferenças significativas em relação à temperatura média dos oceanos, ventos, pressão superficial e precipitação em partes do Oceano Pacífico Tropical (NOAA).

Os fenômenos meteorológicos que impactam todo o clima global, e os relacionados a La Niña tendem a ser opostos aos de El Niño. No Brasil esse impacto do El Niño (fase quente) contribui para o aumento de chuvas nas regiões Sul e em partes do Sudeste e do Centro-Oeste. Enquanto, o La Niña (fase fria) provoca os efeitos opostos, com a intensificação das chuvas no Nordeste, na Amazônia e em partes do Sudeste (INPE).

Segundo Molion (2006), as temperaturas médias globais obtidas por meio de satélites desde 1979 aumentam com a ocorrência de El Niño e diminuem com a ocorrência de La Niña, o que pode provocar alterações no balanço radiativo da Terra.

Em geral, os episódios de La Niña têm uma frequência de 2 a 7 anos, porém tendo ocorrido em menor quantidade que o El Niño durante as últimas décadas. Além disso, os episódios de La Niña têm períodos de aproximadamente 9 a 12 meses e somente alguns episódios persistem por mais que 2 anos. Outro ponto interessante é que os valores das anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) em anos de La Niña têm desvios menores que em anos de El Niño observando-se anomalias de até 4,5 °C acima da média em alguns anos de El Niño. Em anos de La Niña as maiores anomalias observadas não chegam a 4 °C abaixo da média (CPTEC e MCPHADEN, ZEBIAK, GLANTZ 2006).

Segundo (PITOMBO, 2019), os fenômenos meteorológicos El Niño e La Niña afetam o comportamento das séries temporais de irradiação solar na América do Sul. Porém, esse impacto não é homogêneo na região, nem é um comportamento uniforme para todas as cidades estudadas, não gerando um padrão para irradiação solar, mas sim para as chuvas.

2.3 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As mudanças climáticas podem produzir diversos impactos ambientais negativos, desequilibrando muitos ecossistemas. As diferentes formas de vida existem em razão de uma série de lentas adaptações ao clima e ao ambiente. Contudo, mudanças repentinas podem levar à extinção de diversas espécies, diminuindo a biodiversidade da Terra (SILVA et al. 2018).

Segundo Hegerl et al. (2007), é improvável que as mudanças climáticas dos últimos anos possam ser explicadas apenas por causas naturais, devido à intensidade das mesmas neste período. As reconstruções paleoclimáticas mostram que a segunda metade do século XX foi provavelmente o período de 50 anos mais quente no hemisfério norte nos últimos 1300 anos.

Segundo o IPCC, 2024 da ONU, com as densidades acima de 400 ppm de CO₂ na atmosfera, a temperatura média do planeta poderá subir entre 2 e 6 °C até o final deste século.

O setor energético está entre os que mais têm recebido críticas relacionadas aos níveis de emissões de gases do efeito estufa. A queima de combustíveis de origem fóssil pode emitir quantidades exorbitantes de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, agravando o aquecimento global (ROMANO, 2014; IPCC, 2014).

Diversas fontes alternativas de energia, como solar, eólica e hídrica, estão sendo implementadas para atender às crescentes demandas de energia por meio de métodos mais eficientes e sustentáveis. As diversidades nas matrizes energéticas tornam os sistemas mais seguros e confiáveis e várias técnicas podem ser implementadas para compensar a sazonalidade dos recursos e manter o fornecimento de energia mais estável sem pressão de insumos, matérias-primas, capital, etc. (FOLEY; OLABI, 2017).

Por ser algo tão amplo e complexo, uma mudança climática, de qualquer dimensão que resulte em aquecimento ou resfriamento global, afeta de maneira geral todos os componentes do sistema-Terra. Esse aquecimento global pode ter vários efeitos para os seres humanos e outras espécies e ecossistemas, tanto benéficos quanto nocivos, dependendo, principalmente, do local e da magnitude da mudança climática (MENDONÇA, 2007).

2.3.1 Previsão Climática

A previsão climática difere da previsão do tempo, enquanto a primeira se refere a padrões atmosféricos projetados ao longo de semanas, meses ou até anos, enquanto a segunda refere-se a projeções de curto prazo (horas há dias). A previsão climática é fundamental para planejar atividades em setores como agricultura, gestão de recursos hídricos e energéticos, entre outros.

Diferentemente da toxicidade de curto prazo, que se concentra nas condições atmosféricas para os próximos dias, as projeções climáticas buscam tendências e padrões climáticos antecipados em um período mais longo. Essas considerações são baseadas em modelos climáticos e abrangem uma variedade de fatores, como temperaturas do oceano, padrões de vento, concentrações de gases de efeito estufa e outros elementos climáticos. Estão interligados de maneiras complexas, mudanças em uma parte do sistema podem ter efeitos em cascata em outras partes.

Os modelos de previsão são utilizados para extrapolar o comportamento do passado e presente para o futuro. Do ponto de vista estatístico, a previsão é um processo de estimativa em situações de incertezas. Porém, para a meteorologia, a previsão do tempo é uma aplicação da ciência e de tecnologias para fazer um detalhamento de ocorrências futuras esperadas na atmosfera para um dado local referenciadas com parâmetros atmosféricos e na habilidade e experiência de um meteorologista (QUADROS, 2005). Os diversos tipos de procedimentos de previsão podem ser classificados como (CHATFIELD, 2013):

- Subjetivos: são geralmente baseados no julgamento por parte de especialistas da área. O método mais conhecido é o Método Delphi.
- Univariados: as previsões podem ser inteiramente baseadas em observações passadas de uma mesma série temporal utilizando um modelo aplicado aos dados para extrapolação.
- Multivariados: as previsões são realizadas levando em consideração as observações de outras variáveis. Como exemplo, têm-se os modelos de regressão.

As projeções do PBMC (Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas) para o Brasil são de aumentos gradativos de 1 até 6 °C na temperatura ambiente até o ano de 2100, em comparação às registradas no século XX [PBMC, 2012]. A Tabela 2 mostra as previsões dos aumentos de temperaturas para cada bioma brasileiro, segundo o PBMC até 2100.

Os aumentos mostrados na Tabela 2 vão impactar diretamente toda a fauna e flora do país e, com essas diferenças, preveem-se até 2100 reduções nos ciclos de chuva entre os biomas que variam de 35 a 50%. Para sistemas fotovoltaicos, conforme Marques, Pereira e Assis (2000), em um dia nublado e por conta das chuvas, a intensidade da radiação solar que atinge um módulo será menor, e conseqüentemente haverá uma redução na geração de energia. Então, quanto menor for a quantidade de chuvas, maior será a incidência solar no módulo que terá, portanto, um maior potencial energético.

As áreas brasileiras mais vulneráveis às mudanças climáticas envolvem a Amazônia e o Nordeste (GUIMARÃES et al. 2016). Além disso, o nordeste brasileiro é considerado mais vulnerável pelas condições de aumento das temperaturas e das mudanças na precipitação, as quais podem transformar em regiões áridas algumas partes do território por se tratarem da região semiárida mais povoada do mundo (NÓBREGA, 2016).

Tabela 2 - Projeção das temperaturas para cada bioma brasileiro até 2100

Bioma	Período		
	Até 2040	2041-2070	2071-2100
Amazônia	1 a 1,5 °C	3 a 3,5 °C	5 a 6 °C
Caatinga	0,5 a 1 °C	1,5 a 2,5 °C	3,5 a 4,5 °C
Cerrado			5 a 5,5 °C
Pantanal			3,5 a 4,5 °C
Pampa	Até 1 °C	1 a 1,5 °C	2,5 a 3,5 °C
Mata Atlântica	- Noroeste	0,5 a 1 °C	2 a 3 °C
	- Sul e Sudoeste	0,5 a 1 °C	1,5 a 2 °C

Fonte: PBMC, 2012.

2.3.2 Cenários Futuros

Os cenários futuros aqui discutidos são divididos em quatro grandes famílias, conhecidos como cenários A1, A2, B1 e B2. ‘A’ e ‘B’ que significam, respectivamente, baixo e alto comprometimentos com o desenvolvimento sustentável, e ‘1’ e ‘2’ significam a integração ou fragmentação regional, respectivamente (SRES, 2010).

O cenário A1 representa um futuro com crescimento econômico rápido e insustentável, uma população ainda não estabilizada, rápida introdução de tecnologias eficientes e uma redução significativa na diferença de renda entre ricos e pobres. Existem três divisões no cenário A1: uso intensivo de combustíveis fósseis (A1FI), energia não fóssil (A1T) ou equilíbrio entre recursos (A1B). O cenário A1B é considerado o mais realista de todos (RASKIN et al., 2005).

O cenário A2 representa um mundo fragmentado, não sustentável e heterogêneo entre regiões e nações, com altos índices de população e menos interesse em um rápido crescimento econômico (SRES, 2010). Entre os cenários, este é considerado o mais pessimista.

O cenário da família B é considerado o mais otimista e improvável de acontecer. B1 é um mundo integrado e sustentável, mostrando uma rápida transição para a economia de serviços e tecnologia limpa, buscando por soluções globais para questões econômicas, sociais e ambientais (excluindo mudanças climáticas). Por fim, B2 é um mundo fragmentado e sustentável onde regiões e países buscam diversos modelos de desenvolvimento com diferentes iniciativas locais, equilibrando objetivos econômicos, sociais e ambientais (RASKIN et al., 2005).

2.4 ENERGIA SOLAR NO BRASIL

Os sistemas fotovoltaicos têm experimentado um crescimento significativo nos últimos anos devido a diversos fatores, incluindo políticas de incentivo, queda nos custos dos equipamentos, conscientização ambiental e busca por fontes de energia renovável. Aqui estão alguns pontos importantes sobre os sistemas fotovoltaicos no Brasil:

Legislação e Incentivos: O Brasil possui políticas de incentivo para energia solar, como a Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), que permite a geração distribuída, onde consumidores podem produzir sua própria energia elétrica e, caso haja excedente, injetar na rede elétrica, recebendo créditos a serem utilizados posteriormente;

Crescimento do Mercado: O mercado de energia solar no Brasil e no mundo tem crescido rapidamente. Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2023), o país alcançou 23 GW de capacidade instalada de energia solar fotovoltaica em 2023;

Aplicações: Os sistemas fotovoltaicos são utilizados em diversas aplicações, desde sistemas residenciais e comerciais até grandes projetos de usinas solares. Eles fornecem energia elétrica limpa e renovável, contribuindo para a redução da dependência de fontes de energia não renováveis;

Localização Geográfica Favorável: O Brasil possui uma das melhores irradiações solares do mundo, o que torna o país um local ideal para a geração de energia solar. Regiões como o Nordeste e o Centro-Oeste possuem altos índices de radiação solar, favorecendo a instalação de sistemas fotovoltaicos;

Redução de Custos: A queda nos custos dos equipamentos fotovoltaicos tem tornado a tecnologia mais acessível e atraente para consumidores e investidores. Isso inclui não apenas os painéis solares, mas também inversores, estruturas de montagem e outros componentes necessários para a instalação de sistemas fotovoltaicos;

Desafios e Oportunidades: Apesar do crescimento, ainda há desafios a serem enfrentados, como a necessidade de aprimorar infraestrutura de distribuição e transmissão de energia, questões relacionadas à regulação e financiamento, além da capacitação de profissionais especializados na instalação e manutenção de sistemas fotovoltaicos.

Em resumo, os sistemas fotovoltaicos no Brasil estão em ascensão e representam uma importante fonte de energia limpa e renovável, com grande potencial de contribuir para a matriz energética do país e para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

O uso da energia solar no Brasil corresponde a 15,4% de toda a matriz energética brasileira, sendo a energia solar residencial responsável por 78,5% do montante das instalações, seguida por empresas de comércio e serviços (10,8%) e pela energia solar rural (8,8%). O uso da energia solar fotovoltaica no Brasil atingiu 1.652.883 imóveis em todo o País, alcançando a potência instalada de 11.453,1 MW em sistemas residenciais em relação a um total de 23.363,7 MW (ABSOLAR, 2023).

Levantamento da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar) aponta que o país superou a marca de 2 milhões de sistemas solares fotovoltaicos instalados em telhados, fachadas e pequenos terrenos que abastecem 2,6 milhões de unidades consumidoras. E a tecnologia PV já está presente em 5.530 municípios e em todos os estados, sendo Minas Gerais, São Paulo, Rio Grande do Sul e Paraná com as maiores participações. Desde 2012, foram aplicados R\$ 111,2 bilhões em recursos privados no setor, com geração de quase 700 mil novos empregos e arrecadação para os cofres públicos de R\$ 29,8 bilhões (GANDRA, 2023).

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta tese está relacionada aos impactos das mudanças climáticas sobre as fontes de geração de energia, visando aprofundar os conhecimentos relacionados ao clima e entender melhor os cenários futuros. Conseqüentemente, visa identificar os impactos que essas mudanças vão ocasionar nos sistemas fotovoltaicos e quais serão as alternativas que podem ser adotadas para minimizar e contornar essa problemática.

Para alcançar os objetivos propostos nesta tese sobre os impactos das mudanças climáticas nos sistemas fotovoltaicos e as alternativas para mitigar esses impactos, são empregados os seguintes materiais e métodos:

Coleta de Dados Climáticos: realização da coleta de dados climáticos históricos e atuais, incluindo insolação solar, temperatura, umidade, velocidade do vento e padrões de precipitação, em áreas geográficas relevantes para os sistemas fotovoltaicos em estudo.

Análise de Tendências Climáticas: utilização das técnicas estatísticas para analisar as tendências climáticas ao longo do tempo, incluindo a identificação de padrões de variação na radiação solar, precipitação e na temperatura.

Modelagem de Impactos Climáticos nos Sistemas Fotovoltaicos: realização uma modelagem dos impactos das mudanças climáticas nos sistemas fotovoltaicos, considerando fatores como diminuição da radiação solar, aumento da temperatura e alterações nos padrões de precipitação.

Simulação de Desempenho dos Sistemas Fotovoltaicos: realização das simulações computacionais para avaliar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos sob diferentes cenários climáticos projetados, levando em conta fatores como eficiência dos painéis solares, degradação dos componentes e perdas de energia.

Identificação de Alternativas e Soluções: com base nos resultados da análise de impactos climáticos nos sistemas fotovoltaicos, são identificadas alternativas e soluções para minimizar e contornar os efeitos adversos das mudanças climáticas. Isso pode incluir tecnologias de armazenamento de energia, otimização do layout dos sistemas, uso de sistemas híbridos, entre outras medidas.

Comunicação dos Resultados: os resultados obtidos são comunicados por meio de relatórios técnicos, artigos científicos e apresentações em conferências, visando contribuir para

o avanço do conhecimento científico e apoiar a tomada de decisões relacionadas à adaptação dos sistemas fotovoltaicos às mudanças climáticas.

Esses materiais e métodos são implementados integralmente para alcançar os objetivos da tese e fornecer insights valiosos sobre os impactos das mudanças climáticas nos sistemas fotovoltaicos e as estratégias de adaptação necessárias.

A metodologia a ser desenvolvida nesta tese é o uso de séries temporais para determinar irradiância solar, precipitação, temperaturas máximas, mínimas e médias diárias. Os pontos centrais explorados neste trabalho visam: 1) analisar o cenário do Brasil em relação aos sistemas fotovoltaicos residenciais existentes; 2) apresentar um método simples e preciso que pode ser utilizado mundialmente para projetar cenários PV futuros em relação à temperatura média anual de cada localidade e 3) avaliar as possíveis futuras perdas resultantes dessas mudanças nos sistemas fotovoltaicos.

É importante mencionar que a análise detalhada da série a ser prevista e o tratamento adequado dos dados são fatores primordiais para a obtenção de resultados consistentes e satisfatórios nas projeções futuras.

Os estudos desenvolvidos aqui foram realizados no domínio do tempo, nos casos de sazonalidade e tendências, e no domínio da frequência por meio de análise espectral com o intuito de verificar a existência de ciclos nas séries.

3.1 DADOS E ÁREA DE ESTUDOS

Para realizar o estudo relacionado ao clima e seus impactos nos sistemas fotovoltaicos, os dados foram divididos em quatro grupos fundamentais, conforme descrito:

- **Dados Diários Observados de Irradiação (DODI) ou Insolação Solar:** esses dados representam a quantidade de radiação solar incidente em uma determinada área durante um período de tempo específico, geralmente medidos em watts por metro quadrado (W/m^2) ou horas de sol por dia. Eles são fundamentais para compreender a disponibilidade de energia solar em diferentes regiões do Brasil ao longo do tempo.
- **Temperaturas Máximas (TX), Mínimas (TN) e Médias (TM):** as temperaturas são medidas em graus Celsius ($^{\circ}C$) e fornecem informações importantes sobre as condições térmicas em diferentes regiões ao longo dos anos.

Esses dados serão coletados e compilados a partir de estações meteorológicas distribuídas pelos 26 estados brasileiros mais o Distrito Federal. Os dados diários serão

registrados ao longo de um período de tempo significativo para permitir uma análise abrangente das condições climáticas e suas variações sazonais e interanuais.

As informações climáticas foram obtidas das estações meteorológicas de cada estado através do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET com um período máximo de tempo entre 1961 a 2020. O INMET representa o Brasil junto à Organização Meteorológica Mundial (OMM) e, por delegação desta Organização, é responsável pelo tráfego das mensagens coletadas pela rede de observação meteorológica da América do Sul e os demais centros meteorológicos que compõem o Sistema de Vigilância Meteorológica Mundial (INMET, 2018).

Os dados meteorológicos de todas as estações do Brasil foram solicitados ao INMET e enviados em formato .xlsx via e-mail. Para obter uma base de dados consistente, optou-se por utilizar os dados das estações meteorológicas convencionais (EMCs), é uma escolha adequada para obter uma base de dados consistente, especialmente quando se deseja ter medições de longo período. Isso porque as EMCs têm um histórico de medições mais extenso em comparação com as estações meteorológicas automáticas (EMAs), que começaram a operar no Brasil apenas a partir do ano 2000 (Lucas et al. 2010). Resultando em poucos dados para fazer o levantamento desejado para este trabalho.

Ao optar por usar os dados das EMCs, tem-se acesso a um conjunto de dados mais abrangente e com uma cobertura temporal mais longa, o que permitirá uma análise mais robusta e abrangente das condições climáticas ao longo do tempo em diferentes regiões do Brasil. Isso é crucial para entender os padrões climáticos e avaliar os impactos das mudanças climáticas nos sistemas fotovoltaicos.

As projeções de cenários futuros de 2020 a 2120 foram analisadas com duas metodologias, uma com regressão linear e outra através de dois softwares estatísticos (RegCM3 e HadCM3) para dois cenários (A2 e B2) que está descrito no item 3.2.3 deste trabalho.

A disponibilidade de dados observados para algumas regiões de estudo é limitada e, em boa parte dos casos, o acesso é restrito ou tem séries temporais curtas. Hoje o INMET administra 900 estações meteorológicas de superfície, entre convencionais e automáticas espalhadas por todo o território nacional (INMET, 2011).

Alguns autores enfatizam que antes de estudar geoestatística, devem ser realizadas análises exploratórias gerando histogramas, regressões e envelopes de simulação sem considerar a localização geográfica para garantir que os dados do estudo realmente possuam uma estrutura de dependência espacial. Esta análise permite: identificar outliers que interferem nos resultados dos testes de normalidade e homogeneidade dos dados; identificar a forma da

distribuição; orientar na escolha da análise a ser aplicada. Diretrizes para escolher qual análise usar, ajuda determinar o tipo de estacionariedade que pode ser assumida, caracteriza a volatilidade e determina onde a variabilidade é mais pronunciada. (HAMLETT et al., 1986; ROSSI et al., 1992; RIBEIRO JUNIOR, 1995; LIBARDI et al., 1996; OLIVEIRA et al., 1998, DIGGLE & RIBEIRO JUNIOR, 2000).

3.1.1 Dados das Estações Meteorológicas

Por meio de todos os dados das estações meteorológicas do Brasil, que foram obtidos pelo INMET e que resultaram em 658 estações EMCs, a partir daí começou-se uma seleção com critérios de inclusão, as estações meteorológicas selecionadas que devem atender a pelo menos dois dos seguintes critérios: 1) dados históricos desde o ano de 1961; 2) dados referentes a insolação solar; 3) maiores quantidades de dados ininterruptos; 4) quando pelo menos 1 estação daquele estado não atender os itens 1 e 2, escolherá a que tiver maior quantidade de informação.

Após a primeira seleção das estações meteorológicas que foram utilizadas neste trabalho, resultou em um total de 56 estações meteorológicas conforme mostra a Tabela 3, entre elas uma nova seleção resultando em uma de cada estado brasileiro, totalizando agora 27 unidades. As estações escolhidas podem ser vistas na Tabela 4, assim selecionadas por apresentarem a maior quantidade de dados ininterruptos de seus estados, maior tempo de análise, dados referentes à insolação solar e resultando uma abrangência de todo o território brasileiro.

A janela de tempo dos dados escolhidos para esta tese foi de 1961 a 2020, obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) com informações médias diárias como: temperatura máxima, mínima e média, insolação solar, umidade relativa, velocidade média do vento e precipitação total. Infelizmente, para uma grande quantidade de localizações não existem dados desde 1961, então escolheu-se o período mais longo com as informações necessárias já existentes. As médias diárias de dados são convertidas em médias mensais e anuais utilizando-se planilhas do Excel por meio da técnica de planilha dinâmica, totalizando 59 anos de dados para a maioria das estações meteorológicas. O estado com a pior quantidade de dados e informações sobre dados climáticos é o de Santa Catarina -SC e, o estado com maiores e melhores informações é seu vizinho Rio Grande do Sul - RS.

Tabela 3 - Estações meteorológicas utilizadas inicialmente neste estudo com coordenadas geográficas

ID	Cidade	Estado	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)	Período
82915	Rio Branco	AC	-9,95	-67,86	160,71	1970-2020
82807	Tarauacá	AC	-8,16	-70,76	172,27	1970-2020
82042	Caracaraí	RR	183,24	-6,11	51,99	1971-2020
82098	Macapá	AP	-0,04	-51,11	12,8	1968-2020
83377	Brasília	DF	-15,78	-47,92	1161,42	1962-2020
83565	Paranaíba	MS	-19,66	-51,19	429,62	1972-2020
83883	Chapecó	SC	-27,13	-52,66	654	1974-2016
83195	Itabaianinha	SE	-11,27	-37,79	205,59	1964-2020
83097	Propriá	SE	-10,21	-36,84	18,46	1964-2020
82989	Agua Branca	AL	-9,26	-37,93	603,42	1974-2020
82996	Porto das Pedras	AL	-9,16	-35,29	42,21	1961-2020
82113	Barcelos	AM	-0,97	-62,92	30,65	1961-2020
82212	Fonte Boa	AM	-2,51	-66,10	59,34	1970-2020
82331	Manaus	AM	-3,10	-60,01	61,25	1961-2020
83236	Barreiras	BA	-12,15	-45,00	447,51	1961-2020
83498	Caravelas	BA	-17,73	-39,25	6,05	1961-2020
83222	Cruz das Almas	BA	-12,67	-39,08	219,69	1961-2020
82397	Fortaleza	CE	-3,81	-38,53	29,89	1961-2020
82586	Quixeramobim	CE	-5,17	-39,28	227,33	1961-2020
83649	Vitoria	ES	-20,31	-40,31	36,2	1961-2020
83557	Boa Esperança	ES	-18,53	-40,27	100	1991-2020
83526	Catalão	GO	-18,17	-47,95	857,98	1961-2020
83379	Formosa	GO	-15,54	-47,33	938,68	1961-2020
83423	Goiânia	GO	-16,67	-49,26	748,53	1961-2020
82571	Barra do Corda	MA	-5,50	-45,23	154,17	1961-2020
82280	São Luís	MA	-2,52	-44,21	32,58	1971-2020
82765	Carolina	MA	-7,33	-47,45	182,94	1971-2020
83587	Belo Horizonte	MG	-19,93	-43,95	915,47	1961-2020
83589	C. do Mato Dentro	MG	-19,02	-43,43	663,02	1961-2020
83592	Catinga	MG	-19,73	-42,13	609,56	1961-2020
83361	Cuiabá	MT	-15,61	-56,10	157,7	1961-2020
83309	Diamantino	MT	-14,40	-56,44	274,02	1969-2020
82191	Belém	PA	-1,43	-48,43	7,13	1961-2020
82445	Itaituba	PA	-4,27	-55,99	24,5	1966-2020
82861	Conceição do Araguaia	PA	-8,25	-49,26	179,02	1971-2020
82689	São Gonçalo	PB	-6,83	-38,31	237,04	1961-2020
82792	Monteiro	PB	-7,89	-37,12	606,41	1963-2020
82798	João Pessoa	PB	-7,09	-34,84	9,67	1965-2020
82893	Garanhuns	PE	-8,91	-36,49	827,78	1964-2020
82886	Cabrobó	PE	-8,50	-39,31	342,78	1965-2020
82578	Teresina	PI	-5,03	-42,80	75,73	1961-2020
82678	Floriano	PI	-6,76	-43,00	126,6	1971-2020
83766	Londrina	PR	-23,32	-51,14	566	1961-2020
83836	Irati	PR	-25,50	-50,63	881,69	1967-2020
83698	Campos	RJ	-21,74	-41,33	11,2	1961-2020

ID	Cidade	Estado	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)	Período
83738	Resende	RJ	-22,45	-44,44	439,9	1961-2020
82590	Apodi	RN	-5,62	-37,81	131,37	1963-2020
82596	Ceara Mirim	RN	-5,65	-35,42	62,2	1971-2020
83936	Santa Maria	RS	-29,72	-53,72	103,1	1961-2020
83907	São Luiz Gonzaga	RS	-28,41	-54,96	245,49	1961-2020
83967	Porto Alegre	RS	-30,05	-51,17	41,18	1961-2020
83781	São Paulo (Mir. De Santana)	SP	-23,49	-46,61	785,16	1961-2020
83669	São Simão	SP	-21,46	-47,57	620,02	1961-2020
83726	São Carlos	SP	-21,98	-47,88	859,77	1971-2020
83064	Porto Nacional	TO	-10,71	-48,40	243,28	1961-2020
83235	Taguatinga	TO	-12,40	-46,43	604,88	1976-2020

Fonte: Autor.

Tabela 4 - Estações meteorológicas selecionadas neste estudo com coordenadas geográficas

Cidade	Estado	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)	Período
Rio Branco	AC	-9,95	-67,86	160,71	1970-2020
Água Branca	AL	-9,26	-37,93	603,42	1974-2020
Manaus	AM	-3,10	-60,01	61,25	1961-2020
Macapá	AP	-0,04	-51,11	12,8	1968-2020
Barreiras	BA	-12,15	-45,00	447,51	1961-2020
Fortaleza	CE	-3,81	-38,53	29,89	1961-2020
Brasília	DF	-15,78	-47,92	1161,42	1962-2020
Vitoria	ES	-20,31	-40,31	36,2	1961-2020
Catalão	GO	-18,17	-47,95	857,98	1961-2020
São Luís	MA	-2,52	-44,21	32,58	1971-2020
Belo Horizonte	MG	-19,93	-43,95	915,47	1961-2020
Paranaíba	MS	-19,66	-51,19	429,62	1972-2020
Cuiabá	MT	-15,62	-56,10	157,7	1961-2020
Itaituba	PA	-4,27	-55,99	24,5	1966-2020
Monteiro	PB	-7,89	-37,12	606,41	1963-2020
Cabrobó	PE	-8,50	-39,31	342,78	1965-2020
Teresina	PI	-5,03	-42,80	75,73	1961-2020
Londrina	PR	-23,32	-51,14	566	1961-2020
Campus	RJ	-21,74	-41,33	11,2	1961-2020
Apodi	RN	-5,62	-37,81	131,37	1963-2020
Caracaraí	RR	1,83	-6,11	51,99	1971-2020
Santa Maria	RS	-29,72	-53,72	103,1	1961-2020
Chapecó	SC	-27,13	-52,66	654	1974-2016
Própria	SE	-10,21	-36,84	18,46	1964-2020
São Paulo	SP	-23,49	-46,62	785,16	1961-2020
Porto Nacional	TO	-10,71	-48,40	243,28	1961-2020

Fonte: Jurinic e Farret, 2024.

A interpolação dos dados foi realizada conforme a técnica de Box & Jenkins (1994). Esses modelos podem ser representados por ou pela junção de modelos Autorregressivo (AR)

e de Médias Móveis (MA). A técnica de Box & Jenkins é uma abordagem poderosa e flexível para modelagem e previsão de séries temporais, e pode ser aplicada com sucesso para interpolar dados de séries temporais em pontos onde os dados estão ausentes.

Na falta de dados, optou-se em não os preencher estatisticamente, para não interferir nos resultados mais concretos da análise. Segundo (GASPARETO et al. 2021), tais métodos possuem suas fragilidades e podem trazer resultados diferentes do que foi a realidade amostral, mesmo escolhendo métodos mais sofisticados para preenchimento dos dados faltantes como o random forest, ou métodos extremamente tradicionais na área, como a regressão linear. A janela de tempo foi limitada em até 59 anos de dados, pois em várias localidades não existiram estações meteorológicas antes de 1961. Em todos os locais foram usados dados desde o ano de instalação das mesmas ou a partir de 1961.

3.1.2 Série Temporal

Uma série temporal é uma sequência de observações ou medidas coletadas e registradas em intervalos regulares ao longo do tempo. Cada observação na série temporal é associada há um momento específico no tempo, o que permite analisar como as características ou valores da série mudam ao longo das diferentes épocas.

A tranquilidade de uma série temporal em seus componentes de sazonalidade, tendência, ciclo e ruído/irregularidade é fundamental para compreender os padrões subjacentes nos dados.

Sazonalidade (S_t): refere-se a padrões que se repetem em intervalos regulares de tempo, geralmente associados a efeitos sazonais como variações climáticas, padrões de compra sazonal, feriados, entre outros. Compreender a sazonalidade permite antecipar flutuações previsíveis nos dados e pode ser crucial para tomar decisões informadas.

Tendência (T_t): refere-se à direção-geral dos dados ao longo do tempo. Identificar a tendência permite entender se os dados estão aumentando, diminuindo ou permanecendo estáveis ao longo do tempo. Isso é fundamental para prever o comportamento futuro da série temporal e identificar possíveis mudanças de longo prazo.

Ciclo (C_t): representa um padrão repetitivo ou oscilação que se estende por um período fixo de tempo. Os ciclos podem ser de curto, médio ou longo prazo, dependendo da duração do período de repetição. Eles podem estar associados a fatores sazonais, econômicos, climáticos ou outros fenômenos cíclicos.

Ruído/Irregularidade (α_t): refere-se à variação aleatória ou não sistemática nos dados que não pode ser atribuída à sazonalidade ou à tendência. O ruído pode obscurecer os padrões subjacentes nos dados e dificultar a análise. No entanto, entender e modelar o ruído é importante para identificar anomalias, avaliar a incerteza nas previsões e melhorar a precisão dos modelos, resultando na equação a seguir:

$$\text{Dados} = \text{série temporal} + \text{erro}$$

$$\text{Dados} = f(T_t, C_t, S_t) + \text{erro} \quad (2)$$

Ao decompor uma série temporal em seus componentes, os analistas podem entender melhor a estrutura dos dados, identificar padrões significativos e construir modelos mais precisos para previsões futuras. Isso é fundamental em uma variedade de campos, incluindo previsão de vendas, análise financeira, previsão meteorológica, previsões de potenciais energéticos, entre outros.

Uma série temporal é uma sequência de observações ou medidas coletadas e registradas em intervalos regulares ao longo do tempo. A representação típica de uma série temporal é $Z_t, t=1, 2, \dots, n$, onde Z_t é a observação no tempo t e n é o tamanho total da série, representando o número total de observações na série.

Se Z_t é um conjunto de observações correlacionadas entre si seguindo uma ordem cronológica de tempo, tem-se uma série temporal. O caso mais frequente é aquele onde a série só pode ser descrita com uma distribuição de probabilidade. Neste caso, tem-se uma série não-determinística.

Uma vez estabelecida a relação Z_t , um modelo matemático é criado para prever os valores futuros da série. A série temporal Z_t pode ser discreta ou contínua, univariada (com uma variável) ou multivariada (com mais de duas variáveis), e o tempo " T " pode ser univariado (uma dimensão) ou multivariado (com mais de uma dimensão).

3.1.2.1 *Análise espectral*

Neste estudo de tese, buscou-se por meio da análise espectral, identificar períodos com potência espectral detectável que permita verificar possíveis alterações significativas no potencial solar e suas consequências para a produção de energia e mudanças climáticas.

A análise espectral transforma a série temporal no domínio do tempo para o domínio da frequência. Ao fazer isso, é possível identificar os ciclos ou frequências dominantes presentes nos dados. O espectro resultante pode revelar a exibição de ciclos periódicos, ajudando a determinar, por exemplo, se há um ciclo anual ou mensal dominante em uma série de temperaturas. Isso é particularmente útil para detectar ciclos ocultos ou menos óbvios em dados que podem não ser evidentes apenas examinando a série no domínio do tempo.

A combinação de análises no domínio do tempo e no da frequência oferece uma visão abrangente das características e comportamentos de uma série temporal. Em campos como a climatologia, economia ou energético, como é o caso, estes aspectos são fundamentais para a proteção de percepções importantes, integração e tomada de decisões.

Na análise no domínio do tempo, os dados são examinados em relação ao tempo. Isso inclui a observação de padrões temporais, tendências, sazonalidades e comportamentos irregulares ao longo do tempo. Métodos comuns de análise no domínio do tempo incluem estatísticas descritivas, como média, mediana, desvio padrão, autocorrelação e funções de autocorrelação parcial, bem como técnicas de suavização, como médias móveis e modelos de séries temporais.

Na análise no domínio da frequência, os dados são transformados do domínio do tempo para o domínio da frequência por meio de técnicas como a transformada de Fourier ou a transformada de onda. Essa abordagem revela as componentes de frequência dos dados, permitindo a identificação de padrões periódicos, oscilações e mudanças de frequência ao longo do tempo. Métodos comuns de análise no domínio da frequência incluem espectrogramas, densidade espectral e análise de componentes principais no domínio da frequência.

3.1.3 Sistemas fotovoltaicos no Brasil

Os dados para este trabalho referentes a todos os sistemas fotovoltaicos existentes no Brasil foram fornecidos pela Lei de Acesso à Informação - LAI (LAI, 2022). Foi usado um protocolo com formulário de solicitação das informações sobre os sistemas fotovoltaicos no Brasil com a descrição e quantificação das placas fotovoltaicas, inversores, marcas e modelos de cada instalação regulamentada pela Aneel em todo país. Os dados obtidos são até junho de 2022, os últimos atualizados pela ANEEL até o presente momento. As informações disponíveis em dados abertos da ANEEL não contemplavam todas as informações necessárias para esse estudo, por isso foi feita uma solicitação especial.

Contabilizando um total de 1.048.574 sistemas fotovoltaicos regularizados e registrados em todo o país e, na categoria residencial, um total de 818.149 unidades geradoras, representando 78% das instalações. Por isso o foco desta tese optou por seguir apenas na linha residencial, pois as características de instalações são mais semelhantes entre diferentes locais, mais predominantes no país em relação as outras categorias e possui com um forte crescimento anualmente.

3.2 RADIAÇÃO SOLAR

Para se poder analisar o comportamento da radiação solar são necessários vários dados. Quanto maior for o tempo de coleta das informações, mais precisa será a projeção. Porém, essas informações no Brasil antes dos anos 2000 são praticamente inexistentes. Para contornar isso, vários autores fizeram uma conversão da radiação solar a partir do brilho do sol, medida através da insolação solar existente em várias estações meteorológicas. (VIANELLO e ALVEZ, 2004; MARTINEZ-LOZANO et. al. 1984; BERLATO, 1971; FONTANA e OLIVEIRA, 1996).

A equação de Angström-Prescott é comumente utilizada para estimar a radiação solar global a partir da radiação solar extraterrestre e da insolação (ou horas de sol) em um determinado local. No entanto, para se aplicar essa equação precisamente, é necessário calibrar as constantes empíricas da equação para a região específica onde ela será utilizada.

Os dados mensais da série de densidade de fluxo da radiação solar global recebidos em uma determinada superfície horizontal ao nível do solo em um dia ($\text{MJ m}^2/\text{dia}$) podem ser estimados pela equação de Ångström-Prèscott, que propõe um modelo empírico (VIANELLO e ALVES, 2004), como a equação a seguir:

$$R_g = R_a * [b_0 + b_1 \left(\frac{n}{N}\right)] \quad (3)$$

onde:

R_g é a densidade de fluxo de radiação solar global recebida em uma superfície horizontal ao nível do solo em ($\text{MJ m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)

R_a é a densidade de fluxo de radiação solar recebida no topo da atmosfera ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}/\text{dia}$)

b_0 e b_1 são os coeficientes empíricos estimados através de regressão linear (adimensionais)

n o número médio de horas de brilho solar (insolação), em (h/dia)

N é a duração do período diurno (h/dia).

Os coeficientes b_0 e b_1 da equação de regressão linear são influenciados por fatores como latitude, altitude, umidade do ar, cobertura de nuvens, tipo de nuvem predominante, variando mensalmente de acordo com a região climática (MARTINEZ-LOZANO et al., 1984). A equação de Ångström-Prèscott se torna mais precisa quando os valores de b_0 e b_1 são determinados para cada região ou local climático.

Se não há calibração disponível das constantes da equação de Angström-Prescott para uma determinada região, algumas alternativas podem ser consideradas:

Utilização de Constantes Padrão: Em algumas situações, podem ser usadas constantes padrão para a equação de Angström-Prescott, as quais são derivadas de estudos em regiões com características climáticas semelhantes. No entanto, essa abordagem pode não ser tão precisa quanto a calibração local.

Utilização de Modelos de Estimativa Alternativos: Existem outros modelos de estimativa de radiação solar global que podem ser utilizados em regiões onde não há calibração disponível da equação de Angström-Prescott. Alguns desses modelos incluem o modelo de radiação de ondas longas e curtas da NASA (NLDAS), o modelo de radiação solar de Hargreaves-Samani, entre outros.

Calibração Local: Se possível, realizar estudos locais para calibrar as constantes da equação de Angström-Prescott especificamente para a região de interesse. Isso envolveria a coleta de dados de radiação solar global e insolação em várias localidades da região ao longo do tempo para ajustar as constantes da equação conforme as condições locais.

Em resumo, a falta de calibração das constantes da equação de Angström-Prescott para uma região específica pode limitar a precisão das estimativas de radiação solar global.

Com a média anual do período amostral de radiação solar global e o modelo ajustado, foi utilizado nesta tese o software SigmaPlot (11.0) e realizada uma regressão não linear senoidal em forma de onda para projetar a curva característica que acompanha as alterações nos ciclos da radiação solar global ao longo do tempo. Isso fornece uma estimativa das tendências futuras com base nos padrões identificados nos dados históricos. Em conjunto foram realizados os testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e os testes de variância para todos os locais.

3.2.1 Duração da Exposição Solar

Uma das novidades metodológicas desenvolvidas nesta tese foi o uso de séries temporais de dados de insolação solar para determinar a irradiação solar em todos os estados brasileiros.

O cálculo do fotoperíodo, conforme apresentado por Kiesling (1982) geralmente envolve uma abordagem mais detalhada, considerando fatores como latitude, época do ano e a duração exata do crepúsculo civil, usando o período entre o nascer e o pôr do sol. Este é um método indicado para se obter a intensidade de luz inicial e final desejadas para qualquer local. A informação necessária para utilizar esta fórmula é a latitude do local.

A equação para calcular o nascer do sol e o pôr do sol pode ser obtido da maioria dos livros didáticos de astronomia (VORONTSOV-VEL'IAMINOV, 1969). A fórmula para o comprimento do dia em horas é a seguinte:

$$\text{Duração do dia} = \frac{2}{15} * \text{arc cos}[\cos \alpha \sec \varphi - \tan \varphi \tan \delta] \quad (4)$$

onde

α = distância zenital em graus do Sol no evento de interesse

φ = latitude em graus, o hemisfério norte é positivo

δ = a declinação do sol em graus.

A equação que relaciona a declinação do Sol com época do ano é:

$$\delta = \text{arc sin}\{0,39779 * \sin \lambda\} \quad (5)$$

A constante 0,39779 (obliquidade da eclíptica = 23,44 graus) e o λ é definido por:

$$\lambda = M + 1,916 \sin M \quad (6)$$

onde M é a anomalia média do Sol em graus e é definida por:

$$M = 0,985600t - 3,251 \quad (7)$$

onde t é a data juliana. A data juliana é corrigida para os anos bissextos adicionando-se 0,25 à data de cada ano após o ano bissexto.

A duração do período diurno médio de todos os meses do ano para cada local estudado foi calculada conforme Kiesling (1982). Com os valores de irradiação solar de todos os locais, verifica-se se há variações e se coincidem com os ciclos solares conhecidos, comprovando que tais ciclos realmente existem e estão influenciando diretamente a irradiação.

3.2.2 Insolação Solar

A insolação é entendida como o número de horas de sol descoberto acima do horizonte (FERREIRA, 1948). Também podem ser descritos como o número de horas, nas quais, durante um dia, o sol é visível e que não esteja oculto por nuvens ou fenômenos atmosféricos de qualquer natureza (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A insolação solar refere-se à quantidade de radiação solar recebida por uma determinada área durante um determinado período de tempo. É uma medida importante para entender a quantidade de energia solar disponível em uma região específica, o que é crucial para o desenvolvimento e a viabilidade de sistemas de energia solar, agricultura, climatologia e muitas outras aplicações.

Para este trabalho os valores referentes à insolação solar foram obtidos nas estações meteorológicas diariamente desde 1961 até 2020 com a utilização de heliógrafos.

Heliógrafos são instrumentos utilizados para medir a insolação solar ou a quantidade de radiação solar que atinge uma determinada área durante um período específico de tempo. Esses instrumentos são essenciais para se entender a disponibilidade de energia solar em uma região e são comumente usados em estudos meteorológicos, climatológicos, na agricultura, no planejamento urbano e na avaliação da viabilidade de projetos de energia solar.

Um heliógrafo típico consiste em uma esfera de vidro ou plástico transparente com um sensor de radiação solar localizado em seu interior. O sensor mede a quantidade de radiação solar que atinge a superfície da esfera ao longo do tempo. Esse valor é então registrado e pode ser usado para calcular a insolação solar em unidades como horas de sol por dia.

Existem diferentes tipos de heliógrafos, incluindo os heliógrafos de Campbell-Stokes, que utilizam uma esfera de vidro para focalizar os raios solares em um ponto de queima em um

cartão especial. A queima do cartão é proporcional à quantidade de insolação solar recebida (WORD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1983).

Os valores de insolação solar foram transformados de valores diários para média mensal para cada mês do ano, permitindo uma visão mais abrangente dos padrões de insolação solar ao longo do ano. A partir daí, então foi feito um cálculo da média anual para cada ano desde 1961 até 2020. Essa etapa fornece uma visão da variabilidade da insolação solar ao longo do tempo, permitindo a identificação de tendências de longo prazo e flutuações interanuais nos níveis de irradiância solar.

A duração da exposição solar é um fator importante que afeta a quantidade de radiação solar recebida em uma determinada região. Ao considerar-se essa informação, é possível ajustar os valores de irradiância para refletir as condições específicas de cada localidade. Com essas informações, juntamente com as da duração da exposição solar de cada região e os coeficientes da equação de Ångström-Prèscott é possível calcular os valores mais precisos de irradiância para cada estado brasileiro, considerando tanto a variabilidade temporal quanto às características específicas de cada região. Isso é fundamental para o planejamento e desenvolvimento de projetos de energia solar, bem como para estudos relacionados ao clima e ao meio ambiente.

3.2.3 Softwares Estatísticos de Projeção dos Cenários Futuros

Neste estudo, pretende-se utilizar os cenários B2 e A2, visando simular o cenário otimista (baixa emissão - B2) e o pessimista (alta emissão - A2). No entanto, apesar dos Modelos Climáticos Globais (MCGs) atuais estarem acoplados com modelos oceânicos e caracterizar bem as condições climáticas globais, eles pecam ao representarem bem os climas regionais, principalmente em áreas com coberturas vegetais, topografias complexas e regiões litorâneas (WMO, 2002). Por estes motivos, essa pesquisa optou por analisar inicialmente todos os estados brasileiros, e assim identificar as mudanças climáticas de cada região e quais dos seus impactos ocorreram nos sistemas fotovoltaicos dessas regiões. A partir dos resultados encontrados para todo o Brasil, encontraram-se as tendências relacionadas à localização, altitude e características que podem ser utilizadas em outras regiões do mundo que se assemelham às encontradas neste país.

O objetivo principal desta sessão de estudo é descrever a metodologia dos procedimentos para prever as variações de temperatura e precipitação em cada estado do Brasil.

Os dados coletados tiveram início em 1961 e terão uma projeção até o ano de 2100 usando dois softwares de Modelos Estatísticos de Redução de Escala (SDSM): Modelo Climático Regional (RegCM3) e o Modelo de Previsão e Pesquisa (HadCM3). A redução de escala envolve a determinação de uma ligação entre as informações atmosféricas em escala regional com previsões para o clima em escala global.

Para esta tese, utilizou o SDSM por ser mais rápido do que outros métodos que usam vários Modelos de Circulação Geral (GCMs) para produzir grandes conjuntos de cenários (WILBY et al. 2002). O SDSM tem sido bastante empregado na simulação dos efeitos das mudanças climáticas, meio ambiente, ciclo hidrológico e também para antecipação de eventos extremos e de produção do setor agrícola (WEATHERLY e ROSENBAUM 2017; COSTA-CABRAL et al. 2013; DHAGE et al. 2017; AHMADALIPOUR et al. 2017).

A média aritmética dos 2 modelos regionais é utilizada com uma resolução de 50 km, para o período de 2071-2100 em relação aos dados utilizados espacialmente distribuídos e elaborados pelo *Climatic Research Unit* - CRU (UNIVERSITY OF EAST ANGLIA CLIMATIC RESEARCH UNIT, 2013) da *University of East Anglia*, localizada em Norwich no Reino Unido, entre os anos 1961 e 2011, para dois cenários de emissão (A2 - altas emissões e B2 - baixas emissões) para a América do Sul com uma escala de 1:30.000.000.

3.2.3.1 Modelo Climático Regional (RegCM3)

As simulações desta tese usaram o modelo climático regional RegCM3. A primeira versão deste modelo (RegCM) foi originalmente desenvolvida no ano de 1989 a partir de modelos de mesoescala (MM4) no *National Center of Atmospheric Research* (NCAR). Atualmente, com a inclusão de diversas opções de parametrizações, o modelo é mantido no âmbito do *Earth System Physics* (ESP) do *International Center for Theoretical Physics* (ICTP) (GIORGI et al., 2012).

Na versão utilizada neste estudo, o modelo pode ser rodado para qualquer região do planeta com limite de resolução horizontal para a configuração de núcleo hidrostático ou para espaçamentos menores na opção não-hidrostática (GIORGI et al., 2012).

3.2.3.2 Modelo de Previsão e Pesquisa (Eta-HADCM3)

O modelo regional Eta-HadCM3 foi derivado do modelo Eta desenvolvido inicialmente pela Universidade de Belgrado em parceria com o Instituto Hidrometeorológico da antiga

Iugoslávia (MESINGER et al., 1988). Posteriormente, foi operacionalizado pelo National Centers for Environmental Prediction – NCEP (BLACK, 1994) e em 1996, este modelo tornou-se operacional no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC (CHOU et al., 2011).

Recentemente, o modelo regional Eta do CPTEC/INPE foi adaptado para realizar integração em escala decenal de pesquisas sobre mudanças climáticas relacionadas a diferentes níveis de concentração atmosférica de CO₂. As condições de contorno lateral e inferior são geradas pelo modelo HadCM3 do Hadley Center (atualmente conhecido como Eta-HadCM3). Essas previsões incluem os cenários A2 e B2 com uma resolução de 50 quilômetros no modelo horizontal e 38 camadas de resolução vertical para toda a América do Norte Sul. Isso significa que as previsões são feitas por uma grade horizontal de aproximadamente 50 km x 50 km por camada (CHOU et al., 2011).

Considerando a busca crescente por modelos de previsões mais precisos, este estudo apresentará as variáveis extraídas do modelo Eta-HadCM3, as quais são: temperaturas médias (°C) e precipitações (%). Uma das formas para melhorar a qualidade da previsão de tempo é a técnica por conjunto. Portanto, o cenário 2070-2100 foi assim considerado.

Para avaliar o desempenho do modelo Eta-HadCM3 foi realizada uma comparação entre os valores observados e os simulados através de uma análise de regressão envolvendo o coeficiente de determinação (R²) e o índice “d” (índice de concordância) proposto por Willmott et al. (1981).

3.2.4 Regressão Linear e R²

A abordagem linear apresentada nesta seção é uma equação usada para se estimar a condicional (valor esperado) de uma variável y , dados os valores de algumas outras variáveis x .

Para se estimar o valor esperado, usou-se uma equação que determina a relação entre ambas as variáveis:

$$\hat{y}_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon_i \quad (8)$$

onde:

(\hat{y}_i) é a variável explicada (dependente), representando o que o modelo tenta prever dado um X_i ;

(α) é uma constante, que representa a interceptação da reta com o eixo vertical;

(β) representa a inclinação (coeficiente angular) em relação à variável explicativa; (X_i) variável explicativa (independente) e

(ε_i) representa todos os fatores residuais mais os possíveis erros de medição.

O desempenho dos modelos foi verificado por meio da seguinte medida estatística: coeficiente de determinação (R^2). Uma maneira de calcular o R^2 é por meio das somas dos quadrados totais, dos resíduos e explicados (SQT, SQR e SQE):

$$SQT = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n} \quad (9)$$

onde:

SQT é a soma dos quadrados totais; n o número de observações; Y_i o valor observado; e \bar{Y} é a média de observações. A equação, então, nos fornece a soma dos quadrados das diferenças entre a média e cada valor observado.

$$SQR = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (10)$$

onde:

SQR é a soma dos quadrados dos resíduos, que calcula a parte não explicada do modelo, e \hat{Y}_i é o valor estimado (previsão) de Y_i .

$$SQE = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 = \hat{\beta}^2 * \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \hat{\beta}^2 * S_{xx} \quad (11)$$

SQE é a soma dos quadrados explicados, que indica a diferença entre a média das observações e o valor estimado para cada observação, e soma os respectivos quadrados.

Assim sendo, quanto menor for a diferença, maior poder explicativo o modelo possui.

Como R^2 é o percentual que o modelo $(\alpha + \beta * X_i)$ explica a variação total (Y), $R^2 = SQE/SQT$. Como $SQT = SQE + SQR$, também pode-se calcular o R^2 da seguinte forma:

$$R^2 = \frac{SQE}{SQT} = 1 - \frac{SQR}{SQT} \quad (12)$$

O método da regressão foi utilizado para encontrar uma curva característica em relação aos dados encontrados referentes a temperatura ambiente de cada local estudado. Com esta curva foi possível realizar uma projeção futura mais realista deste cenário. Este método pode ser considerado simples, porém muito preciso quando analisados os coeficientes R^2 . Os resultados dos coeficientes variam de -1 a +1. Se estiver entre 0,8 e 1 (valor absoluto), a força de associação entre duas variáveis é importante. Entre 0,5 e 0,8 é moderado e entre 0,2 e 0,5 é fraco.

3.3 PERDAS FOTOVOLTAICAS POR TEMPERATURA

A produção de energia fotovoltaica de um local depende principalmente de dois fatores: seu potencial fotovoltaico, $PV_{pot}(t)$ e a capacidade instalada. A sigla $PV_{pot}(t)$ é uma medida adimensional do desempenho das células fotovoltaicas em relação à sua capacidade nominal de potência de acordo com condições ambientais reais. Portanto, a PV_{pot} é multiplicado pela capacidade fotovoltaica instalada de potência nominal que pode fornecer uma geração instantânea de energia (JEREZ et al. 2015).

A $PV_{pot}(t)$ envolve principalmente a quantidade de recursos da Radiação Solar Descendente Superficial ($RSDS$) e possíveis efeitos de outras variáveis atmosféricas na eficiência fotovoltaica das células, as quais diminuem com o aumento da temperatura (RADZIEMSKA, 2003). De acordo com o (MAVROMATAKIS, 2010), a $PV_{pot}(t)$ pode ser expressa como:

$$PV_{pot}(t) = P_R(t) \frac{RSDS(t)}{RSDS_{STC}} \quad (13)$$

onde STC se refere às condições de teste padrão ($RSDS_{STC} = 1.000 \text{ W/m}^2$)

A capacidade nominal de um dispositivo fotovoltaico é determinada pela saída da energia medida e por P_R que é a chamada taxa de desempenho formulada para considerar as variações de temperatura que afetam a eficiência das células fotovoltaicas:

$$P_R(t) = 1 + \gamma [T_{cell}(t) - T_{STC}] \quad (14)$$

onde T é a temperatura da célula, $T_{STC} = 25 \text{ °C}$ e γ é considerado aqui como $-0,005 \text{ °C}^{-1}$, sendo esta uma resposta típica para os painéis solares de silício monocristalino (JEREZ et al. 2015).

Finalmente, a temperatura T da célula é modelada considerando-se os efeitos da Temperatura do Ar de Superfície (TAS), Radiação Solar Descendente Superficial (RSDS) em condições de céu total e Velocidade do Vento de Superfície (VWS) incidindo sobre ela como:

$$T_{cell}(t) = C_1 + C_2TAS(t) + C_3RSDS(t) + C_4VWS(t) \quad (15)$$

onde $C_1 = 4,3 \text{ °C}$, $C_2 = 0,943$, $C_3 = 0,028 \text{ °C m}^2\text{W}^{-1}$ e $C_4 = -1,528 \text{ °C sm}^{-1}$ de acordo com a ref. (CHENNI et al. 2007).

Portanto, se condições ambientais como $RSDS$, TAS e VWS corresponderem aos $STCs$, a PV_{pot} será igual a 1 e a produção de energia fotovoltaica atingirá o seu valor nominal. Se a T_{cell} for maior que 25 °C e/ou $RSDS$ menor a 1.000 W m^{-2} , o PV_{pot} será menor que a unidade e a potência de saída fotovoltaica será menor que a potência nominal do módulo (JEREZ et al. 2015).

As alterações induzidas por TAS na $PV_{pot}(t)$ usando:

$$\Delta TAS_{induced} PV_{pot}(t) = \left(\frac{\alpha_3 RSDS(t) * \Delta TAS}{PV_{pot\ Historical\ mean}} \right) * 100 \quad (16)$$

onde $\alpha_3 = -4,715 \times 10^{-6}$ expresso em percentagem.

Os módulos fotovoltaicos perdem tensão quando ocorrerem aumentos de temperatura, mas ganham um pouco de corrente. O Coeficiente de Temperatura (P_{max}), traduz o percentual de perda na potência dos módulos para cada grau Celsius acima de 25 °C na temperatura na condição padrão “ STC ”.

Segue abaixo um exemplo usando dados do datasheet de uma placa fotovoltaica monocristalina convencional: Temperatura Nominal de Operação do Módulo ($NMOT$) = 42 °C ; Coeficiente de Temperatura (P_{max}) = $-0,37\%/^{\circ}\text{C}$ e $TAS = 25 \text{ °C}$. Com esses dados pode-se calcular os resultados percentuais como exemplo da perda de eficiência no módulo usando as fórmulas (5) e (6).

$$(\Delta t) = NMOT - TAS \quad (17)$$

$$(\%) = \Delta t \times \text{Coef. de Temp. } (P_{max}) \quad (18)$$

Utilizou-se os dados para este exemplo:

$$42 \text{ }^\circ\text{C} - 25 \text{ }^\circ\text{C} = 17 \text{ }^\circ\text{C} \quad (19)$$

$$17 \text{ }^\circ\text{C} \times 0,37\%/^\circ\text{C} = 6,29\% \quad (20)$$

A potência máxima do módulo descrito acima, quando a sua temperatura estiver em 42 °C (em relação a uma temperatura ambiente de 25 °C), ficará em média 6,29% abaixo daquela informada na ficha técnica considerando-se que a radiação é constante em 1000 W/m². Seguindo o modelo aqui analisado, um módulo com potência nominal de 400 Wp nessas condições terá uma potência por volta de 374,84 Wp, relativa à perda de eficiência em decorrência da temperatura. Porém, as situações reais no Brasil fazem com que as temperaturas dos módulos e do ambiente superem em muito esses valores, geralmente resultando em perdas de aproximadamente 15%.

Para calcular as perdas decorrentes da temperatura nesta tese, utilizaram-se datasheets de 6 marcas de placas fotovoltaicas de silício monocristalinas das mais utilizadas em todo o Brasil, conforme mostra a Tabela 5 em ordem decrescente de quantidade. A partir destas informações fez-se uma média para o coeficiente de temperatura (P_{max}) em relação a cada grau Celsius, tendo como referência os 25 °C do STC e suas temperaturas de operação. Obteve-se um coeficiente médio de temperatura $P_{max} = -0,35\%/^\circ\text{C}$ e uma temperatura de operação de $44 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2$. Estes dados foram utilizados para realizar uma perspectiva em relação às perdas encontradas em cada local estudado e suas projeções futuras. Se forem consideradas placas menos usuais como as de policristalinas, porém com menor eficiência, o coeficiente médio de temperatura é $P_{max} = -0,40\%/^\circ\text{C}$, resultando em perdas ainda superiores.

Segundo Nunes et al. 2020, 90% dos geradores instalados no mundo são feitos à base de silício cristalino. Nestes, o silício monocristalino é o mais antigo e o que mantém o domínio do mercado (60%), sendo utilizado em todo o tipo de aplicações terrestres de média e de elevada potência.

No final de setembro de 2018, um estudo realizado pelo renomado Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics mostrou que a degradação induzida por temperaturas elevadas leva a uma perda de potência de até 6% para módulos PERC de silício monocristalino. Porém, essa perda para módulos PERC de silício policristalino são menores que 2% (GOTTSCHALG et al. 2018). Esses resultados atualmente já são bem diferentes, onde os novos módulos PERC de silício monocristalino já apresentam coeficientes de degradação induzidos por temperaturas elevadas muito menores do que comparada a do silício policristalino.

Houve uma rápida evolução das tecnologias fotovoltaicas ao longo de um tempo relativamente curto, como mencionado no estudo de 2018 até 2024. As mudanças nas recomendações sobre qual tipo de placa fotovoltaica utilizar, bem como suas características como eficiência, rendimento e coeficientes de perdas, demonstram a natureza dinâmica desse setor e a busca contínua por melhorias e inovações é um reflexo da intensa pesquisa e desenvolvimento no campo da energia solar.

Tabela 5 - Datasheet de algumas placas fotovoltaicas monocristalinas mais utilizadas no Brasil

Marca	Modelo	Potência (W)	Coefficiente de Temperatura de P_{max}	($NMOP$)
Canadian	CS3W-445 450 455 460 465 470MS	445-470	-0,34%/°C	41 °C ± 3
Jinko	JKM440M-6TL4-V	440	-0,35%/°C	45 °C ± 2
Byd	MGK-36 MONOFACIAL 425W - 455W	425-455	-0,38%/°C	45 °C ± 2
Risen	RSM150-8-480M-505M	480-505	-0,36%/°C	44 °C ± 2
Trina	TSM-DE18M	480-510	-0,34%/°C	43 °C ± 2
DAH	DHM-66X10-475 ~ 505W	475-505	-0,35%/°C	45 °C ± 2
Média		425-510	-0.35%/°C	44 °C ± 2

Autor: Jurinic e Farret (2024).

3.4 PROJEÇÕES FUTURAS

Neste trabalho foi realizada uma análise sobre o impacto das alterações climáticas na potência dos painéis solares, utilizando dados climáticos históricos de cada estado brasileiro separadamente. O objetivo é criar uma projeção dos possíveis cenários futuros por meio de uma regressão linear, considerando que as atuais tecnologias dos painéis solares têm uma vida útil de aproximadamente 25 anos. Foram criadas projeções para períodos de 25 anos, mostrando o cenário climático em relação à temperatura média anual nos anos de 2045, 2070, 2095 e 2120, abrangendo um total de 100 anos. Devido às diferentes reações das tecnologias às temperaturas,

foi selecionada uma tecnologia futura específica que apresentasse melhores resultados, permitindo assim avaliar se a substituição das tecnologias existentes seria vantajosa ou não. Atualmente a mais utilizada mundialmente e a de Silício Monocristalina (AL-WAELI et al. 2016).

Vários estudos foram apresentados na literatura técnica para a avaliação dos impactos das mudanças climáticas no potencial fotovoltaico futuro com base em projeções dinamicamente reduzidas de outras regiões, como Europa (JEREZ et al. 2015), África (BICHET et al. 2019, SAWADOGO et al. 2021), Austrália (PODDAR et al. 2021) e China (PARK et al. 2022, WU et al. 2022). Nesta direção, ainda falta um estudo para a mudança no potencial fotovoltaico de todo o Brasil em escala regional. Para isto, deve-se levar em conta, que a maioria dos estudos atuais são baseados em projeções do modelo climático global (GCM), que não capturam de forma confiável as características do clima em escala regional. Portanto, estes estudos podem levar a uma projeção menos confiável para as mudanças futuras (LIANG et al. 2008, YOU et al. 2022). Por este motivo a presente tese faz um diferencial para uma análise individual de cada região do Brasil, aumentando significativamente a confiabilidade das previsões e ainda podendo ser replicado mundialmente.

As projeções futuras sobre sistemas fotovoltaicos envolvem uma série de considerações, incluindo avanços tecnológicos, políticas energéticas, custos e condições climáticas esperadas. Aqui estão algumas áreas-chave que também foram consideradas ao fazer projeções futuras sobre sistemas fotovoltaicos:

Avanços Tecnológicos: o desenvolvimento contínuo de tecnologias fotovoltaicas, como células solares de filme fino, células solares de terceira geração e tecnologias de armazenamento de energia, pode aumentar a eficiência e reduzir os custos dos sistemas fotovoltaicos no futuro.

Políticas Energéticas: a implementação de políticas governamentais favoráveis, como incentivos fiscais, subsídios, tarifas de alimentação e metas de energia renovável, pode impulsionar a adoção de sistemas fotovoltaicos em larga escala.

Custos: a redução contínua dos custos de instalação e operação de sistemas fotovoltaicos, devido à economia de escala, avanços tecnológicos e eficiências operacionais, pode tornar os sistemas solares mais acessíveis e competitivos em relação às fontes de energia convencionais.

Condições Climáticas: as mudanças climáticas podem afetar a disponibilidade de radiação solar e as condições ambientais para a operação de sistemas fotovoltaicos. Modelos

climáticos podem ser usados para projetar padrões futuros de irradiação solar e temperatura, o que ajudará a prever o desempenho dos sistemas fotovoltaicos em diferentes regiões.

Integração com a Rede Elétrica: o aumento da penetração de sistemas fotovoltaicos distribuídos na rede elétrica exigirá avanços na integração e gerenciamento da rede para lidar com a variabilidade da geração solar e garantir a estabilidade do sistema.

Aceitação Pública e Adoção de Energia Renovável: mudanças nas atitudes públicas em relação à energia renovável e preocupações com as mudanças climáticas podem impulsionar uma maior adoção de sistemas fotovoltaicos em residências, empresas e setor público.

Esses são apenas alguns dos fatores a serem considerados ao se fazer projeções futuras para sistemas fotovoltaicos. É importante realizar análises abrangentes e integradas que considerem múltiplos cenários e incertezas para fornecer uma visão mais completa e mais precisa das tendências futuras nesse setor.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação de diferentes métodos com séries temporais de insolação (brilho solar) e radiação solar para todos os estados brasileiros. Os dados diários foram convertidos em médias mensais e anuais, abrangendo o período de 1961 a 2020.

A análise das séries temporais envolve a identificação dos componentes principais, incluindo tendências, sazonalidade e ciclos das variáveis de interesse. Esses componentes são importantes para entender os padrões temporais e as variações climáticas ao longo do tempo.

Os resultados obtidos nesta tese incluem informações sobre: tendências de longo prazo na insolação solar, irradiância e temperatura ao longo do período analisado; padrões sazonais, como variações sazonais anuais e mensais na insolação, irradiância solar e temperatura; ciclos de curto prazo ou variações interanuais nas séries temporais; eventos extremos ou anomalias climáticas que possam ter ocorrido durante o período de estudo.

Os resultados aqui obtidos são fundamentais para se compreender as características climáticas e a variabilidade da radiação solar em diferentes regiões do Brasil ao longo do tempo, fornecendo uma base sólida para análises mundiais posteriores sobre os impactos das mudanças climáticas nos sistemas fotovoltaicos e outras aplicações relacionadas.

4.1 QUANTITATIVOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL

Ao longo dos levantamentos de dados para esta tese, observou-se que até o mês de junho de 2022 havia um total de 1.048.574 de sistemas fotovoltaicos regularizados e registrados em todo o país e, na categoria residencial, um total de 818.149 unidades geradoras, representando 78% das instalações. Diante dessa grande categoria, decidiu-se analisar individualmente cada um dos 27 estados para se saber como as mudanças climáticas poderão afetar a geração de energia elétrica nos anos vindouros. Aqui está um resumo das informações fornecidas pela LAI, 2022:

Área Total de Placas Fotovoltaicas Instaladas: 135,73 km².

Total de Placas Instaladas: 43,9 milhões de unidades.

Máxima Potência Instalada até junho de 2022: 11,33 GW.

Máximo Potencial Instalado de Placas Fotovoltaicas: 19,97 GW.

Máximo Potencial Instalado de Inversores: 16,36 GW.

Os dados reunidos na Tabela 6 mostram o quantitativo de sistemas fotovoltaicos residenciais até 06/2022 utilizados no Brasil e as respectivas marcas mais utilizadas.

Tabela 6 - Quantidade de sistemas residenciais que utilizam determinada marca de placas fotovoltaicas no Brasil e suas respectivas porcentagens

Marca	Quantidade	Porcentagem do total (%)
Canadian Solar	138960	16,98
Jinko Solar	99378	12,14
Byd	88004	10,75
Risen Solar Technology	84014	10,26
Trina Solar	64900	7,93
DAH Solar	52574	6,42
Intelbras	19063	2,33
Outros (menores quantidades)	271256	33,15
Total	818149	100

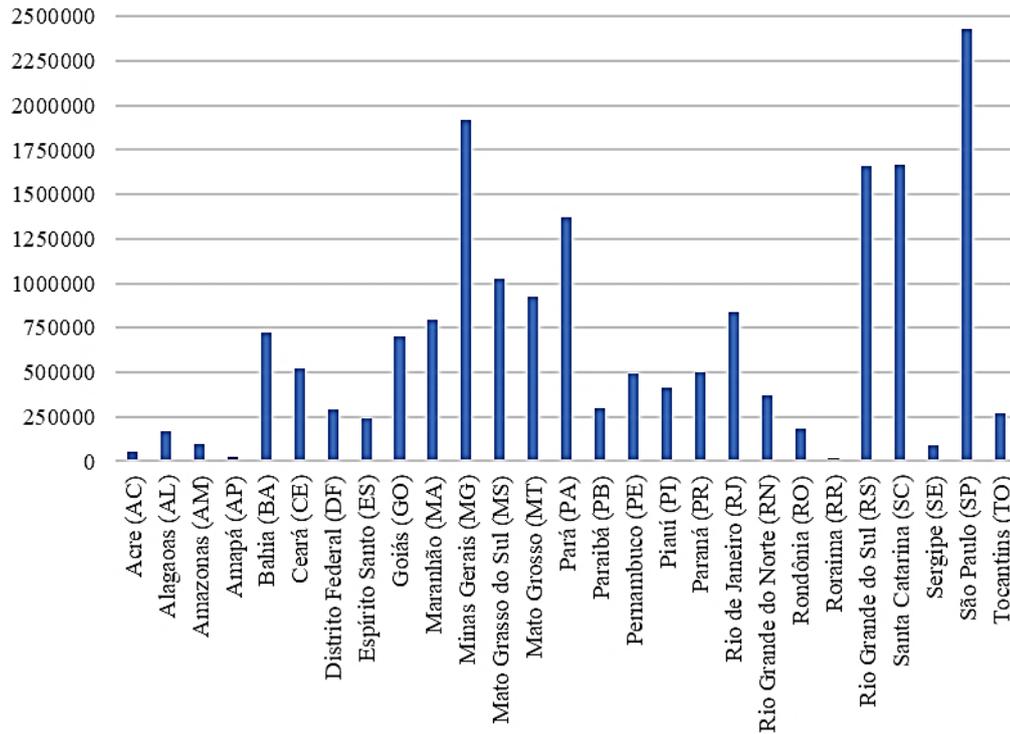
Fonte: Jurinic e Farret (2024).

Em termos de quantidade de placas fotovoltaicas instaladas no Brasil até junho de 2022, existe um total de 43.994.242, e na categoria residencial um total de 18.088.813 de placas, apesar de representarem apenas 78% dos sistemas PV instalados. Esta diferença ocorre devido aos sistemas comerciais e as usinas solares possuírem uma grande quantidade de placas em uma única instalação (LAI, 2022). A Figura 20 mostra uma distribuição de placas fotovoltaicas residenciais por estado e a Figura 21 representa o total dos inversores utilizados.

Esses dados também destacam o papel importante que a energia solar fotovoltaica está desempenhando na matriz energética do Brasil, contribuindo para a diversificação da geração de energia e para a redução das emissões de carbono.

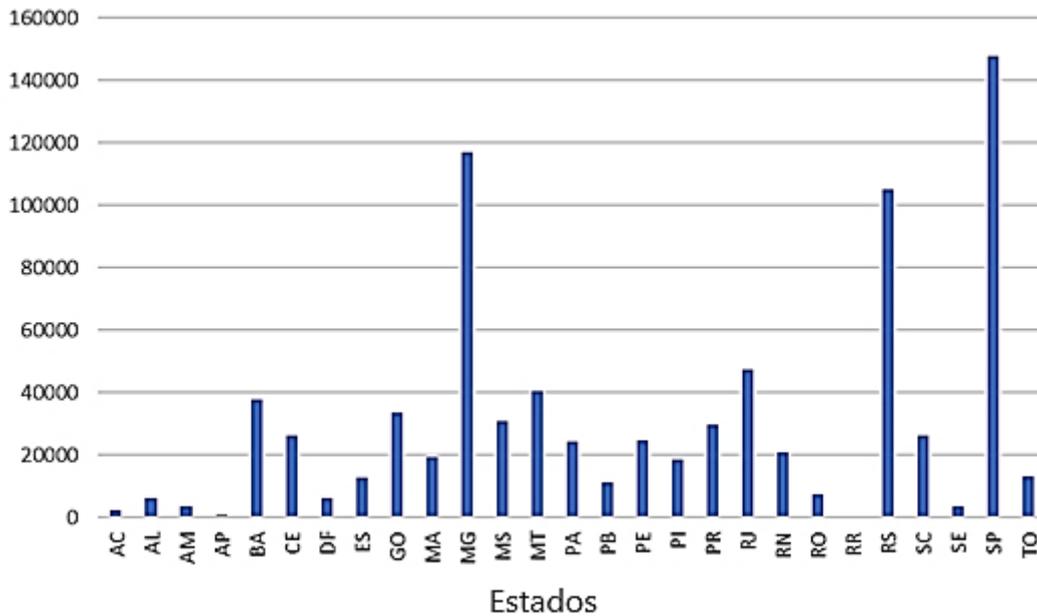
O estado com a maior quantidade de placas fotovoltaicas residenciais é o de São Paulo (SP), seguido por Minas Gerais (MG), Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC). Porém, o estado com maior potência instalada e placas de todas as categorias é o de Minas Gerais. Estes resultados mostram a importância desse trabalho ao analisar principalmente os sistemas residenciais, que abrangem uma maior quantidade de instalações e conseqüentemente, esse estudo poderá ajudar mais pessoas nas previsões futuras e na elucidação de dúvidas sobre as instalações fotovoltaicas.

Figura 20 - Total de placas fotovoltaicas residenciais instaladas em cada estado no Brasil



Fonte: Autor.

Figura 21 - Total de inversores instalados em residências em cada estado do Brasil



Fonte: Autor.

Observa-se na Figura 21, que Santa Catarina (SC) não está mais entre as 4 maiores instalações, porém agora é a quantidade de inversores de potência por existir um número muito grande de modelos de inversores disponíveis no mercado com potências ainda mais variadas.

Observa-se que nessa região optou-se por inversores de maior potência e, portanto, em menores quantidades. As instalações residenciais fotovoltaicas existentes em todo o Brasil usam um pouco menos de um milhão de inversores de potência até o momento.

Comparando os dados acima com os dados atuais, chegou-se a uma marca de 1.652.883 imóveis em todo Brasil, assim podendo-se ver o gigantesco crescimento na área fotovoltaica, passando dos 100% de crescimento em apenas 1 ano (ABSOLAR, 2023). Demonstrando o quanto é importante o aprimoramento dos conhecimentos nos cenários futuros para os sistemas fotovoltaicos. Esses números mostram um aumento significativo na capacidade instalada de energia solar fotovoltaica no Brasil, refletindo o crescimento e o interesse contínuo nessa fonte de energia renovável. O potencial instalado de placas fotovoltaicas e inversores ainda não atingiu seu máximo, sugerindo ainda espaço para mais crescimento e desenvolvimento no setor. No entanto, apesar do progresso alcançado até o momento, ainda há oportunidades significativas para expandir ainda mais a capacidade de geração de energia solar fotovoltaica no Brasil, aproveitando seu vasto potencial de recursos solares e promovendo políticas e incentivos que incentivem ainda mais o investimento nessa tecnologia limpa e sustentável. O mesmo acontece no restante do mundo.

4.2 TEMPERATURA AMBIENTE

Com relação as mudanças na temperatura ambiente, muita coisa pode ser observada. Por exemplo, pode-se observar na Figura 22 a distribuição das temperaturas médias anuais no estado de Goiás (GO) desde 1961 até 2020, comprovando nitidamente que as temperaturas estão subindo de uma forma linear ao longo do tempo, assim como em outros locais. A utilização da regressão linear gerou uma equação e um R^2 muito preciso que podem ser utilizados para projeções futuras, ambas podendo serem vistas na Figura 22, demonstrando como este trabalho pode contribuir para novos estudos.

A Tabela 7 mostra uma projeção para os aumentos das temperaturas de cada local analisado e suas respectivas janelas de tempo e, no final, mostra-se o coeficiente de determinação (R^2) para comprovar o quanto o modelo apresentado nesta tese se ajusta às amostras dos dados coletados. Para alguns locais, o modelo não apresentou valores de R^2 tão próximos de 1 devido ao fato de que naquelas regiões as estações meteorológicas serem instaladas posteriormente ao ano de 1961, resultando em uma menor quantidade de dados históricos disponíveis.

Tabela 7 - Projeção dos aumentos de temperaturas médias anuais (°C) em relação a cada cidade/estado estudados

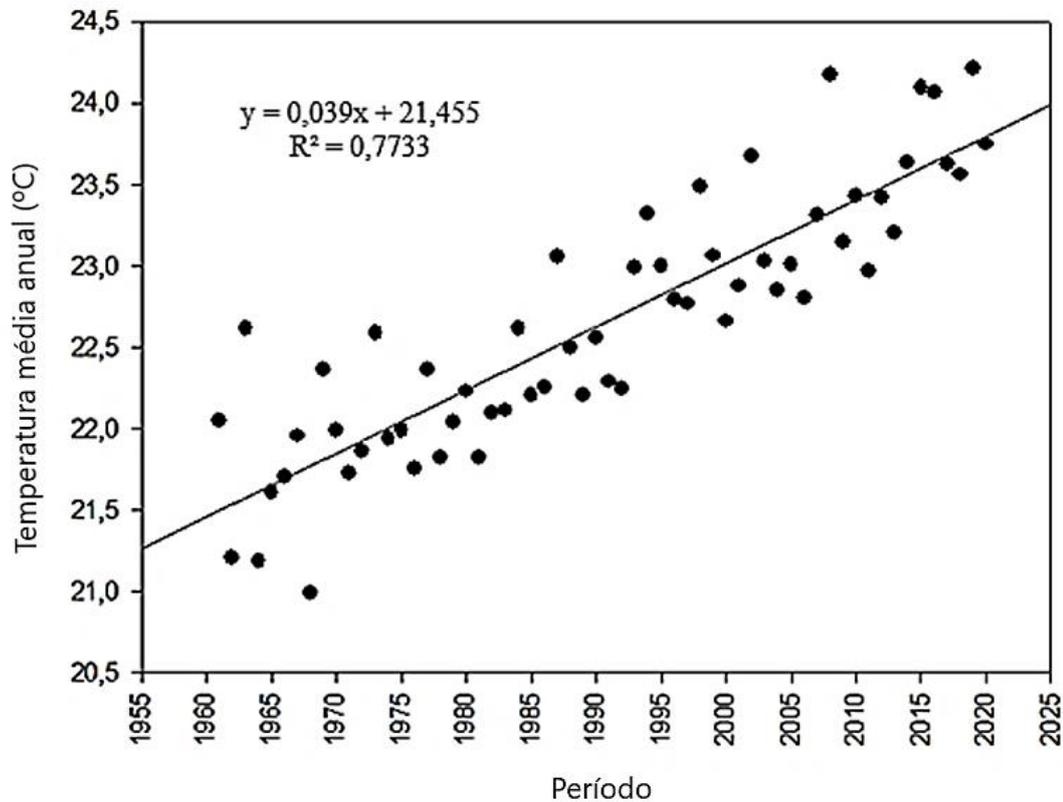
Cidade	Estado	25 Anos	50 Anos	75 Anos	100 Anos	R ²
Guarapuava	PR	0,77	1,58	2,39	3,20	0,60
São Paulo	SP	0,95	1,91	2,86	3,82	0,72
Brasília	DF	0,88	1,59	2,30	3,01	0,64
Macapá	AP	0,80	1,51	2,21	2,92	0,71
Apodi	RN	0,40	0,82	1,24	1,66	0,17
Santa Maria	RS	0,45	0,77	1,09	1,41	0,20
Cuiabá	MT	0,53	1,08	1,63	2,18	0,45
Água Branca	AL	0,30	0,61	0,92	1,23	0,15
Fortaleza	CE	0,36	0,74	1,12	1,50	0,43
Cabrobó	PE	0,70	1,43	2,15	2,88	0,51
Teresina	PI	0,29	0,57	0,86	1,15	0,09
Manaus	AM	0,61	1,25	1,89	2,52	0,54
Itaituba	PA	1,23	2,50	3,78	5,06	0,77
Campus	RJ	0,51	1,04	1,58	2,11	0,53
Barreiras	BA	0,8	1,63	2,46	3,30	0,61
São Luiz	MA	0,90	1,80	2,71	3,61	0,68
Monteiro	PB	0,65	1,32	2,00	2,67	0,59
Própria	SE	0,74	1,50	2,27	3,04	0,55
Vitória	ES	0,54	1,09	1,65	2,21	0,48
Belo Horizonte	MG	0,67	1,37	1,93	2,77	0,58
Catalão	GO	0,94	1,91	2,89	3,86	0,77
Chapecó	SC	0,56	1,12	1,68	2,24	0,28
Rio Branco	AC	0,20	0,75	1,30	1,85	0,50
Caracaráí	RR	0,69	1,47	2,26	3,04	0,49
Paranaíba	MS	0,86	1,72	2,58	3,44	0,56
Porto Nacional	TO	0,99	2,00	3,03	4,05	0,73
Porto Velho	RO	*	*	*	*	*

*Falta de dados para uma análise e a não existência de outra estação meteorológica no estado indicado.

Fonte: Jurinic e Farret (2024).

Na Figura 23, pode-se observar as mudanças progressivas de temperatura para cada estado e considerar-se que o estado do Pará (PA) será o mais impactado, podendo-se antecipar que esse estado enfrentará maiores desafios em relação às perdas nos sistemas fotovoltaicos devido ao aumento das temperaturas. O Pará está localizado na região norte do Brasil, próximo à linha do equador. Como resultado, este estado geralmente experimenta temperaturas mais altas ao longo do ano em comparação com os demais estados localizados mais ao sul. Isso destaca a importância de se desenvolver estratégias de adaptação e mitigação para garantir o desempenho eficaz dos sistemas fotovoltaicos em condições climáticas desafiadoras.

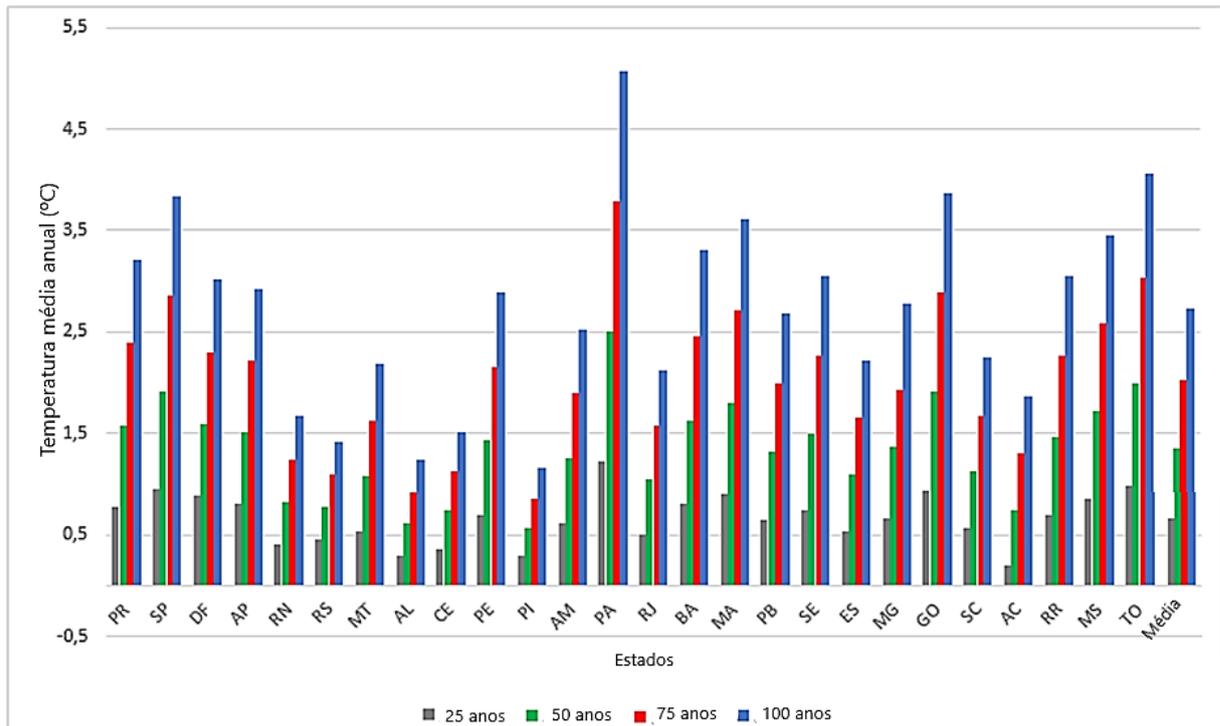
Figura 22 - Dispersão das temperaturas médias anuais de Goiás (GO) de 1961 até 2020 e sua linha de tendência



Fonte: Jurinic e Farret (2024).

Na Tabela 8 estão registradas as diferenças de temperatura em relação aos 25 °C as quais permitem analisar melhor as perdas e ganhos dos sistemas fotovoltaicos com base no STC. As diferenças de temperatura em relação aos 25 °C vão chegar até 8,42 °C, indicando que as condições climáticas estão se tornando mais extremas e que as temperaturas estão se desviando significativamente das condições padrão de teste (STC - Standard Test Conditions) para sistemas fotovoltaicos. Consequentemente, as potências nominais da geração PV serão reduzidas se não forem encontradas tecnologias mais adaptadas para esses níveis de temperaturas globais.

Figura 23 - Aumento da temperatura média anual em cada estado brasileiro



Fonte: Jurinic e Farret (2024).

Quando a temperatura das células fotovoltaicas aumentar além dos 25 °C, várias perdas podem ocorrer:

Perda de Eficiência da Célula Fotovoltaica: normalmente, as células PVs perdem eficiência à medida que a temperatura aumenta. Isso ocorre porque o aumento da temperatura aumenta a resistência elétrica das células PVs e reduz a diferença de potencial elétrico, resultando em uma eficiência de conversão de energia solar em eletricidade menor do que a eficiência nominal;

Perda de Energia devido ao Aquecimento: o aumento da temperatura das células PVs pode elevar a perdas de energia devido ao aquecimento. Essas perdas podem resultar em uma redução na produção total de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos, especialmente em condições de temperatura mais altas;

Impacto no Rendimento: as diferenças de temperatura também podem afetar o rendimento global dos sistemas fotovoltaicos, reduzindo sua capacidade de produzir energia elétrica em níveis ótimos;

Considerações de Projeto e Manutenção: as diferenças de temperatura também podem influenciar o projeto e a manutenção dos sistemas fotovoltaicos. Por exemplo, as estruturas de montagem e os materiais de isolamento devem ser projetados para lidar com variações de temperatura ao longo do dia e do ano;

Impacto nas Projeções de Desempenho: as mudanças nas diferenças de temperatura em relação aos 25 °C podem afetar as projeções de desempenho de longo prazo dos sistemas fotovoltaicos. É importante considerar essas variações ao realizar análises de viabilidade e planejamento de sistemas fotovoltaicos.

Tabela 8 - Diferenças nas temperaturas médias anuais em °C com referência ao padrão de 25 °C

Cidade	Estado	2020	2045	2070	2095	2120
Rio Branco	AC	1,06	1,20	1,81	2,37	2,92
Caracaraí	RR	2,75	3,45	4,23	5,02	5,80
Macapá	AP	2,75	3,56	4,27	4,97	5,68
Brasília	DF	-3,48	-2,59	-1,88	-1,17	-0,46
Paranaíba	MS	0,07	0,93	1,79	2,65	3,51
Chapeco	SC	-5,38	-4,82	-4,26	-3,70	-3,14
Própria	SE	1,66	2,39	3,16	3,93	4,70
Água Branca	AL	-1,66	-1,36	-1,05	-0,73	-0,43
Manaus	AM	2,72	3,34	3,97	4,61	5,25
Barreiras	BA	0,64	1,44	2,28	3,11	3,94
Fortaleza	CE	2,34	2,70	3,08	3,46	3,84
Vitoria	ES	0,10	0,88	1,44	1,99	2,55
Catalão	GO	-1,25	-0,26	0,71	1,69	2,66
São Luís	MA	2,58	3,49	4,39	5,29	6,20
Belo Horizonte	MG	-2,57	-1,90	-1,20	-0,64	0,20
Cuiabá	MT	1,88	2,40	2,96	3,51	4,06
Itaituba	PA	3,31	4,59	5,87	7,15	8,42
Monteiro	PB	-0,09	0,59	1,26	1,94	2,61
Cabrobó	PE	2,55	3,25	3,98	4,71	5,43
Teresina	PI	2,58	2,87	3,15	3,44	3,73
Londrina	PR	-2,73	-1,96	-1,15	-0,34	0,46
Campus	RJ	-0,21	0,30	0,83	1,36	1,89
Apodi	RN	3,03	3,43	3,85	4,27	4,69
Santa Maria	RS	-5,59	-5,14	-4,82	-4,50	-4,18
São Paulo	SP	-3,99	-3,04	-2,08	-1,13	-0,17
Porto Nacional	TO	3,07	4,00	5,02	6,04	7,07

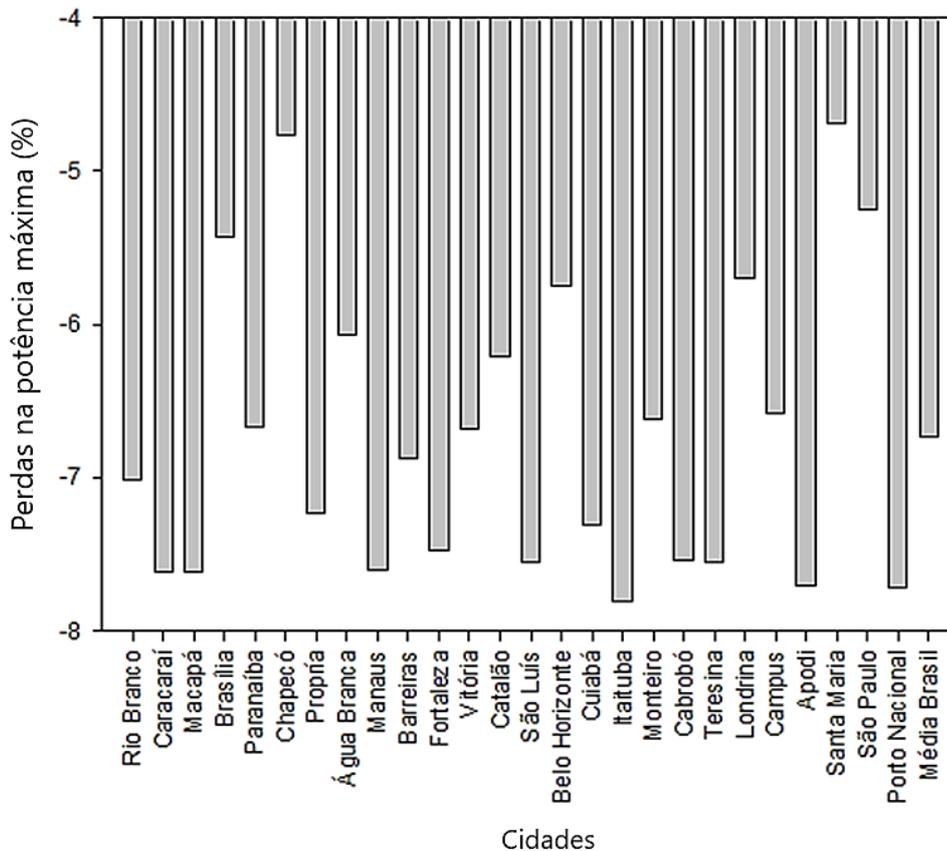
Fonte: Jurinic e Farret (2024).

Em resumo, o aumento das diferenças de temperatura em relação aos 25 °C indica uma tendência preocupante que pode ter implicações significativas para a eficiência e o rendimento dos sistemas fotovoltaicos. É importante monitorar essas tendências e considerar as adaptações necessárias para se garantir um desempenho eficaz dos sistemas fotovoltaicos nas condições climáticas em evolução.

4.2.1 Perda fotovoltaica em decorrência da temperatura

Quando a temperatura dos módulos fotovoltaicos aumenta, a eficiência de conversão de energia diminui, levando a uma redução na produção de energia elétrica. A Figura 24 mostra as perdas calculadas para o ano de 2020 em relação à temperatura média anual de cada local, conforme equação 18, considerando uma irradiância solar constante de 1000 W/m^2 e um coeficiente de temperatura geral = $-0,37 \text{ \%/}^\circ\text{C}$. Com isto verifica-se que em todos os locais já existem perdas em decorrência das temperaturas e nenhum sistema vai gerar conforme sua potência nominal. Conclui-se assim que é necessário projetar os novos sistemas PV com uma maior potência que a presentemente necessária para compensar essas e outras perdas. Nos estados mais ao sul do país, cujas temperaturas médias anuais são mais baixas, as perdas anuais serão menores, pois as temperaturas ficam mais próximas dos $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 24 - Perdas na potência máxima em placas fotovoltaicas em decorrência da temperatura média anual de 2020



Fonte: Jurinic e Farret (2024).

A Figura 25 mostra uma projeção para até 100 anos dos aumentos nas perdas pela temperatura média anual. Para determinação dessas perdas nos parâmetros STC em relação aos 25 °C, só foram consideradas as temperaturas médias anuais. Ou seja, as temperaturas máximas em alguns dias do ano serão muito mais elevadas e as temperaturas de funcionamento das placas solares poderão ultrapassar os 60 °C. Isto significa que as perdas relacionadas à temperatura podem ultrapassar a ordem dos 15%.

Figura 25 - Projeção das perdas na potência máxima em decorrência do aumento das temperaturas para geração fotovoltaica



Fonte: Jurinic e Farret (2024).

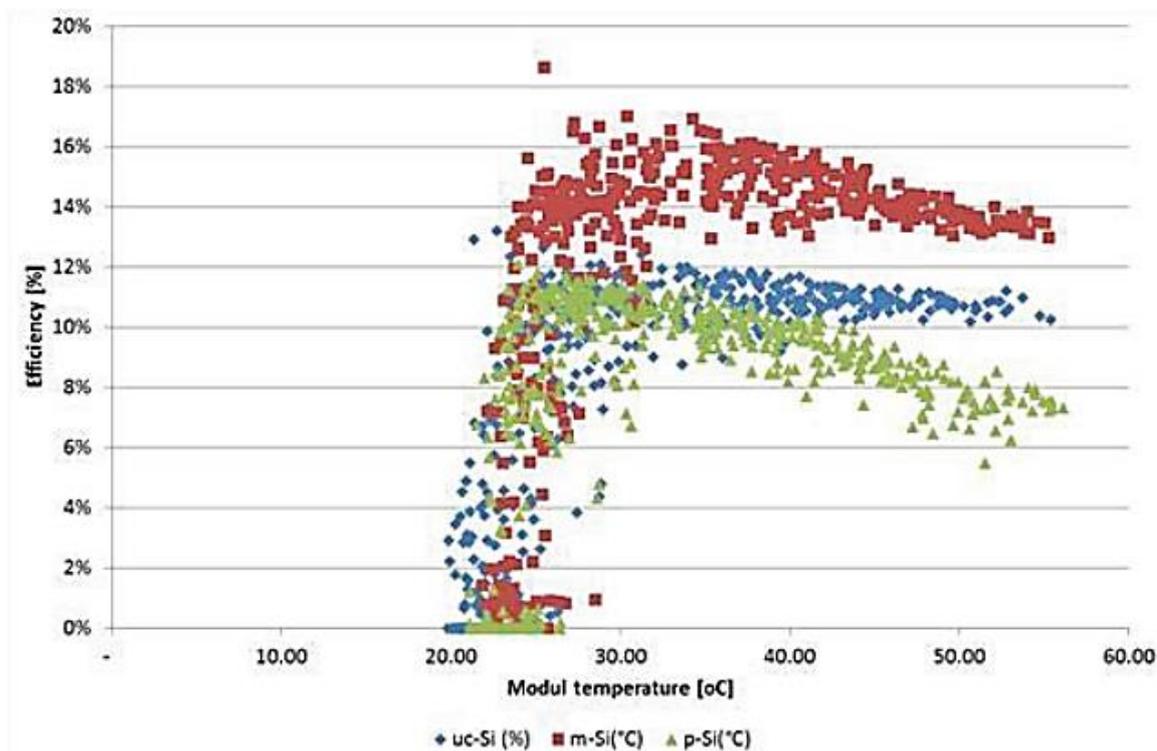
É importante ressaltar que outros fatores, como sombreamento, degradação do painel ao longo do tempo e eficiência do inversor, também podem influenciar o rendimento real do sistema fotovoltaico. Portanto, essas projeções devem ser consideradas uma estimativa geral e podem variar dependendo das condições específicas de cada projeto.

As descobertas relacionadas sobre as tecnologias dos sistemas fotovoltaicos têm implicações significativas para o design e a operação de sistemas, ao destacarem a importância de considerar não apenas a eficiência inicial dos módulos, mas também a sua resistência à degradação ao longo do tempo, especialmente em condições ambientais adversas.

Na Figura 26 pode-se ver o resultado de um estudo de Rosyid, 2016, relacionado com a redução da eficiência de três tipos de módulos fotovoltaicos de silício (filme-fino,

monocristalino e policristalino) em função da temperatura de operação na Indonésia, com clima tropical semelhante com o Brasil.

Figura 26 - Resultado de estudo comparativo da redução de eficiência de três tipos de módulos fotovoltaicos de silício (filme-fino, monocristalino e policristalino) em função da temperatura de operação



Fonte: Rosyid, 2016.

O módulo fotovoltaico monocristalino foi melhor em termos de eficiência do módulo e produção geral de energia em relação aos outros materiais. Enquanto isso, o silício micromorfo (uc-Si) apresentou a menor eficiência do módulo, mas uma maior produção de energia em comparação com o módulo fotovoltaico policristalino. A eficiência do módulo e a relação de desempenho mostraram uma tendência decrescente com o aumento da temperatura do módulo. Esses resultados ressaltam a importância de se considerar não apenas a eficiência do módulo fotovoltaico, mas também a produção geral de energia ao avaliar-se diferentes tecnologias fotovoltaicas sob diferentes climas.

Pelo que se disse acima, portanto, é essencial para os fabricantes, instaladores e operadores de sistemas fotovoltaicos acompanhar de perto as últimas pesquisas e desenvolvimentos no campo da tecnologia fotovoltaica, a fim de poderem garantir a escolha e o desempenho ideais dos sistemas fotovoltaicos em diferentes ambientes e aplicações. Esse

enfoque holístico garantirá a escolha da tecnologia mais adequada para maximizar a produção de energia e otimizar o retorno dos investimentos em sistemas fotovoltaicos.

4.3 RADIAÇÃO SOLAR

Os coeficientes b_0 e b_1 utilizados neste estudo sobre o desempenho fotovoltaico, podem ser vistos na Tabela 9. Nenhum trabalho na literatura existente traz ainda esses valores para todos os estados brasileiros. Isto só demonstra a grande contribuição que traz esta tese para trabalhos futuros quanto às estimativas de irradiação solar em todo o país com uma maior exatidão e a possibilidade de serem adaptadas mundialmente.

Para regiões onde não exista a calibração das constantes da equação de Angström-Prescott foi proposto por Allen et al. (1998) no boletim da FAO, os valores de 0,25 (b_0) e 0,50 (b_1). Porém, para Liu et al. (2012), os modelos descritos como universais, independentemente do número de estações meteorológicas e da abrangência dos dados, devem ser usados com cautela, dando-se preferência a modelos que considerem as condições locais. Os únicos estados para os quais não foi possível encontrar trabalhos com os coeficientes de Angstrom específicos para a região foram TO, MS e RO. Então, para esses estados utilizaram-se as recomendações de Allen et al. 1998 para estimar os valores de radiação solar global a partir da insolação solar.

A Figura 27 mostra as irradiâncias médias ao longo dos 59 anos para cada um dos locais estudados neste capítulo. A irradiância no STC é considerada 1.000 W/m², porém esse valor só é encontrado ao meio-dia, para dias sem nuvens (PEREIRA et al. 2017). Com estes dados, verifica-se que a média está bem abaixo dos 1000 W/m², ficando o Brasil com uma irradiância média de 678,7 W/m² e uma insolação média de 6,49 horas. Esta é a quantidade de energia solar que chega a uma superfície perpendicular aos raios solares por unidade de tempo e por unidade de área. Com valores de irradiância assim reduzidos comparados aos parâmetros STC (1000 W/m²), os sistemas fotovoltaicos também terão uma menor geração de energia elétrica.

Na Figura 28, podemos observar a variação da irradiância de quatro locais, sendo eles Distrito Federal - DF, Amapá - AP, Paraíba - PB e Paraná - PR. Tais variações corroboram com a existência de ciclo da irradiância, porém com uma pequena variação da amplitude, conforme a localização de cada estado.

A Figura 29 ilustra a irradiância solar média mensal do Distrito Federal - DF de 1961 a 2020.

Tabela 9 - Coeficientes b_0 e b_1 utilizados neste estudo para cada estado do Brasil

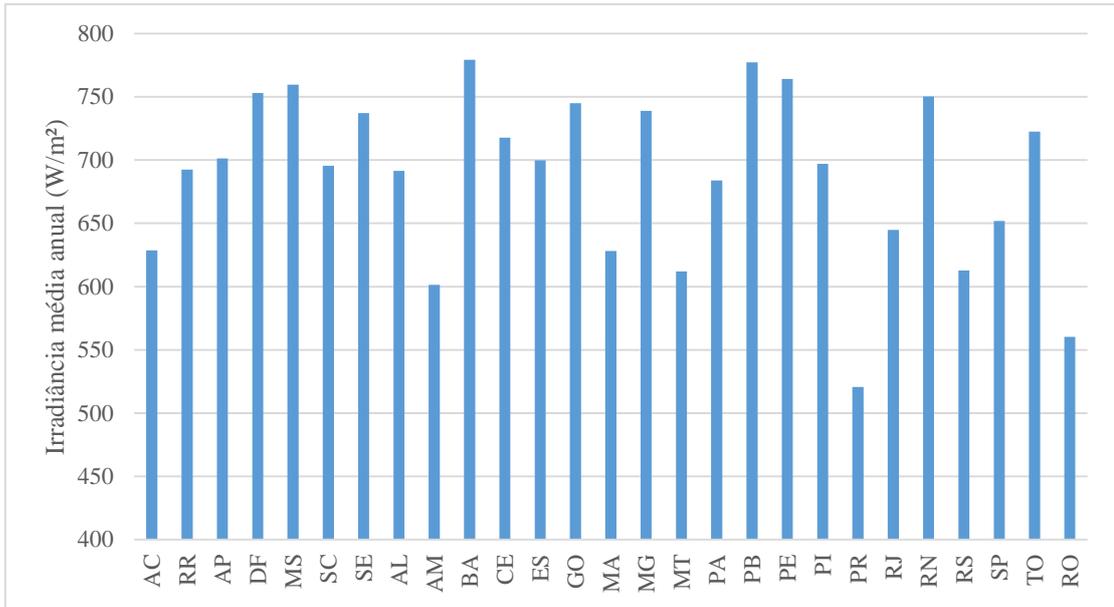
Cidade	Estado	Latitude	Altitude	Coefficiente b_0 média	Coefficiente b_1 média
				anual	anual
Rio Branco ¹⁴	AC	-7,6°	220	0,28	0,44
Palmeira dos Índios ⁹	AL	-9,45°	274	0,277	0,394
Manaus ¹⁰	AM	3,6°	39	0,26	0,43
Macapá ⁴	AP	0,03°	16	0,308	0,377
Barreiras ¹²	BA	12,1°	441	0,31	0,41
Sobral ⁹	CE	-3,75°	109	0,241	0,439
Brasília ³	DF	15,93°	997	0,294	0,468
Vitória ¹³	ES	20,1°	31	0,29	0,43
Catalão ¹³	GO	18,1°	857	0,31	0,41
São Luiz ¹²	MA	2,5°	36	0,28	0,34
Belo Horizonte ¹³	MG	19,5°	915	0,3	0,42
Paranaíba ¹⁵	MS	-19,67	398	0,25	0,5
Sinop ⁸	MT	11,86°	371	0,244	0,377
Itaituba ¹⁴	PA	-4,27°	131	0,29	0,44
Monteiro ¹²	PB	7,9°	250	0,33	0,38
Cabrobó ⁹	PE	-8,51°	341	0,278	0,439
Teresina ⁹	PI	-5,08°	74	0,26	0,385
Guarapuava ¹	PR	25,38°	1034	0,138	0,422
Seropédica ²	RJ	-22,74°	36	0,29	0,41
Macau ⁹	RN	-5,11°	3,45	0,273	0,386
Porto Velho ¹⁵	RO	-8,75°	95	0,25	0,5
Boa Vista ¹⁴	RR	2,82°	148	0,3	0,43
Santa Maria ⁷	RS	29,69°	113	0,17	0,56
Florianópolis ¹³	SC	27,3°	46	0,27	0,45
Própria ¹²	SE	10,2°	35	0,31	0,44
Seropédica ²	SP	22,75°	30	0,273	0,45
Porto Nacional ¹⁵	TO	10,42	234	0,25	0,5

¹Lena et al. (2020). ²Carvalho et al. (2011). ³Dornelas et al. (2006). ⁴Belúcio et al. (2014). ⁵Medeiros et al. (2017).

⁶Silva A. O. da. (2014). ⁷Bexaira et al. (2018). ⁸Martim et al. (2020). ⁹Correia et al. (2022). ¹⁰Ribeiro et al. (1982).

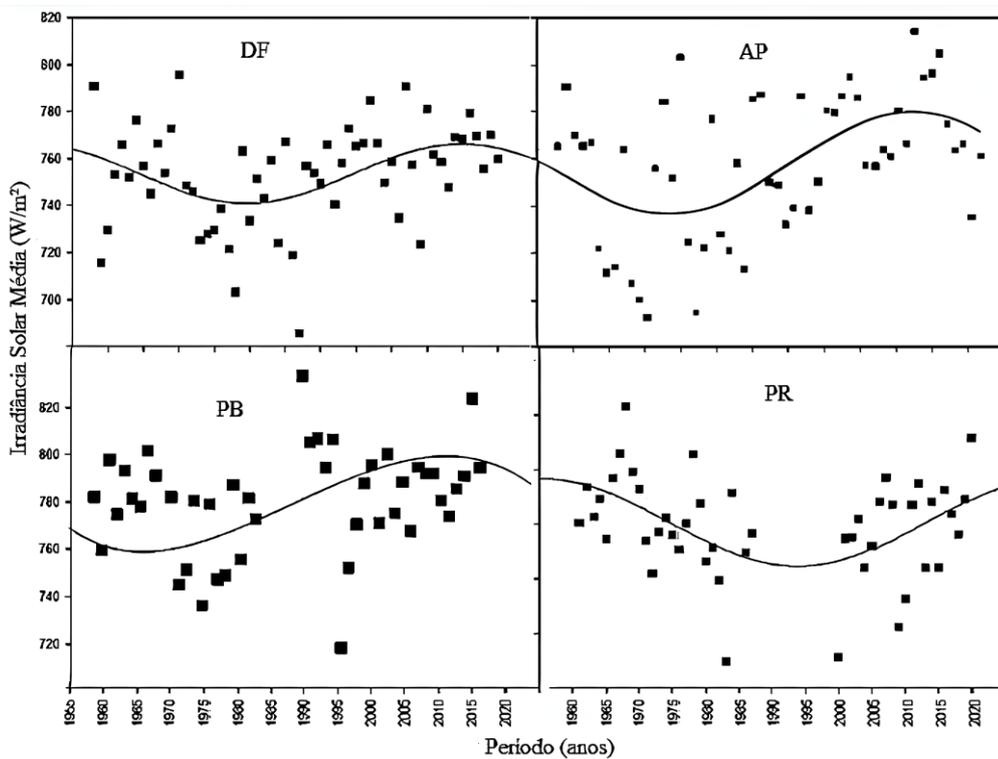
¹¹Pacheco & Bastos (2002). ¹²Tiba, C. (2001). ¹³Mota F. S. da; Beirsdorf M. I. C.; Acosta M. J. C. (1977). ¹⁴Martim C. C. (2020). ¹⁵Allen et al. (1998).

Figura 27 - Irradiância média anual ao longo do período estudo para cada estado brasileiro



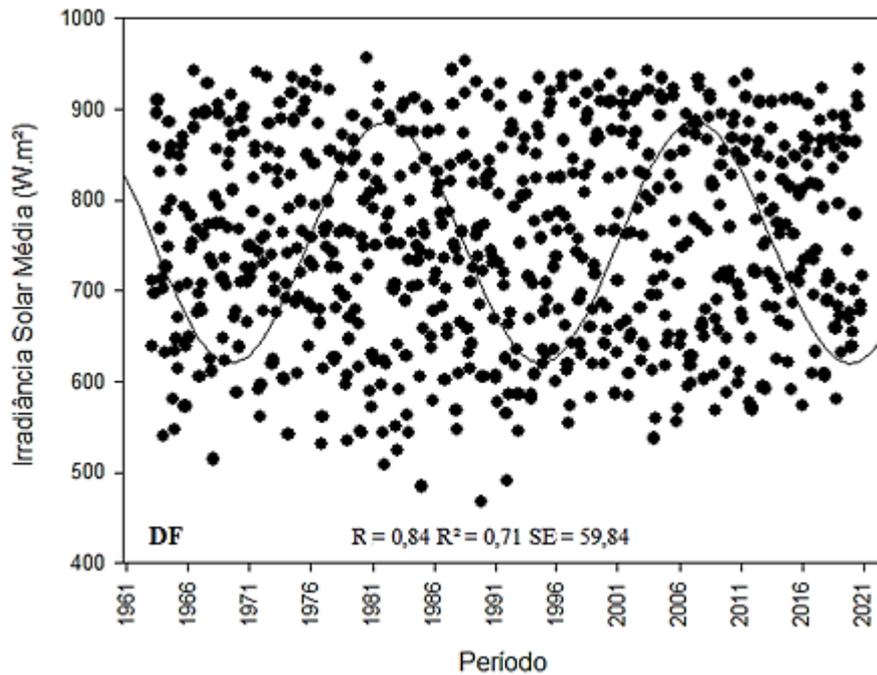
Fonte: Autor.

Figura 28 - Irradiância solar média do Distrito Federal - DF, e dos estados do Amapá - AP, Paraíba - PB e Paraná - PR, desde 1961 a 2020



Fonte: Autor.

Figura 29 - Irradiância Solar Média mensal do Distrito Federal - DF de 1961 a 2020



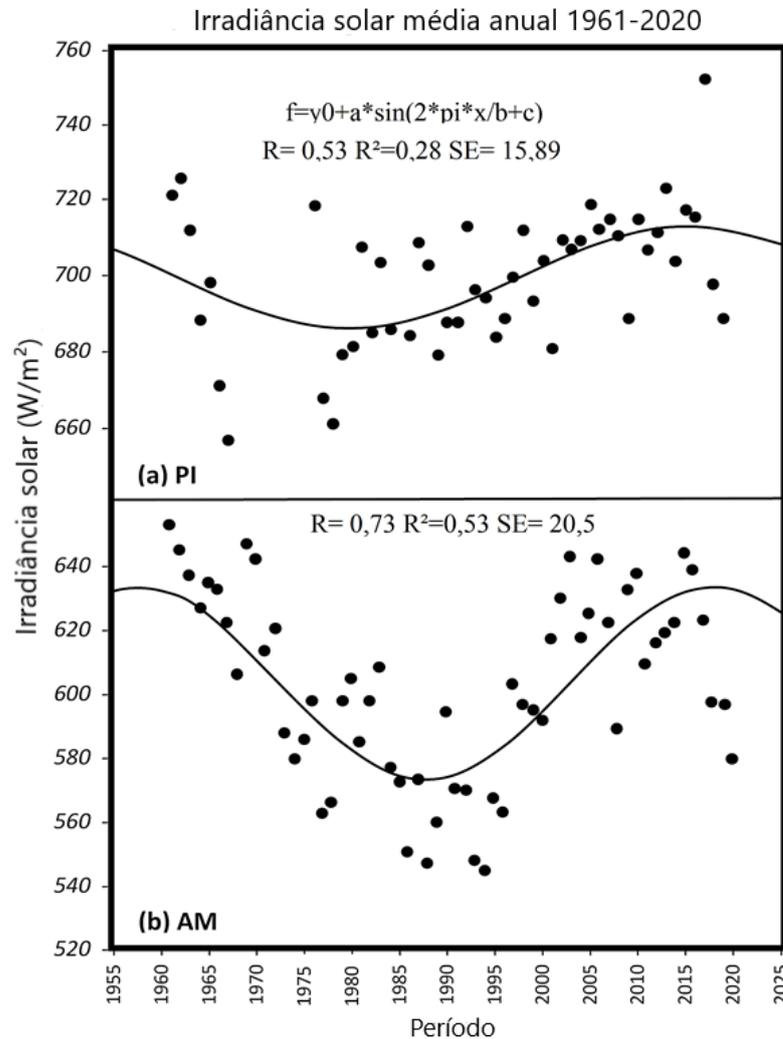
Fonte: Autor.

Na Figura 30a é possível observar-se a irradiância solar média anual do estado do Piauí – PI e na Figura 30b, a do Amazonas - AM. Isto evidencia a existência de ciclos solares de aproximadamente 60 a 70 anos. Variações semelhantes também foram encontradas em todos os outros estados do Brasil. Os testes de Shapiro-Wilk mostraram que nenhum local possui uma distribuição normal dos dados.

Em todos os estados estudados, a mínima solar foi entre os anos de 1995 a 2005. Seguindo esse ciclo, nota-se um crescimento da irradiação solar nacional resultando em um cenário promissor para geração fotovoltaica no Brasil, que tende a continuar aumentando por mais alguns anos, chegando a uma máxima solar lá pelo ano de 2025. Após esse período começará uma redução, chegando a mínima solar nesse ciclo somente lá pelo ano de 2050.

As variações da intensidade de irradiação solar ao longo dos anos podem ser justificadas pelos ciclos conhecidos como Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) de 50 a 70 anos, Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) de 50 a 90 anos, Ciclo Inferior de Gleissberg com aproximadamente 88 anos e o conjunto de outros ciclos de menos duração resultando em um ciclo de maior amplitude

Figura 30 - Média anual de irradiância solar nos estados de Piauí (a) e Amazonas (b) desde 1961 a 2020



Fonte: Jurinic e Farret (2024).

Com a média mensal de irradiância solar não se constatou visualmente os ciclos na irradiância encontrados. Porém, com o software SigmaPlot 11.0 e uma regressão não linear senoidal em forma de onda apresentou o melhor ajuste e um $R^2 = 0,71$. Em todos os estados utilizando a média mensal de irradiância, variou de 18 a 25 anos, existindo uma coincidência dos ciclos observados com o ciclo de Hale que é de aproximadamente 22 anos. Este fato é muito interessante e sugere uma possível relação entre os dois fenômenos. Esses resultados são importantes para se compreender melhor os padrões de variação da irradiância solar e podem ter implicações significativas para o planejamento e a operação de futuros sistemas fotovoltaicos, bem como para o estudo dos efeitos das variações solares no clima terrestre.

Na Figura 31 podemos ver um mapa do Brasil mostrando a média de irradiância solar para cada estado ao longo de todo o período estudado, contribuído com uma maneira eficaz de visualizar a distribuição da radiação solar em todo o país.

4.3.1 Duração da exposição solar

A amplitude nas horas de brilho de sol pode ser influenciada por vários fatores, incluindo a inclinação do eixo da Terra, a órbita da Terra ao redor do Sol, a cobertura de nuvens, a presença de massas de ar e sistemas climáticos, entre outros.

A Tabela 10 mostra as médias de horas do brilho de sol mensal e anual para cada estado. Com esses valores específicos para cada local, aumenta-se a precisão da conversão de insolação solar para irradiação solar. Conseqüentemente, isto impactará na estimativa da quantidade de energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos nos estados brasileiros.

A menor quantidade de horas de brilho de sol no Brasil encontrada foi no Rio Grande do Sul no mês de junho com duração de 10,13 horas e a máxima também no mesmo estado, porém em dezembro com 13,87 horas. Essa informação destaca a variação significativa na quantidade de horas de brilho de sol ao longo do ano no estado do Rio Grande do Sul, refletindo as diferentes estações e padrões climáticos nesta região. A amplitude entre a menor e a maior quantidade de horas de brilho de sol observada no mesmo estado demonstra a variabilidade sazonal pronunciada experimentada em muitas regiões do Brasil.

No caso do Rio Grande do Sul, a amplitude nas horas de brilho do sol é particularmente alta devido à sua localização geográfica no extremo sul do Brasil e às características climáticas únicas desta região. Isso pode resultar em invernos mais escuros e com menos horas de sol, contrastando com verões mais ensolarados e com mais horas de sol.

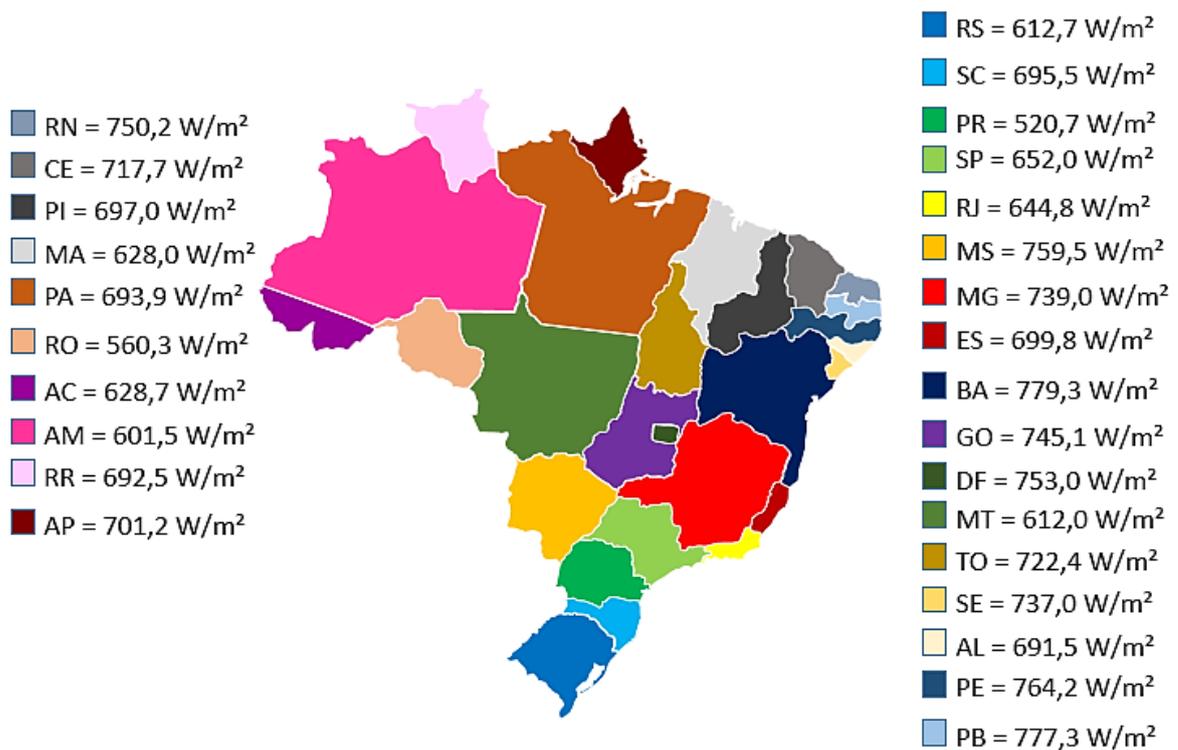
Essa variação sazonal nas horas de brilho do sol tem implicações importantes em vários aspectos da vida cotidiana, incluindo atividades agrícolas, turismo, saúde e bem-estar, e pode influenciar também a demanda por energia elétrica e o planejamento de infraestrutura.

4.3.2 Insolação solar

A insolação solar varia significativamente em todo o Brasil pela sua extensa área geográfica, com diferenças marcantes entre os estados. A visualização das médias anuais de insolação solar de cada estado brasileiro é uma ferramenta valiosa para se compreender a

distribuição da radiação solar em todo o país. Na Figura 32, pode-se observar claramente essas médias.

Figura 31 - Mapa do Brasil de cada estado com a média de irradiância solar ao longo de todo o período estudado



Fonte: Autor.

A visualização das médias anuais de insolação solar por estado fornece insights valiosos sobre a distribuição e o comportamento da radiação solar no Brasil. Estes dados são essenciais para uma variedade de aplicações, incluindo energia renovável, agricultura e estudos climáticos. Na Figura 33 pode-se ver alguns exemplos das médias de cada ano para alguns estados como Acre-AC, Roraima-RR e Amapá-AP, desde 1970 a 2020. Nestes casos já é possível ver-se um ciclo relacionado a esse fenômeno, o que sugere que existe uma variabilidade periódica na insolação solar ao longo do tempo.

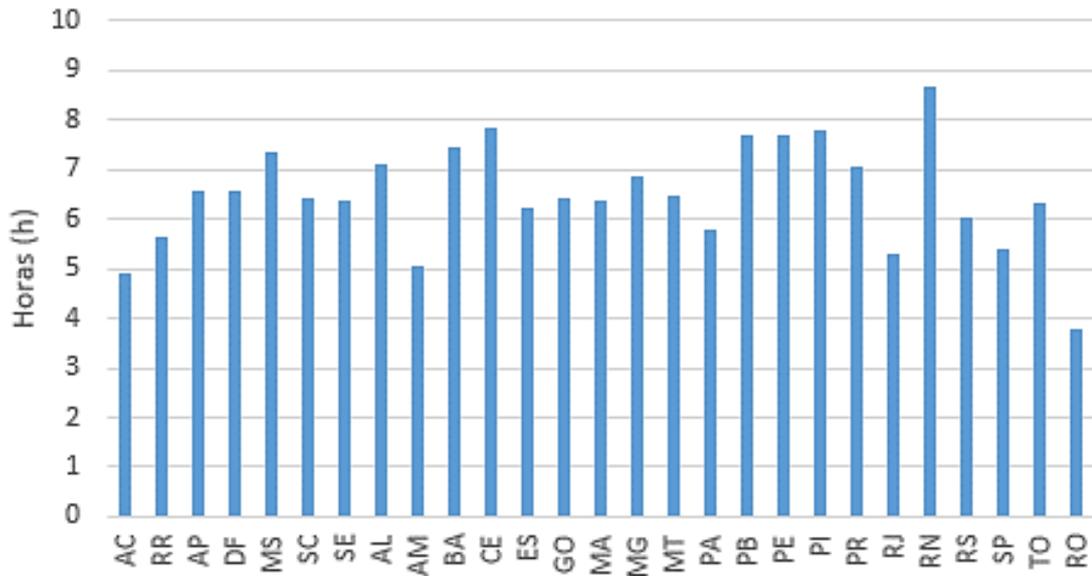
Os dados acima expostos podem ser úteis para se entender os padrões de longo prazo na disponibilidade da radiação solar nessas regiões, bem como para análises comparativas entre os estados e identificação de tendências ao longo do tempo. Essas informações são valiosas para uma variedade de aplicações, incluindo planejamento de energia renovável, estudos climáticos e agricultura.

Tabela 10 - Número médio de horas de brilho do sol mensal e anual dos estados brasileiros

Estado	jan.	fev.	mar.	abr.	mai.	jun.	jul.	ago.	set.	out.	nov.	dez.	anual
AC	12,51	12,31	12,05	11,77	11,54	11,43	11,48	11,67	11,93	12,20	12,44	12,57	11,99
RR	11,91	11,94	11,99	12,04	12,08	12,10	12,09	12,06	12,01	11,96	11,92	11,90	12,00
AP	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
DF	12,82	12,50	12,07	11,63	11,26	11,08	11,16	11,47	11,89	12,33	12,72	12,92	11,98
MS	13,04	12,63	12,09	11,53	11,07	10,83	10,94	11,33	11,86	12,41	12,90	13,16	11,98
SC	13,50	12,90	12,13	11,33	10,66	10,32	10,47	11,03	11,79	12,59	13,30	13,67	11,97
SE	12,52	12,32	12,05	11,77	11,53	11,41	11,46	11,66	11,93	12,21	12,46	12,58	11,99
AL	12,47	12,29	12,04	11,79	11,58	11,47	11,52	11,69	11,93	12,19	12,41	12,53	11,99
AM	12,16	12,10	12,01	11,93	11,86	11,82	11,84	11,90	11,98	12,06	12,14	12,18	12,00
BA	12,63	12,38	12,06	11,72	11,44	11,30	11,36	11,60	11,91	12,25	12,54	12,70	11,99
CE	12,19	12,12	12,02	11,91	11,83	11,78	11,80	11,87	11,97	12,08	12,17	12,22	12,00
ES	13,08	12,65	12,10	11,52	11,04	10,79	10,90	11,30	11,85	12,43	12,94	13,20	11,98
GO	12,95	12,58	12,09	11,57	11,15	10,93	11,02	11,38	11,87	12,38	12,83	13,07	11,98
MA	12,13	12,08	12,01	11,94	11,89	11,86	11,87	11,92	11,98	12,05	12,11	12,14	12,00
MG	13,06	12,64	12,09	11,53	11,06	10,82	10,92	11,32	11,85	12,42	12,92	13,18	11,98
MT	12,81	12,49	12,07	11,64	11,27	11,09	11,17	11,47	11,89	12,32	12,71	12,91	11,98
PA	12,22	12,13	12,02	11,90	11,81	11,76	11,78	11,86	11,97	12,09	12,19	12,24	12,00
PB	12,40	12,24	12,04	11,82	11,64	11,55	11,59	11,74	11,94	12,16	12,35	12,45	11,99
PE	12,43	12,26	12,04	11,81	11,61	11,51	11,56	11,72	11,94	12,17	12,38	12,48	11,99
PI	12,26	12,15	12,02	11,89	11,77	11,71	11,74	11,83	11,96	12,10	12,22	12,29	12,00
PR	13,26	12,76	12,11	11,44	10,88	10,59	10,71	11,19	11,83	12,50	13,09	13,40	11,98
RJ	13,20	12,73	12,11	11,46	10,92	10,65	10,77	11,22	11,83	12,48	13,05	13,35	11,98
RN	12,29	12,17	12,03	11,87	11,74	11,68	11,71	11,82	11,96	12,11	12,25	12,32	11,99
RS	13,67	13,01	12,15	11,26	10,51	10,13	10,29	10,92	11,77	12,66	13,45	13,87	11,97
SP	13,27	12,77	12,11	11,43	10,87	10,58	10,70	11,18	11,82	12,50	13,10	13,42	11,98
TO	12,55	12,33	12,05	11,75	11,51	11,38	11,44	11,64	11,92	12,22	12,48	12,61	11,99
RO	12,45	12,27	12,04	11,80	11,60	11,50	11,54	11,71	11,94	12,18	12,39	12,50	11,99

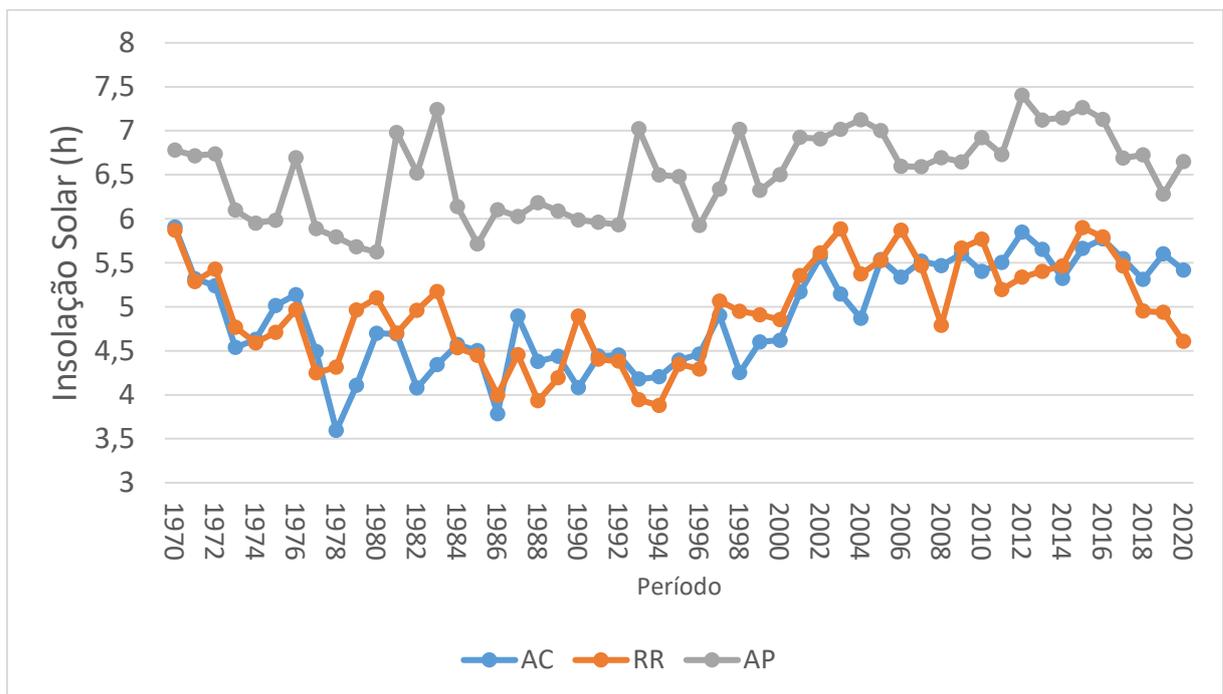
Fonte: Baseado em Kiesling (1982).

Figura 32 - Média geral de insolação solar de cada estado brasileiro desde 1961 a 2020



Fonte: Autor.

Figura 33 - Média de cada ano de insolação solar dos estados do Acre-AC, Roraima-RR e Amapá-AP, desde 1970 a 2020



Fonte: Autor.

4.3.3 Softwares estatísticos modelos regionais (RegCM3, HadRM3)

O coeficiente de determinação R^2 é uma medida estatística que indica o grau de ajuste de um modelo com relação aos dados observados. No contexto da comparação entre os dados interpolados pelo Climate Research Unit (CRU) e os dados observados pelas estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a precipitação, o R^2 pode ser calculado para avaliar o quão bem os dados interpolados correspondem aos dados realmente observados.

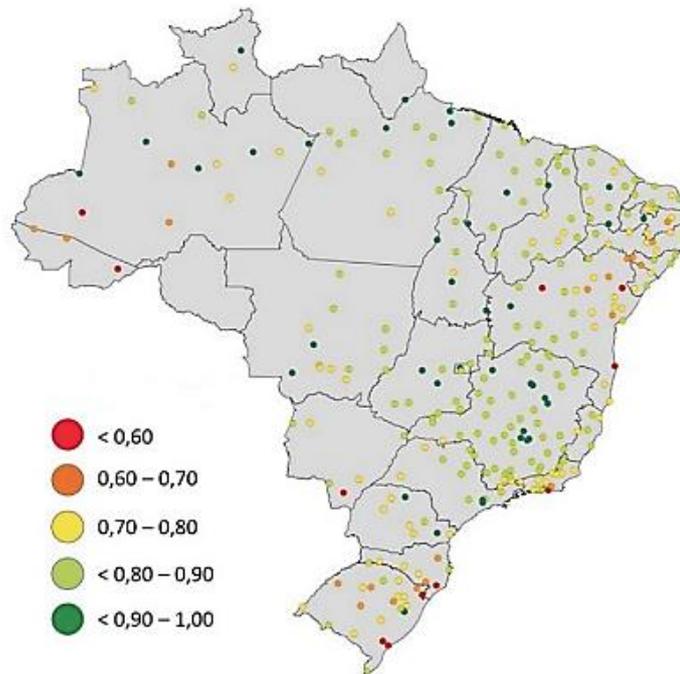
Os dados do CRU apresentaram boa correlação com os dados do INMET. O coeficiente de determinação médio (R^2) para todas as estações foi de 0,81 com um desvio padrão de 0,09 para precipitação (Figura 34) e 0,88 com desvio padrão de 0,11 para temperatura média. Isto garante a consistência dos dados interpolados pela CRU, tornando-os utilizáveis para análise de tendências no Brasil (SALVIANO, GROppo e PELLEGRINO, 2016). Essa é uma maneira comum de se avaliar a precisão dos dados interpolados em relação aos dados observados e pode servir para se entender a confiabilidade das estimativas fornecidas pelo CRU em comparação com as observações do INMET.

As mudanças projetadas na precipitação média anual para o período de 2071-2100 em relação ao período de referência de 1971-2011 podem variar dependendo da região e das condições climáticas específicas. No entanto, no cenário A2 de alta emissão de gases de efeito estufa (pessimista), espera-se que haja uma tendência geral de aumento ou diminuição da precipitação em diferentes partes do mundo.

Na Figura 36 podemos observar as mudanças projetadas na precipitação média anual em porcentagem para o período de 2071-2100 no cenário A2 de alta emissão de gases do efeito estufa (pessimista). Agora na Figura 37 podemos conferir o cenário B2 com baixa emissão de gases para a América do Sul.

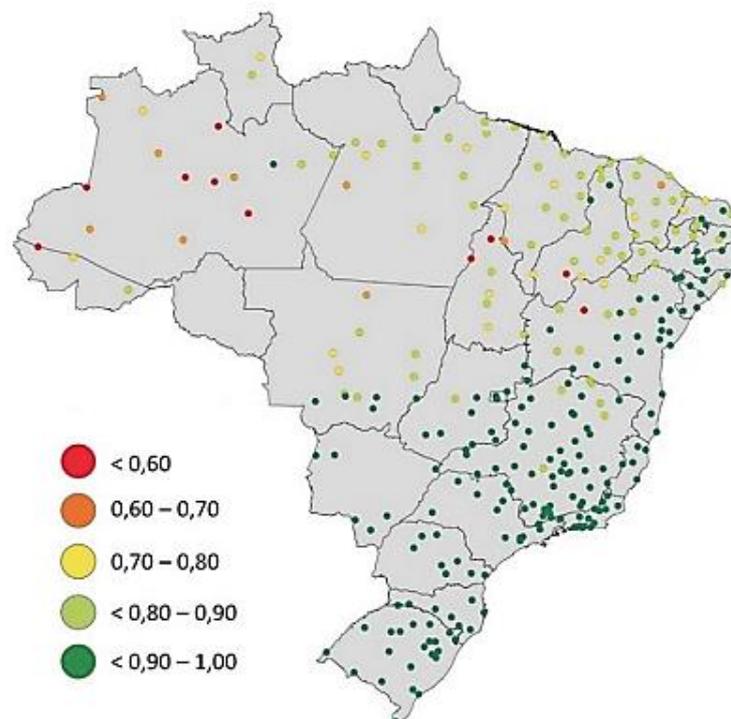
Para as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, mesmo que não haja aumentos das chuvas ou mesmo haja uma diminuição dos totais pluviométricos anuais, as precipitações podem ser individualmente mais intensas, com possibilidade de tempestades mais frequentes e ondas de calor mais intensas. Mais detalhes sobre mudanças nos extremos podem ser encontrados no Relatório 5 (MARENGO et al. 2007).

Figura 34 - Mapa do coeficiente de determinação (R2) dos dados interpolados pelo CRU com os dados observados pelas estações do INMET para a Precipitação



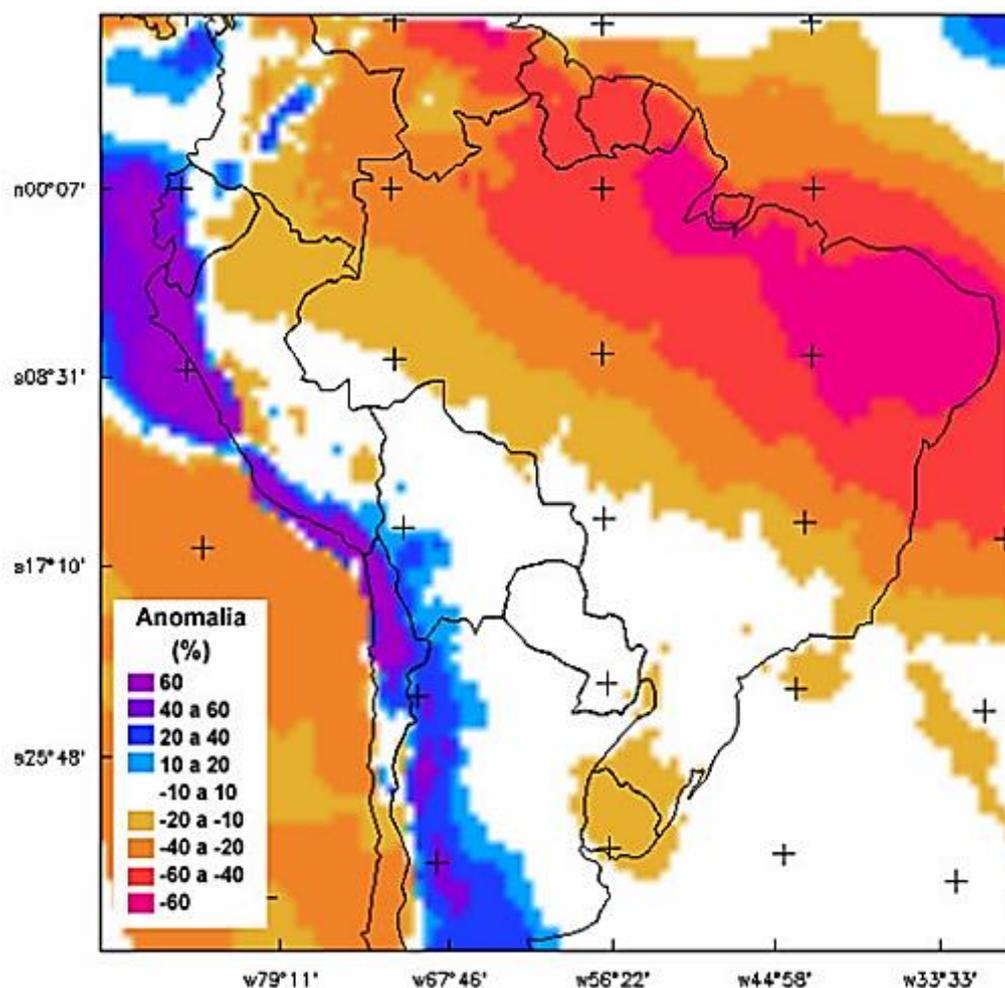
Fonte: Salviano, Groppo e Pellegrino, 2016.

Figura 35 - Mapa do coeficiente de determinação (R2) dos dados interpolados pelo CRU com os dados observados pelas estações do INMET para a temperatura média



Fonte: Salviano, Groppo e Pellegrino, 2016.

Figura 36 Mudanças projetadas na precipitação média anual (%) para o período de 2071-2100 (em relação às médias de 1961-2011) no cenário A2 (alta emissão)



Fonte: Adaptado do Relatório 4 - Salati et al. (2007).

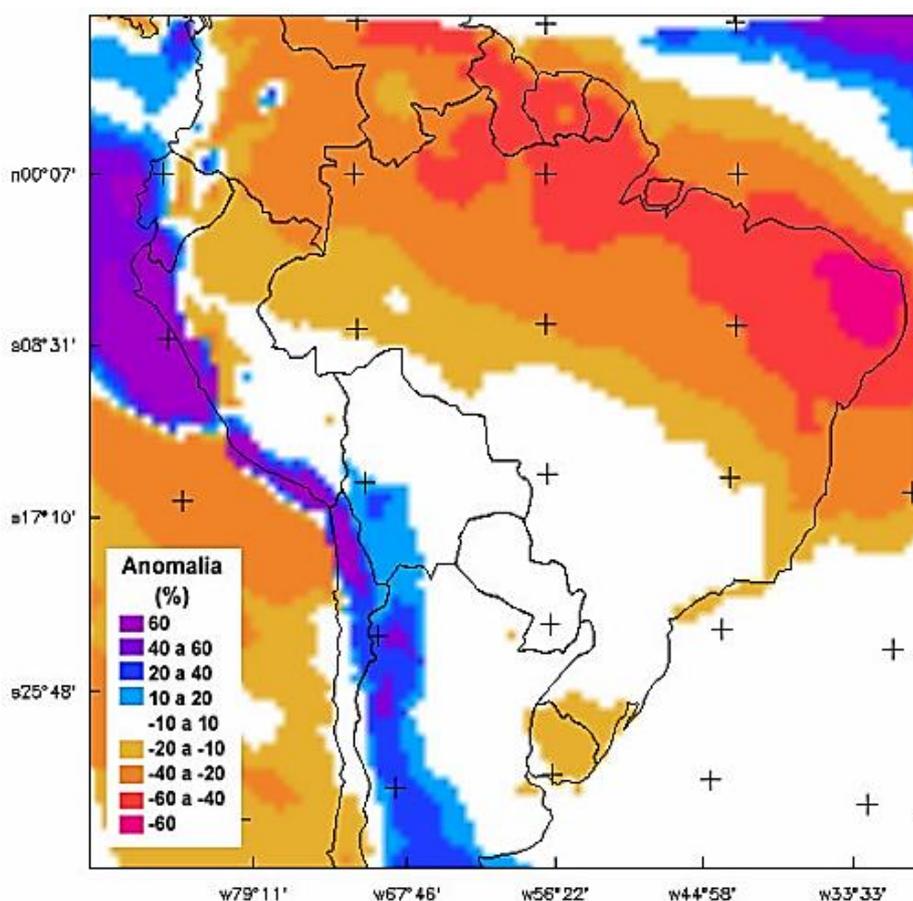
Segue abaixo algumas possíveis projeções:

Regiões Tropicais e Equatoriais: espera-se que muitas regiões tropicais e equatoriais experimentem um aumento na precipitação média anual nos próximos anos, devido ao aumento da evaporação e da umidade atmosférica em um clima mais quente. Isso pode levar a um aumento das chuvas intensas e eventos extremos de precipitação, aumentando o risco de inundações e deslizamentos de terra (PERES e MAIER, 2018).

Regiões Subtropicais e Áreas de Alta Pressão: em algumas áreas subtropicais e regiões dominadas por áreas de alta pressão, pode ocorrer uma diminuição na precipitação média anual. Isso pode resultar em condições de seca mais frequentes e prolongadas, afetando negativamente a agricultura, a disponibilidade de água e os ecossistemas locais (THOMPSON, 1993).

Variações Regionais: as projeções específicas para diferentes regiões podem variar amplamente e dependem de fatores como localização geográfica, circulação atmosférica, topografia e padrões climáticos locais. Algumas áreas podem experimentar mudanças mais significativas na precipitação do que em outras, com variações sazonais e interanuais adicionais.

Figura 37 - Mudanças projetadas na precipitação média anual (%) para o período de 2071-2100 (em relação às médias de 1961-2011) no cenário B2 (alta emissão)

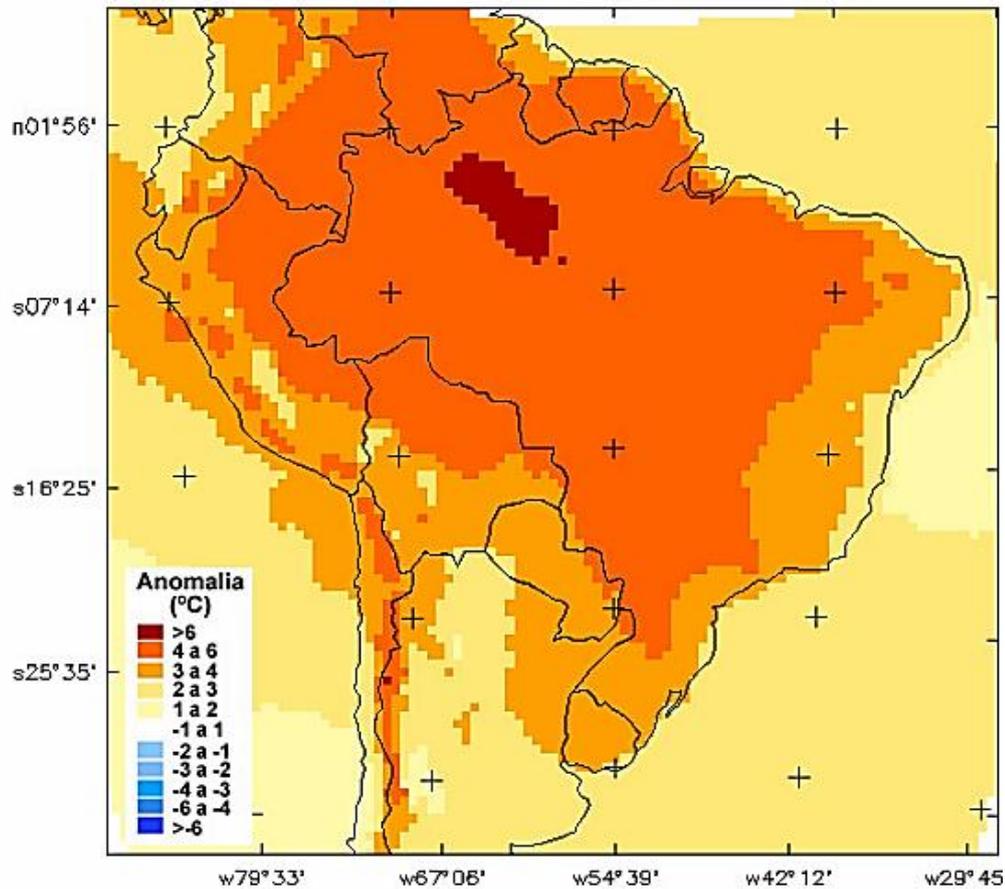


Fonte: Adaptado do Relatório 4 - Salati et al. (2007).

As projeções de temperatura para a região amazônica durante o período de 2071 a 2100 são altamente dependentes das suposições feitas sobre as emissões futuras dos gases de efeito estufa e das políticas de mitigação do clima. Os cenários A2 e B2 mencionados anteriormente são parte dos cenários de emissões do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

Na Figura 38 pode-se observar as mudanças projetadas para a temperatura média anual em °C para o período de 2071-2010 no cenário A2 (pessimista) e na Figura 39 observa-se as mesmas características, porém no cenário B2 também para a América do Sul.

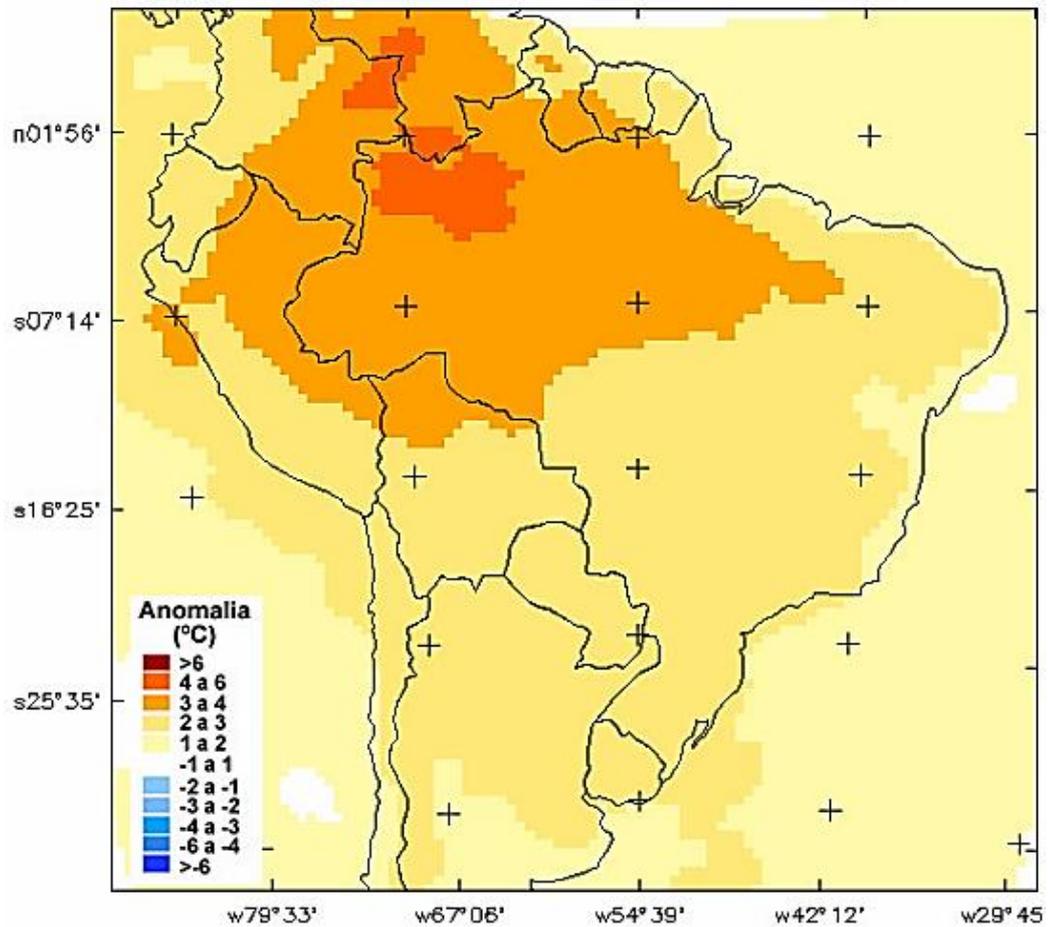
Figura 38 - Mudanças projetadas na temperatura média anual (°C) para o período de 2071-2100 (em relação às médias de 1961-2011) no cenário A2 (alta emissão)



Fonte: Adaptado do Relatório 4 - Salati et al. (2007).

As projeções de temperatura para a região amazônica variam significativamente de acordo com esses diferentes cenários. No cenário pessimista A2, a temperatura média projetada é de 4 a 8 °C mais alta em comparação com os níveis pré-industriais. Enquanto isso, no cenário otimista B2, a projeção é de um aumento de temperatura menor, de 3 a 5 °C (Figura 39). É importante ressaltar que essas projeções são apenas estimativas baseadas em modelos climáticos e estão sujeitas a incertezas. Além disso, as variações espaciais podem resultar em diferentes impactos para diferentes partes da região amazônica. Por exemplo, áreas mais próximas do equador podem experimentar aumentos de temperatura mais extremos em comparação com áreas mais distantes.

Figura 39 - Mudanças projetadas na temperatura média anual (°C) para o período de 2071-2100 (em relação às médias de 1961-2011) no cenário B2 (baixa emissão)



Fonte: Adaptado do Relatório 4 - Salati et al. (2007).

As projeções de aumento de temperatura para diferentes regiões do Brasil variam de acordo com os diferentes cenários de emissões de gases de efeito estufa. Aqui está um resumo das projeções para cada região, conforme mencionado:

Norte e Nordeste:

- Cenário A2: aumento de temperatura de até 8 °C.
- Cenário B2: aumento de temperatura de 3-5 °C.

Centro-Oeste e Sudeste:

- Cenário A2: aumento de temperatura de 4-6 °C.
- Cenário B2: aumento de temperatura de 2-3 °C.

Sul:

- Cenário A2: aumento de temperatura de 3-4 °C.
- Cenário B2: aumento de temperatura de 2-3 °C.

Essas projeções destacam a importância de se considerar diferentes cenários de emissões ao avaliar-se os impactos das mudanças climáticas em diferentes regiões. O aquecimento projetado pode ter consequências significativas para o clima, o meio ambiente, a agricultura, a segurança alimentar, a saúde pública e outros aspectos da vida humana e dos ecossistemas. Essas projeções por meio dos softwares foram condizentes com a outra metodologia utilizada para projeções, onde as estimativas de aumento de temperatura foram extremamente parecidas para daqui a 100 anos.

É fundamental tomar medidas cabíveis para mitigar-se as mudanças climáticas e adaptar-se aos seus efeitos. Isso inclui uma redução das emissões dos gases de efeito estufa, a promoção de práticas agrícolas sustentáveis, o desenvolvimento de infraestrutura resiliente ao clima e o fortalecimento da capacidade de resposta a eventos climáticos extremos.

4.4 PROJEÇÕES FUTURAS PARA OS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

4.4.1 Mudanças na temperatura ambiente

Considerando os resultados encontrados nesta tese relacionados aos aumentos de temperatura vê-se claramente que podem impactar diretamente a eficiência e o rendimento dos sistemas fotovoltaicos atuais. Em contrapartida, os avanços tecnológicos na fabricação de placas fotovoltaicas permitem que as novas gerações de painéis solares sejam mais eficientes e potentes para uma mesma área quadrada. Esses avanços tecnológicos podem ajudar a compensar as perdas de eficiência causadas pelo aumento da temperatura. Aqui estão algumas maneiras com as quais isso pode acontecer:

Maior Eficiência das Células Fotovoltaicas: as células PVs mais recentes são projetadas para terem uma eficiência de conversão de energia solar em eletricidade mais alta do que as gerações anteriores. Isso significa que, mesmo com temperaturas mais altas, essas células PVs podem produzir mais energia elétrica para uma mesma quantidade de radiação solar incidente;

Tecnologias de Resfriamento: alguns fabricantes estão desenvolvendo tecnologias de resfriamento para painéis solares, entre as quais sistemas de refrigeração ou ventilação. Esses

sistemas ajudam a manter as células PVs em temperaturas mais baixas, o que pode melhorar sua eficiência e prolongar sua vida útil (SANTANDREA, 2019);

Inovações em Materiais: novos materiais e designs estão sendo desenvolvidos para melhorar o desempenho dos painéis solares em uma variedade de condições climáticas. Isso inclui materiais que são mais resistentes ao calor e à degradação causada pela exposição ao sol (GARDONE, 2019);

Melhorias no Design e na Engenharia: as empresas estão continuamente refinando o design e a engenharia dos painéis solares para maximizar sua eficiência e durabilidade. Isso inclui otimizar o layout das células PVs, melhorar os revestimentos antirreflexos e aumentar a resistência dos materiais estruturais.

Portanto, embora os aumentos de temperatura possam representar um desafio para os sistemas fotovoltaicos, os avanços contínuos na tecnologia estão ajudando a garantir que os painéis solares tenham a capacidade de operar de forma eficiente e confiável, mesmo em condições climáticas adversas.

4.4.1.1 Tecnologias de resfriamento para placas fotovoltaicas

Existem várias tecnologias de resfriamento disponíveis para placas fotovoltaicas, que visam aumentar sua eficiência e prolongar sua vida útil, especialmente em ambientes onde as temperaturas são elevadas. Aqui estão algumas das tecnologias mais comuns:

Resfriamento por água: Neste método, água é circulada através de canais, tubos ou diretamente sobre a placa às células fotovoltaicas para remover o calor gerado durante a operação. O sistema pode ser ativo, com bombas para circular a água, ou passivo, aproveitando a convecção natural para o movimento da água (JURINIC et al. 2022).

Resfriamento por ar: Este método utiliza ventilação ou convecção natural para dissipar o calor das células fotovoltaicas. Ventiladores ou diferenças de pressão são usados para induzir o movimento do ar e remover o calor das superfícies das células (TEO, LEE e HAWLADER 2012).

Resfriamento por fase de mudança: Neste método, materiais de mudança de fase (PCM) são incorporados ao sistema para absorver e armazenar o calor gerado pelas células fotovoltaicas. Quando atingem sua temperatura de mudança de fase, esses materiais absorvem grandes quantidades de calor, ajudando a manter as células em temperaturas mais baixas (BELLINI, 2020).

Resfriamento por aerogel: Aerogéis são materiais porosos e leves com excelentes propriedades de isolamento térmico. Eles podem ser usados para encapsular as células fotovoltaicas, reduzindo a transferência de calor para o ambiente circundante (ZHAO et al. 2019).

Cada tecnologia tem suas vantagens e desvantagens em termos de eficácia, custo, complexidade de instalação e manutenção. A escolha da tecnologia de resfriamento adequada depende das condições específicas do local, do orçamento disponível e dos objetivos de eficiência energética.

4.4.1.2 Eficiência dos módulos fotovoltaicos

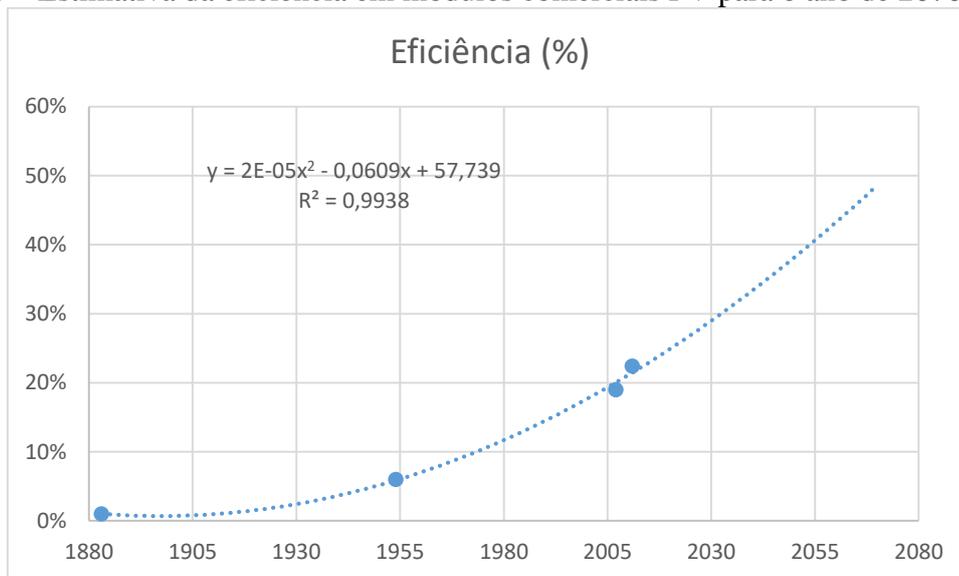
O conhecimento do efeito fotovoltaico remonta ao século XIX, quando em 1839 Becquerel demonstrou a possibilidade de conversão da radiação luminosa em energia elétrica mediante a incidência de luz em um eletrodo mergulhado em uma solução de eletrólito. Esse mesmo efeito é observado num sólido, o selênio, em 1877 por Adams e Day na Inglaterra. Em 1883 aparece a primeira célula solar produzida com selênio, com eficiência de conversão de aproximadamente 1% (GEPEA, 2012).

Já neste século, na década de 30, os trabalhos de diversos pioneiros da física do estado sólido, como Lange, Grondahl e Schottkl, apresentaram importantes contribuições para se obter uma clara compreensão do efeito fotovoltaico em junção do estado sólido. Em 1941, Ohl obtém a primeira fotocélula de silício monocristalino. No ano de 1949, Billing e Plessnar medem a eficiência de fotocélulas de silício cristalino, ao mesmo tempo em que a teoria da junção P-N de Shockely é divulgada. É, porém, apenas em 1954 que surge a fotocélula de silício com as características semelhantes às encontradas hoje com eficiência de 6% (GEPEA, 2012).

No ano de 2007 as células solares de silício com metalização frontal serigrafada apresentam eficiência superior a 19% (SCHULTZ et al. 2007) e em 2011 os painéis solares da SunPower receberam o certificado do Guinness como os primeiros módulos fotovoltaicos disponíveis comercialmente a atingir eficiências superiores a 20% (SHAHAN, 2011).

Seguindo essa progressão do avanço das tecnologias e as eficiências em módulos comerciais PV podemos estimar uma eficiência para o ano de 2070, conforme mostra a Figura 40, através de uma linha de tendencia polinomial de ordem 2. Resultando nas estimativas de eficiências próximas de 50%.

Figura 40 – Estimativa da eficiência em módulos comerciais PV para o ano de 2070



Fonte: Autor.

4.4.2 Mudança na Irradiação solar

As alterações na irradiação solar podem ter um impacto direto na eficiência e no rendimento dos sistemas fotovoltaicos atuais. Como a irradiação solar é a fonte primária de energia para os sistemas fotovoltaicos, qualquer mudança em sua intensidade ou disponibilidade pode afetar sua capacidade para gerar eletricidade. Aqui estão alguns aspectos a serem considerados:

Variações na Intensidade da Irradiação Solar: mudanças nas condições atmosféricas, como nuvens, poluição ou variações na atividade solar, podem afetar a quantidade de radiação solar que atinge os painéis solares. Se a irradiação solar diminuir, a produção de energia dos sistemas fotovoltaicos pode ser reduzida proporcionalmente;

Impacto na Eficiência das Células Fotovoltaicas: a eficiência das células PVs pode ser afetada pela intensidade da radiação solar. Em geral, uma maior intensidade de luz solar resulta em uma maior produção de eletricidade. No entanto, em condições de luz solar extrema, como em regiões muito ensolaradas, as células fotovoltaicas podem sofrer uma degradação prematura devido ao estresse térmico, o que pode reduzir a sua eficiência ao longo do tempo.

Considerações Geográficas: as mudanças na irradiação solar podem variar de acordo com a localização geográfica dos sistemas fotovoltaicos. Por exemplo, regiões mais próximas do equador tendem a receber mais radiação solar ao longo do ano, enquanto as regiões mais distantes do equador podem experimentar variações sazonais mais pronunciadas na irradiação solar;

Adaptação Tecnológica: as empresas de energia solar estão constantemente desenvolvendo novas tecnologias e técnicas para maximizar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos em diferentes condições de irradiação solar. Isso pode incluir o desenvolvimento de sistemas de rastreamento solar, ajustáveis para seguir o movimento do sol e maximizar a captura de radiação solar ao longo do dia.

Com o que se viu acima, as alterações na irradiação solar podem ter implicações significativas na eficiência e no rendimento dos sistemas fotovoltaicos. É importante considerar esses fatores ao se projetar, instalar e operar sistemas fotovoltaicos, especialmente em um contexto de mudanças climáticas e de variabilidade ambiental. A compreensão desses desafios pode ajudar a informar políticas e práticas que promovam a sustentabilidade e resiliência dos sistemas fotovoltaicos em todo o mundo.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES FINAIS

Com base nas análises realizadas nesta tese foi possível obter o número de horas de insolação e os coeficientes da equação de Ångström-Prèscott para cada estado do Brasil. Esses resultados podem auxiliar trabalhos futuros sobre a conversão de insolação em irradiação solar, aumentando a confiabilidade dos estudos relacionados e dos resultados desta mesma equação que ainda podem ser estendidos mundialmente.

Nestes estudos foi possível verificar a existência de um ciclo solar de aproximadamente 60 a 70 anos utilizando as médias anuais de irradiância de cada estado, que se justificam com os ciclos conhecidos como Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) de 50 a 70 anos, Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) de 50 a 90 anos e Ciclo Inferior de Gleissberg com aproximadamente 88 anos. Com a média mensal de irradiância solar foi possível encontrar um ciclo de menor duração de variaram de 18 a 25 anos entre os estados, combinando com o ciclo de Hale (± 22 anos). A presença desses ciclos sugere que há padrões periódicos na radiação solar recebida em diferentes regiões do Brasil ao longo do tempo. Esses padrões podem ser influenciados por uma variedade de fatores climáticos e solares, incluindo as variações na atividade solar, mudanças nos padrões de circulação atmosférica e oceânica e outros fenômenos climáticos de longo prazo.

Observa-se nos resultados desta tese que as variações na irradiação solar média anual ao longo dos ciclos estudados variam em aproximadamente 50 W/m^2 e a irradiância solar média mensal foi de aproximadamente 300 W/m^2 . Estes resultados e dados contribuem para melhorar a informação relativa aos ciclos solares conhecidos, uma vez que a grande maioria se baseia apenas em manchas solares, anéis de crescimento de árvores, geleiras, corais, entre outros. Os dados das estações meteorológicas, apesar de serem mais recentes se comparados aos de outras fontes, são mais precisos e podem contribuir para uma melhor previsão futura da geração fotovoltaica.

Adicionalmente, esta tese fez uma previsão de variação na eficiência dos sistemas fotovoltaicos residenciais existentes no Brasil considerando as temperaturas médias de cada ambiente regional. Apresentaram-se projeções de climas futuros com seus respectivos impactos na geração de energia elétrica. Para isto, levaram-se em conta as mudanças nas temperaturas médias anuais afetando o potencial de geração dos sistemas fotovoltaicos residenciais do Brasil

causados pelas mudanças climáticas, com a possibilidade de os resultados serem expandidos mundialmente pela extensão da área territorial aqui estudada. Demonstra-se ainda que cada estado do Brasil será impactado de uma forma diferente, o que resulta numa eficiência maior ou menor da geração fotovoltaica. Constatou-se que as fontes PV que já sofriam grandes perdas de eficiência em relação às temperaturas, vão aumentar gradativamente ainda mais ao longo dos próximos anos. Mesmo assim, todas essas mudanças climáticas mostram que elas não têm grandes impactos totais nos sistemas fotovoltaicos e que estes podem ser utilizados sem medo, mesmo daqui a 100 anos.

O clima desempenha um papel fundamental na determinação da eficiência e na previsão de diversas fontes de geração de energia elétrica. Com a crescente necessidade de diversificação da matriz energética e da adoção de fontes renováveis, compreender as nuances climáticas e suas implicações tornam-se essenciais para um melhor planejamento energético sustentável.

Conclui-se por fim que o cenário futuro da geração fotovoltaica em relação à irradiação solar incidente será vantajoso por alguns anos, corroborando ainda mais a ideia de que se trata de uma fonte sustentável. Embora a radiação disponível continue a ser influenciada ao longo dos anos pelos diversos ciclos solares, tais variações não comprometerão significativamente a geração fotovoltaica, a qual é uma fonte muito promissora no Brasil. Para trabalhos futuros, pode-se detalhar as mudanças ocorridas em cada estado brasileiro e tentar encontrar algum padrão em relação aos ciclos solares de cada localidade que possa ser impactado pelo clima da região, além dos ciclos solares.

5.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

- 1) Aferição das previsões feitas por estudos dos ciclos de radiação solar, visando conhecer os momentos de máxima ou mínima produção no potencial de cada ciclo e sua influência nas mensurações e variações climáticas a serem usadas nas projeções de geração de energia elétrica;

- 2) Reunião de informações de todos os sistemas fotovoltaicos residenciais instalados no Brasil até junho de 2022, maximizando a compreensão dos impactos das mudanças climáticas nos sistemas fotovoltaicos;

- 3) Estabelecimento dos coeficientes empíricos da equação de Ångström-Prèscott para todos os estados brasileiros. Essa análise proporciona uma valiosa contribuição para a comunidade científica e para os profissionais envolvidos no setor de energia solar no Brasil e

no mundo, permitindo estimativas mais precisas da irradiação solar e de uma melhor implementação dos sistemas fotovoltaicos.

4) Reunião de dados de irradiação solar de vários anos atrás para todo os estados do Brasil, algo inexistente na literatura. Isto demonstra que esses valores não são sempre iguais para serem considerados uma média geral, e sim sofrem alterações como um ciclo ao longo dos anos.

5) Corroboração com as previsões sobre o aquecimento global, evidenciando um crescimento exponencial para as temperaturas ao longo dos anos e projeções de igual ou superior perspectiva.

6) Elaboração de dados de grande importância sobre a distribuição territorial das instalações fotovoltaicas no Brasil, o que pode contribuir para identificar déficits de atendimento em determinados estados onde a quantidade dos sistemas é reduzida e assim necessitando de maiores investimos no setor energético.

7) Elucidação de informações importantes sobre as implantações de novos sistemas fotovoltaicos, demonstrando que é estes são sistemas vantajosos e de grande crescimento mundial.

5.2 SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE E TRABALHOS FUTUROS

- Analisar por que em alguns estados os ciclos de irradiância solar encontrados tem uma amplitude diferente e o que no clima de cada região pode interferir nesses resultados;

- Calcular as perdas financeiras relacionadas com os aumentos de temperatura para até 100 anos de geração fotovoltaica;

- Pesquisar novas tecnologias para compensar o aquecimento global nos sistemas fotovoltaicos;

- Comparar as perdas estimadas com as perdas reais em sistemas fotovoltaicos de cada estado.

- Analisar e projetar a temperatura máxima de cada estado, o que pode resultar em temperaturas excedentes ao limite dos equipamentos PV, vindos a danificá-los.

5.3 PUBLICAÇÕES

Os seguintes artigos foram publicados em revistas durante o período de desenvolvimento do doutorado:

JURINIC F. & FARRET F. A. Análise da Previsão das Mudanças Climáticas e seus Impactos em Sistemas Fotovoltaicos. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**. V. 20, n. 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02340-9>.

JURINIC, F., & FARRET, F. A. Climate Change and its Impacts on Photovoltaic Systems in each State of Brazil. **Electronic Journal Environmental Forum of Alta Paulista**, 20(1), 2024. <https://doi.org/10.17271/1980082720120244227>.

JURINIC, F., & FARRET, F. A. IMPACT OF SOLAR CYCLES ON PHOTOVOLTAIC GENERATION. **Electrical Engineering**, 2024. DOI: 10.1007/s00202-024-02340-9

Participação e apresentação em congresso:

F. Jurinic e F. A. Farret. Ciclos Solares e suas Influências na Geração Fotovoltaica. VII Congresso de Ciência, Tecnologia e Conhecimento. Univates, Lajeado /RS, 2023.

Trabalhos submetidos esperando aprovação:

JURINIC F.; FARRET F. A; JURINIC C. K. Ensino Didático com Aplicação da Neurociência Educacional sobre Energias Fotovoltaicas e os Impactos do Aumento das Temperaturas.

JURINIC F. & FARRET F. A. Avanços na Eficiência Energética para a Neutralidade das Emissões de Carbono: Uma Revisão Sistemática da Literatura.

JURINIC F. & FARRET F. A. Gestão de Projetos na Implantação de Sistema Fotovoltaicos Residenciais.

Trabalhos sendo finalizados para submissão:

JURINIC F. & FARRET F. A. Impacto Financeiro das Mudanças Climáticas em Sistemas Fotovoltaicos

REFERÊNCIAS

ABREU J.A., BEER J., FERRIZ-MAS A. Past and future solar activity from cosmogenic radionuclides. 2010 In: Cranmer S.R., Hoeksema J.T., Kohl J.L. (eds.). *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 428: SOHO-23: understanding a peculiar solar minimum. Proceedings of a workshop held 21-25 September 2009 in Northeast Harbor, Maine, USA.* San Francisco: Astronomical Society of the Pacific. v.428, p. 287-295, 2010 [ISBN: 978-1-58381-736-0]. URL: <<http://adsabs.harvard.edu/full/2010ASPC..428..287A>>. Acesso: 23.04.2022.

ABSOLAR. Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil e no mundo. **Infográfico ABSOLAR**, 13 set. 2023, nº59. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>

AHMADALIPOUR A, Moradkhani H, Demirel MC., A comparative assessment of projected meteorological and hydrological droughts: elucidating the role of temperature. *J Hydrol* 553:785–797. 2017.

AKHSASSI M.; EL FATHI, A.; ERRAISSI, N.; AARICH, N.; BENNOUNA, A.; RAOUFI, M.; OUTZOURHIT, A., Experimental Investigation and Modeling of the Thermal Behavior of a Solar PV Module, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56.* Rome, Italy. 1998. 300 p.

AL-WAELI A. H.; SOPIAN K.; KAZEM H. A.; CHAICHAN M. T. Photovoltaic Solar Thermal (PV/T) Collectors Past, Present and Future: A Review. **International Journal of Applied Engineering**. V. 11, N. 22 pp. 10757-10765, 2016.

ANDRADE, R. C. de., Estudo do Efeito Lente Produzido por Nuvens na Irradiação Solar Global Medido No Nordeste Do Brasil. Tese de Doutorado em Ciências. UFPE. Recife, PE. 2016.

ARRL. The National Association for Amateur Radio. Paineis da NOAA/NASA concorda que o ciclo solar 25 atingirá o pico em julho de 2025. 11/12/2019. Disponível em: <http://www.arrl.org/news/noaa-nasa-panel-concurs-that-solar-cycle-25-will-peak-in-july-2025>.

BAHAIDARAH, H. et al. Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions. *Energy* Vol. 59, Pages 445-453, 2013.

BARROS, H. A., Anteprojeto de um Sistema Fotovoltaico de 12 kWp Conectado à Rede. Monografia de graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2011. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003952.pdf>> acesso 05/04/2022.

BEER J., MENDER W., STELLMACHER R., The role of the sun in climate forcing. *Quaternary Science Reviews*. 19(1-5): p. 403-415. 2000 [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0277-3791\(99\)00072-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00072-4)]

BELLINI E. Nova técnica para resfriar painéis solares. PV MAGAZINE. 2020. Disponível em: <https://www.pv-magazine-latam.com/brasil-noticias/nova-tecnica-para-resfriar-paineis-solares/>.

BELÚCIO, L.P.; SILVA, A.P.N.; SOUZA, L.R.; MOURA, G.B.A. Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.4, p.494-504, 2014.

BERLATO, M. A., Radiação Solar Global no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Agronomia Sulriogradense**, v. 7, n. 2, p. 115-131, 1971.

BEXAIRA K. P.; STRECK N. A.; CERA J. C.; PRESTES S. D. Coeficientes de Angström-Preccott para Estimar a Radiação Solar no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, 401-411, 2018.

BICHET A, HINGRAY B, EVIN G, DIEDHIOU A, KEBE CMF, Anquetin S. Potential impact of climate change on solar resource in Africa for photovoltaic energy: analyses from CORDEX-AFRICA climate experiments. *Environ Res Lett* 2019. 14:124039. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab500a>.

BLACK, T. L., The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. *Weather and Forecasting*, v. 9, p. 265-278, 1994.

BOX, G.E. and JENKINS, G.M. (1994) *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 3rd Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs.

BUENO, P.; Como as erupções vulcânicas influenciam o clima terrestre? Tempo.com. 2028. Disponível em: <<https://www.tempo.com/noticias/ciencia/como-as-erupcoes-vulcanicas-influenciam-o-clima-terrestre-.html>>.

CANTOR G. A. R. Influência dos fatores Climáticos no Desempenho de Módulos Fotovoltaicos em Regiões de Clima Tropical. Dissertação de metrado pela UFPB. 2017.

CARVALHO, D.F.; SILVA, D.G.; SOUZA, A.P.; GOMES, D.P.; ROCHA, H.S. Coeficientes da equação de Angström-Preccott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.8, p.838-844, 2011.

CHATFIELD, C. *The analysis of time series: an introduction*. ed.: CRC press, 2013.

CHENNI, R.; MAKHLOUF, M.; KERBACHE, T.; BOUZID, A. A detailed modeling method for photovoltaic cells. **Energy** 32, 1724–1730, 2007.

CHOU S. C. et al. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs, *Climate Dynamics*, v. 38, p. 635-65, 2011.

COP-26. COP26: O que se sabe e por que realmente importa? ONU News. 31 out. 2021. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2021/10/1768682>. Acesso em: 09 fev. 2022.

CORREIA M. de F.; ARAGÃO M. R S.; SOUSA A. R.; FREITAS I. T. A. de; OLIVEIRA É. E. P. de. Geração de Séries Sintéticas de Radiação Solar a Partir de Dados de Insolação Horária no Nordeste Brasileiro. IX Congresso Brasileiro de Energia Solar – Florianópolis, 2022.

COSTA-Cabral M, Coats R, Reuter J, Riverson J, Sahoo G, Schladow G et al., Climate variability and change in mountain environments: some implications for water resources and water quality in the Sierra Nevada (USA). *Clim Change* 116(1):1–14. 2013.

CPTEC - Centro de previsão de tempo e estudos climáticos. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>>.

CROOK JA, JONES LA, FORSTER PM, CROOK R., Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. *Energy Environ Sci* 2011;4:3101. <https://doi.org/10.1039/c1ee01495a>.

DAVIES, K., *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd., 580 p., 1990.

DGS. DEUTSCHE GESELLSCHAFT FUR SONNENENERGIE (DGS). *Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects, and Engineers*. 2 ed. Earthscan, 2007.

DHAGE PM, Raghuwanshi NS, Singh R, Mishra A. Development of daily temperature scenarios and their impact on paddy crop evapotranspiration in Kangsabati command area. *Theor Appl Climatol* 128(3–4):983–997. 2017.

DIAGNE, M.; DAVID, M.; LAURET, P.; BOLAND, J.; SCHMUTZ, N. Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 27, p. 65-76, 2013.

DIGGLE, P.J.; RIBEIRO JÚNIOR, P.J. *Model based geostatistics*. Caxambu: ABE, 2000. 129p.

DORNELAS, K. D. E S.; SILVA, C. L. DA; OLIVEIRA, C. A. da S. Coeficientes médios da equação de Angström-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1213- 1219, 2006.

DOS PASSOS, D.; Otto F.; Castro L. L. M. de; Roncada M. A.; Hoepers R.; Wolf J. G. B.; Eficiência energética em placas fotovoltaicas (projeto segue o sol). **Revista Maiêutica**, Indaial, ISSN: 2525-8567, V. 3, n. 01, p. 21-42, 2017.

DUBEY S.; SARVAIYA, J. N.; SESHADRI, B. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and its Effect on PV Production in the World a Review, *PV Asia Pacific Conference*, 2012.

DUPRÉ O. R. Vaillon, M.A. Green, Physics of the temperature coefficients of solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 140, 92 – 100. 2015.

ECHER, Ezequiel et al., O número de manchas solares, índice da atividade do sol. *Revista Brasileira de Ensino de Física* [online]. 2003, v. 25, n. 2 [Acessado 24 Abril 2022] , pp. 157-163. ISSN 1806-9126 Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0102-47442003000200004>>.

EDDY, J. A. The Maunder Minimum. *Science, New Series*, Vol. 192, No. 4245, p. 1189-1202, 1976. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20100216030712/http://bill.snr.arizona.edu/classes/182h/Climat e/Solar/Maunder%20Minimum.pdf#>

FARRET, F. A.; SIMÕES, M. G. Integration of Alternative Sources of Energy. Ed. IEEE, Nova Iorque, EUA, 2006.

FARRET, F.A., GODOY M. S., Renewable Sources of Energy, segunda edição, John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, EUA, 648 pp., ISBN 9781119137375, 2018.

FERREIRA A.; KUNH S. S.; FAGNANI K. C.; SOUZA T. A. de; TONEZER C.; SANTOS G. R. dos, COIMBRA-ARAÚJO C. H. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 81, Part 1, Pages 181-191, ISSN 1364-0321, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.102>.

FERREIRA, H. A. 1948 **Observações e Instrumentos Meteorológicos**, Livraria Sá da Costa, Lisboa.

FOLEY, A.; OLABI, A. G., Renewable energy technology developments, trends and policy implications that can underpin the drive for global climate change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, n. 2, p. 1112-1114, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.065>>.

FONSECA J. E. F. da; Avaliação da Degradação de Módulos Fotovoltaicos de Silício Cristalino em Sistemas Conectados à Rede Elétrica, Tese Doutorado, UFRGS. 2020.

FONTANA, D.C., OLIVEIRA, D. Relação entre radiação solar global e insolação para o Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 87-91, 1996.

FRANCISCO A. C. C.; EWBANK H.; RAMONO R. R.; ROVEDA S. R. M. M. Influência de parâmetros meteorológicos na geração de energia em painéis fotovoltaicos: um caso de estudo do Smart Campus Facens, SP, Brasil. **urbe Revista Brasileira de Gestão Urbana**. 2019. DOI: 10.1590/2175-3369.011.e20190027.

FRAUNHOFER., Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, Photovoltaic Status Report, presented Freiburg, 19 June 2018. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>.

FREIRE W. Como o clima influencia o setor fotovoltaico? CanalSolar, 2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/como-o-clima-influencia-o-setor-fotovoltaico/>.

FREITAS, Eduardo de., "Ciclo Solar de Schwaber"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilestela.uol.com.br/geografia/ciclo-solar-schwaber.htm>. Acesso em 22 de abril de 2022.

FURTADO, Pré-eletrificação rural utilizando sistemas fotovoltaicos em atendimento à legislação da ANEEL. Universidade Federal de Lavras, Pós-Graduação Lato Sensu em Formas Alternativas de Energia, 2011. Disponível em: <<http://www.solenerg.com.br/files/monografia-Jose-Mario-Furtado.pdf>>.

GANDRA A. Brasil chega a 2 milhões de sistemas de energia solar. AgênciaBrasil, 2023. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2023-06/brasil-alcanca-marca-de-2-milhoes-de-sistemas-de-energia-solar#:~:text=Do%20total%20da%20pot%C3%Aancia%20instalada,10%20GW%20de%20c>

apacidade%20instalada.

GARDONE A. C. J. DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO: Melhoria da eficiência energética em painéis fotovoltaicos através da aplicação de um sistema passivo de troca de calor. Dissertação de mestrado. UFJF, 2019.

GASPARETO S. C.; PIEDADE S. M de S.; ANGELOCCI L. R.; OZAKI V. A. Comparação entre Métodos de Imputação de Dados em Diferentes Intensidades Amostrais na Série de Precipitação Pluvial da ESALQ. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, MS, v. 29, Jul. / Dez. 2021, ISSN 2237-8642.

GEODESIGN Internacional. Conhecimento Básico Sobre O Recurso Solar. 2016. Disponível em: http://recursosolar.geodesign.com.br/Pages/Sol_Rad_Basic_RS.html

GEPEA - Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo. Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica. 2012. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf.

GHENSEV, A., **Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas**. 2006. 154 f. Monografia (Pós Graduação Lato Sensu em Fontes Alternativas de Energia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

GIORGI et al., RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. **Climate Research**, v.52, p. 7-29. 2012.

GOTTSCHALG R.; PANDER M.; TUREK M.; BAUER J.; LUKA T.; HAGENDORF C.; EBERT M. “Benchmarking Light and Elevated Temperature Induced Degradation (LETID)”, 35th EU PVSEC 2018, 24 - 28 September 2018, Brussels.

GRIMM, A. M., Meteorologia Básica - Notas de Aula. 1999. Disponível em: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-1.html>.

GUERRERO, M., El mínimo solar de gleissberg podría afectar al “calentamiento global” ¿Se acercan tiempos de frío o de calor?. **Planetaria**. Huygens nº 78, p. 18-30. 2009. Disponível em: <http://www.astrosafor.net/Huygens/2009/78/huygens-78-miguel.pdf>.

GUIMARÃES, S.O.; COSTA, A.A.; VASCONCELOS JÚNIOR, F.C.; SILVA, E.M.; SALES, D.C.; ARAÚJO JÚNIOR, L.M.; SOUZA, S.G. Projeções de mudanças climáticas sobre o Nordeste brasileiro dos modelos do CMIP5 e do CORDEX. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p.1-36, 2016.

HAEGEL N. et al., Terawatt-scale photovoltaics: Transform global energy, *Science* 364:6443, 836-838. 2019.

HAMILTON, Calvin J., Vistas do sistema solar: O Sol. 1997. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/ast/solar/portug/sun.htm>.

HAMLETT, J.M.; HORTON, R.; CRESSIE, N. A. C. Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analysis. *Soil Science Society of American Journal*, v. 50, p.868-875, 1986.

HEGERL, G. C. et al. **Understanding and Attributing Climate Change. In: Climate Change**

2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [s.l.: s.n.].

HELLO SOLAR, Cycle 25; National Weather Service. 15 de setembro de 2020. Consultado em 22 de abril de 2022.

HOYT D. V., SCHATTEN K. H.; The role of the Sun in Climate Change, Oxford University Press, New York (1997).

IEA, Market Report Series: Renewables, ISBN 978-92-64-28187-5. 2017.

INMAN, R. H., PEDRO, H. T. C.; COIMBRA, C. F. M. Solar forecasting methods for renewable energy integration. *Progress in Energy and Combustion Science*. v. 39, n. 6, p. 535-576, 2013.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **A estação meteorológica e seu observador.** Maio, 2011. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/uploads/publicacoesDigitais/aestacaometeorologicaeseuobservador.pdf>>.

INMET. BDMEP - Dados Históricos. 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>.

INPE - Instituto nacional de pesquisas espaciais. Disponível em: <<http://bancodedados.cptec.inpe.br/>>.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. “Climate Change 2014: Synthesis Report”. Core Writing Team, PACHAURI, R. K.; MEYER, Leo. (eds). Geneva: IPCC, 132 p, 2014.

IPCC: Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. 2013.

JEREZ S. et al. The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe **Nat. Commun.** 6 10014., 2015.

JURINIC, F.; FELIX J. L. P.; CASSOL F.; JURINIC C. K. Estudo para Melhoria na Performance e Eficiência de Placas Fotovoltaicas: Através de Um Sistema de Resfriamento. (2022). *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 11(2), 51-64. <https://doi.org/10.59306/rgsa.v11e2202251-64>

JURINIC F. & FARRET F. A. Análise da Previsão das Mudanças Climáticas e seus Impactos em Sistemas Fotovoltaicos. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**. V. 20, N. 1, 2024. DOI: 10.17271/1980082720120244227.

KERN A.K., HARZHAUSER M., PILLER W.E., MANDIC O., SOLIMAN A., Strong evidence for the influence of solar cycles on a Late Miocene lake system revealed by biotic and abiotic proxies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 329-330:124-136. 2012. [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.02.023>].

KIESLING, T.C. Calculation of the length of day. **Agronomy Journal**, v.74, p.758-759, 1982. DOI: 10.2134/agronj1982.00021962007400040036x.

KIVELSON M.G.; Russell C. T.; Introduction to Space Physics, Cambridge University Press, Cambridge (1995).

LACERDA, F.; NOBRE, P.; Aquecimento global: conceituação e repercussões sobre o Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**. p. 14-17, 2010. Disponível em: <<http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/08.10.18.07/doc/99-538-2-PB.pdf>>.

LAI – **Lei de acesso à informação**. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/acesso-a-informacao/servico-de-informacao-ao-cidadao/sic>. Acesso em 12 de setembro de 2022.

LEAPTON solares. Disponível em: <<https://www.leaptonenergy.gr/wp-content/uploads/2020/06/LP166-M-72-MH-420-445W.pdf>>.

LENA, B. P.; JADOSKI S. O.; JADOSKI C. J.; RIGO J. F. Coeficientes da equação de Angström-Prescott para a região de Guarapuava-PR. **Acta Iguazu**, Cascavel, v.9, n.1, p. 123-136, 2020.

LIANG X-Z.; KUNKEL K. E.; MEEHL G. A.; JONES R. G. and WANG J. X. L. Regional climate models downscaling analysis of general circulation models present climate biases propagation into future change projections **Geophys. Res. Lett.** 35 L08709, 2008.

LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O.; TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, n.2, p.1-12, 1996.

LIU Q.; JIANG Y.; JIN K.; QIN J.; XU J.; LI W.; XIONG J.; LIU J.; XIAO Z.; SUN K.; YANG S.; ZHANG X.; DING L.; 18% Efficiency organic solar cells, **Science Bulletin**, Vol. 65, n. 4, pg. 272-275, 2020, ISSN 2095-9273, <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.01.001>.

LIU, X.; XU, Y. ZHONG, X.; ZHANG, W.; PORTER, J. R.; LIU, W. Assessing models for parameters of the Angström-Prescott formula in China. **Applied Energy**, v. 96, p. 327-338, 2012.

LONGHINI, M. D.; GOMIDE, H. A., Aprendendo sobre o céu a partir do entorno: uma experiência de trabalho ao longo de um ano com alunos de ensino fundamental. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia - RELEA**, n. 18, p. 49-71, 2014.

LOURENÇO JUNIOR, O. D.; RAMONI, M. C.; MENEZES, L. C. W.; BAGNIS, D.; RAMON, L. S., Células Solares Orgânicas, a Energia que Vem dos Polímeros. **Rev. Virtual Quim.** ISSN 1984-6835, Vol. 12, No. 3, Pg. 583-597, 2020. DOI: 10.21577/1984-6835.20200046.

LUCAS, E.W.M.; RODRIGUES, J.E.; REZENDE, J.M.; ABREU, S.F.; BRAGA A.P. Comparative analysis of observed meteorological data in the conventional and surface automatic station at Brazilian National Institute of Meteorology. In: WMO TECHNICAL CONFERENCE ON METEOROLOGICAL AND ENVIRONMENTAL INSTRUMENTS AND METHODS OF OBSERVATION, Helsinki. Resumos Expandidos. Helsinki: Organização Meteorológica Mundial, 2010.

MACDOUGALL, A.; EBY, M.; WEAVER, A., If Anthropogenic CO₂ Emissions Cease, Will Atmospheric CO₂ Concentration Continue to Increase? *J. Climate*, v. 26, p. 9563–9576, 2013.

MARAFIGA, E. B., Pesquisa sobre o efeito de fenômenos solares no potencial energético solar-eólico. 290 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

MARENGO J. A. et al. Relatório 5 - Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. 2007.

MARENGO, J. A., Mudanças Climática Globais e Regionais: Avaliação do Clima Atual do Brasil e Projeções de Cenários Climáticos do Futuro. *Revista brasileira de meteorologia*, v.16, n.1, 01-08, 2001.

MARQUES, K.; PEREIRA, T.P.; ASSIS, S.V. Análise do comportamento mensal do Índice de Limpidez. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, edição XI. *Anais...*, Rio de Janeiro, 2000.

MARTIM, C. C.; ZAMADEI T.; SOUZA A. P. de. ALMEIDA F. T. de.; ZOLIN C. A. Coeficientes De Angström-Prescott e a Evapotranspiração de Referência na Transição Cerrado-Amazônia do Mato Grosso. *Revista Brasileira de Climatologia*. Ano 16. Vol. 26. 2020.

MARTIN C. C. Estimativas Simplificadas da Radiação Global na Amazônia. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 87 f. 2020.

MARTINEZ – LOZANO, J. A.; TENA, F.; ONRUBIA, J. E.; LA RUBIA, J. The historical evolution of the Ångström formula and its modifications. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 33, p. 109-128, 1984.

MATHEW, S.; YELLA, A.; GAO, P. *et al.* Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers. *Nature Chem* **6**, 242–247 (2014). <https://doi.org/10.1038/nchem.1861>

MAVROMATAKIS, F. et al. Modeling the photovoltaic potential of a site. *Renew. Energ.* **35**, 1387–1390, 2010.

MCPHADEN J. M.; ZEBIAK S. E.; GLANTZ M. H.; Enso as an integrating concept in earth science. *science*, Vol. 314(5806) p.1740-1745, 2006. <https://doi.org/10.1126/science.1132588>.

MEDEIROS, F.J.; SILVA, C.M.S.; BEZERRA, B.G. Calibration of Ångström-Prescott equation to estimate daily solar radiation on Rio Grande do Norte State, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.32, n.3, p.409-416, 2017.

MENDONCA, F. A. Aquecimento global e suas manifestações regionais e locais: Alguns indicadores da região Sul. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 2, p. 71-86, 2007.

MESINGER, F. et al. The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. *Monthly Weather Review*, v. 116, p. 1493-1518, 1988.

MICHALSKY, J. J. et al. Degradation of Solar Concentrator Performance in the Aftermath of Mount Pinatubo. **Solar Energy**, v.52, n.2, p.205-213, 1994.

MOLION L. C. B. 2006. Aquecimento Global, El Niños, Manchas Solares, Vulcões e Oscilação Decadal do Pacífico. *Revista Climanálise*. 3(1):1-5. URL: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/Artigo_Aquecimento_0805.pdf>.

MOTA F.S. da; BEIRSDORF M.I.C.; ACOSTA M.J.C.; Estimates of solar radiation in Brazil, **Agricultural Meteorology**, v. 18, Issue 4, pp. 241-254, ISSN 0002-1571, 1977.

NOAA - National oceanic and atmospheric administration. Disponível em: <<https://www.climate.gov//>>.

NÓBREGA, R.S. Tendências do controle climático oceânico sob a variabilidade temporal da precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista de Geografia Norte Grande**, n. 63, p. 1-34, (2016).

NUNES H. M.; SILVA R. P da; BUIATTI G. M.; ANDRADE R. L de; BOTELHO F. K.; NETO J. V.; VENÂNCIO V. de C.; CARVALHO R. A. S. de. Estudo Comparativo Técnico-Financeiro de Usinas Fotovoltaicas Utilizando Módulos de Silício Monocristalinos e Policristalinos. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Fortaleza, 01 a 05 de junho de 2020.

O'REGAN, B., GRÄTZEL, M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature* **353**, 737–740 (1991). <https://doi.org/10.1038/353737a0>.

ODEH, S.; BEHNIA, M. Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling. *Heat Transfer Engineering*, Volume 30, Issue 6, pp. 499-505, 2009.

OLIVEIRA M. J. de.; Carneiro C. D. R.; Vecchia F. A. S.; Baptista G. M. de M.; Ciclos climáticos e causas naturais das mudanças do clima. *Terra Didática*. v. 13. p. 149-184. 2018. 10.20396/td.v13i3.8650958.

OLIVEIRA, M.C.N.; CORRÊA-FERREIRA, B.S. PROTEÇÃO DE PLANTAS. Diagnóstico exploratório na análise de dados entomológicos: efeito do diflubenzuron no consumo alimentar de *Anticarsia gemmatilis* (Hübner). *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil*, v.27, n.4, p.627-637, 1998.

PACHECO, N. A.; BASTOS, T. X. Estimativa da radiação solar global diária em Capitão Poço, PA através da equação de Angstrom. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, XII, Foz do Iguaçu, 2002. *Anais. SBMET*, 2002, 4p.

PARK C.; SHIN S-W.; KIM G.; CHA D-H.; MIN S-K.; LEE D.; BYUN Y-H and KIM J-U. What determines future changes in photovoltaic potential over East Asia? **Renew. Energy**, 185 338–47. (2022).

PAZ P. Quanto Maior o Calor, Menor é a Produção de Energia Solar. Marcozero, 2022. Disponível em: <https://marcozero.org/quanto-maior-o-calor-menor-e-a-producao-de-energia-solar/>.

PAZINATTO M. T. Influência das Altas Temperaturas nos Painéis Fotovoltaicos. *Célulaenergia*, 2020. Disponível em: <https://celulaenergia.com/influencia-das-altas>

temperaturas-nos-paineis-fotovoltaicos/.

PBMC. Sumário Executivo do Volume 1 - Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 para o **1º Relatório de Avaliação Nacional do Painei Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Volume Especial para a Rio+20. Rio de Janeiro, Brasil, 34 p, 2012.

PELLAND, S.; REMUND, J.; KLEISSL, J.; OOZEKI, T.; DE BRABANDERE, K. Photovoltaic and solar forecasting: state of the art. IEA PVPS, Task. v. 14, p. 1-36, 2013.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>.

PERES T. e MAIER É. Precipitação na Região Tropical da América do Sul: Mudanças Climáticas no Século XX. CaderNAU- Cadernos do Núcleo de Análises Urbanas, v. 10, n. 1, 2018, p. 79-101. E-ISSN 2525-7994, ISSN 1982-2642.

PEREZ, R.; LORENZ, E.; PELLAND, S.; BEAUHARNOIS, M.; VAN KNOWE, G.; HEMKER, K.; HEINEMANN, D.; REMUND, J.; MÜLLER, S. C.; TRAUNMÜLLER, W.; STEINMAUER, G.; POZO, D.; RUIZ-ARIAS, J. A.; LARA-FANEGO, V.; RAMIREZSANTIGOSA, L.; GASTON-ROMERO, M.; POMARES, L. M. Comparison of numerical weather prediction solar irradiance forecasts in the US, Canada and Europe. Solar Energy. v. 94, p. 305-326, 2013. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.05.005>.

PIDWIRNY, M. (2006). "The Drainage Basin Concept". Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition. Date Viewed. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10aa.html>

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CRESESB, 2014. Disponível em: https://www.ambienteenergia.com.br/wp-content/uploads/2014/04/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf.

PITOMBO S. O. Influência dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña na geração de energia fotovoltaica. Tese de Doutorado pelo Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2019.

PODDAR S.; EVANS J. P.; KAY M.; PRASAD A. and BREMNER S. Estimation of future changes in photovoltaic potential in Australia due to climate change Environ. **Res. Lett.** 16 114034. 2021.

PORTAL SOLAR. Passo a Passo da Fabricação do Painei Solar. 2024. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painei-solar.html>.

RAPHAEL, Ellen et al.; CÉLULAS SOLARES DE PEROVSKITAS: UMA NOVA TECNOLOGIA EMERGENTE. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 41, n. 1, p. 61-74, Jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170127>.

RASKIN, P. et al. Global Scenarios in Historical Perspective. Cap. 2. In: Ecosystems and Human Well-being: **Scenarios**. 2005.

RIBEIRO JUNIOR, P.J. Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo. Piracicaba, 1995. 99p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de

Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

RIBEIRO, M. N. G.; SALATI, E.; NOVA, N. A. V.; DEMÉTRIO, C. G. B. Radiação solar disponível em Manaus (AM) e sua relação com a duração do brilho solar. **Acta. Amazônica**, v. 12, n. 2, p. 339-346, 1982.

ROMANO, G. Segurança Energética e Mudanças Climáticas na União Europeia. **Contexto Internacional**, v. 36, n. 1, p. 113, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-85292014000100004>>.

ROSSI, R.E. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs*, v.62, n.2, p.277-314, 1992.

ROSYID O. A. Comparative Performance Testing of Photovoltaic Modules in Tropical Climates of Indonesia. 2nd Padjadjaran International Physics Symposium 2015 (PIPS-2015). 2016. doi: 10.1063/1.4941865.

SALATI E. et al. Relatório 4 - Tendências de Variações Climáticas para o Brasil no Século XX e Balanços Hídricos para Cenários Climáticos para o Século XXI. 2007.

SALSTEIN, D. **Composition, Chemistry, and Climate of the Atmosphere**; Sigh, H. B., ed.; Van Nostrand Reinhold: U.S.A., 1995, p. 19-170.

SALVIANO M. F.; GROppo J. D. & PELLEGRINO G. Q. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 1, 64-73, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620150003>.

SANTANDREA P. M. Estudo da transferência de calor em painel fotovoltaico. TCC, Eng. Mecânica, UFRN, 2019.

SAWADOGO W et al. Current and future potential of solar and wind energy over Africa using the RegCM4 CORDEX-CORE ensemble. **Climate Dynamics**, 57 1647–72. 2021.

SAWADOGO W, ABIODUN BJ, OKOGBUE EC. Impacts of global warming on photovoltaic power generation over West Africa. **Renew Energy** 2020, 151:263–77. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.032>.

SCAFETTA, N., MILANI, F., BIANCHINI, A., ORTOLANI, S.: 2016, On the astronomical origin of the Hallstatt oscillation found in radiocarbon and climate records throughout the Holocene. *Earth-Sci. Rev.* 162, 24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.09.004>

SCHULTZ O.; METTE A.; PREU R.; GLUNZ S. W. Silicon solar cells with screen-printed front side metallization exceeding 19% efficiency. The compiled state-of-the-art of PV solar technology and deployment. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, EU PVSEC 2007.

SCHWINGSHACKL, C.; PETITTA, M.; WAGNER, J. E.; BELLUARDO, G.; MOSER, D.; CASTELLI, M.; ZEBISCH, M.; TETZLAFF, A. Wind Effect on PV Module Temperature: Analysis of Different Techniques for an Accurate Estimation, European Geosciences Union General Assembly, 2013.

SHAHAN Z. Sunpower Panels Awarded Guinness World Record. Reuters. Disponível em:

<https://www.reuters.com/article/2011/06/20/idUS110444863620110620/>

SILVA A. O. da. Coeficientes de Angström-Prescott e Sua Influência na Radiação Solar e Eto no Perímetro Irrigado de Bebedouro em Petrolina. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering** v. 8(4): 333-342, 2014.

SILVA P. da; LEITE S. E.; SILVA W. K. de M.; ABRAHÃO R.; Tendências climáticas na mesorregião da mata paraibana e sua influência na produção de energia fotovoltaica. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.15, n.27, p. 90-101, 2018. DOI: 10.18677/EnciBio_2018A118.

SILVA, A. V. R.; Nossa estrela: O Sol. Editora livraria de física. Sociedade Brasileira de Física. São Paulo, 1ª edição, 2006.

Silveira da FL (2017) O movimento anual e diário do Sol quando referido à Terra. Instituto de Física da UFRGS. Available in: https://www.researchgate.net/publication/317688383_O_movimento_anual_e_diario_do_Sol_quando_referido_a_Terra.

SOLOMON, S. et al. **Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate Change**. [s.l: s.n.].

SRES - Emissions Scenarios: A Special Report of IPCC Working Group III. **Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change**, ISBN: 92-9169-113-5, 2010.

TEO, H. G.; LEE P. S.; HAWLADER M. N. A. An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*. V. 90, p. 309-315, 2012.

THOMPSON, L.G. Reconstructing the paleo ENSO records from tropical and subtropical icecores. *Bulletin de Institut Français d'Études Andines*. v. 22, n. 1, p. 65-83, 1993.

TIBA, C. Solar radiation in the Brazilian Northeast. *Renewable Energy*, v. 22, p. 565-578, 2001. MOTA F.S. da; BEIRSDORF M.I.C.; ACOSTA M.J.C.; Estimates of solar radiation in Brazil, **Agricultural Meteorology**, Volume 18, Issue 4, P. 241-254, ISSN 0002-1571, 1977.

TRITSCHLER, A. 2009, Structure and Dynamics of Sunspots. Citado na página 36.

UNIVERSITY OF EAST ANGLIA CLIMATIC RESEARCH UNIT (CRU). [Phil Jones, Ian Harris]. CRU Time Series (TS) high resolution gridded data version 3.20, [Internet]. NCAS British Atmospheric Data Centre, 2013. Disponível em janeiro de 2024 em: <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/2949a8a25b375c9e323c53f6b6cb2a3a>.

USGS. 2000. The Sun and Climate. U.S. Geological Survey. Fact Sheet 0095-00. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/fs/fs-0095-00/fs-0095-00.pdf>>. Acesso: 23.04.2022.

VAREJÃO – SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**, Recife, 2006. Versão digital 2. Disponível em: http://www.agritempo.gov.br/tmp/Meteorologia_Climatologia.pdf

VIANELLO, R. L.; A. R. ALVES. *Meteorologia Básica e Aplicações*. 3 ed. Viçosa: Editora UFV, 2004. 449p.

VIEIRA L. M. Mudanças climáticas e o impacto em projetos fotovoltaicos. Canal Solar, 2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/mudancas-climaticas-e-o-impacto-em-projetos-fotovoltaicos/>.

VILLALVA M. Efeito da temperatura nos módulos fotovoltaicos mono e policristalinos. CanalSolar, 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/efeito-da-temperatura-nos-modulos-fotovoltaicos-mono-e-policristalinos/>.

Vorontsov-Vel'iaminov, B. A. *Astronomical Problems: an introductory course in astronomy*. Pergamon Press. New York. 1969.

VOYANT, C.; NOTTON, G.; KALOGIROU, S.; NIVET, M.-L.; PAOLI, C.; MOTTE, F.; FOUILLOY, A. Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review. *Renewable Energy*. v. 105, p. 569-582, 2017.

WEATHERLY JW, Rosenbaum MA. Future projections of heat and fire-risk indices for the contiguous United States. *J Appl Meteorol Climatol* 56(4):863–876. 2017.

WILBY RL, Dawson CW, Barrow EM. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environ Model Softw* 17(2):145–157. 2002.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models, *Physical Geography*, 2, p.184-194, 1981.

WMO. Atmospheric RCMs: A multipurpose tool? Report of the joint WGNE/WGCM ad hoc panel on Regional. **Climate Modelling**, Geneva, Switzerland, 2002.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Measurement of radiation. Guide to meteorological instruments and methods of observation**. 5 ed 1983, Geneva.

WU J.; HAN Z.; YAN Y. and GAO X. Future projection of solar energy over China based on multi-regional climate model simulations. **Earth Space Sci**. 9 e2021EA002207, 2022.

YAMASOE M. A. **Apostila da Disciplina Meteorologia Física II**. São Paulo: USP/IAG, 2006, 88p.

ZHAO L., BHATIA B.; YANG S.; STROBACH E.; WEINSTEIN L. A.; COOPER T. A.; CHEN G.; WANG E. N. Harnessing Heat Beyond 200 °C from Unconcentrated Sunlight with Nonevacuated Transparent Aerogels. *ACS NANO*, V.13, p. 7508-7516, 2019. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b02976>

YOU Q. L. et al. Recent frontiers of climate changes in East Asia at global warming of 1.5°C and 2 °C. *NPJ, Clim. Atmos. Sci*. 5 80, 2022.

ZUFFO, A. C.; O Sol, o motor das variabilidades climáticas. **DAE**. 2015. DOI: 10.4322/dae.2014.142