



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**POTENCIAL ATUAL E FUTURO DA ENERGIA
SOLAR NO BRASIL USANDO OS MODELOS
GLOBAIS DO CMIP6**

Cláudio Ferreira

Itajubá, MG, Brasil

2023

POTENCIAL ATUAL E FUTURO DA ENERGIA SOLAR NO BRASIL USANDO OS MODELOS GLOBAIS DO CMIP6

por

Cláudio Ferreira

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas.

Orientadora: Dra. Michelle Simões Reboita

**Itajubá, MG, Brasil
2023**

Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

POTENCIAL ATUAL E FUTURO DA ENERGIA SOLAR NO BRASIL
USANDO OS MODELOS GLOBAIS DO CMIP6

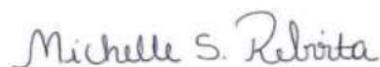
elaborada por

Cláudio Ferreira

Como requisito parcial para a obtenção do grau de

Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:

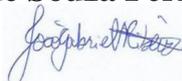


Michelle Simões Reboita, Dr^a. (UNIFEI)

(Presidente/Orientador)



Glauber Willian de Souza Ferreira, Msc. (UNIFEI)



João Gabriel Martins Ribeiro, Msc. (UNIFEI)

Itajubá, 31 de outubro de 2023.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo, pois nada do que Ele me dá é oferecido sem o propósito do bem.

Agradeço à minha professora orientadora, Dra. Michelle Simões Reboita, cuja sabedoria, paciência e comprometimento foram fundamentais para me guiar durante todo o processo de pesquisa e elaboração desta monografia. Suas valiosas contribuições foram essenciais para o desenvolvimento do trabalho e para o meu crescimento no tema da pesquisa.

Agradeço também aos demais professores do Curso de Ciências Atmosféricas que, ao longo de toda a graduação, compartilharam seus conhecimentos e experiências, tornando possível a construção de uma base sólida de aprendizado.

Agradeço imensamente ao colega João Gabriel Martins Ribeiro pela ajuda na preparação dos dados necessários para o desenvolvimento da monografia.

Minha gratidão também se estende aos meus colegas de classe com quem compartilhei tantas experiências ao longo desses anos. O apoio mútuo e o companheirismo foram fundamentais para superarmos os desafios e alcançarmos nossos objetivos acadêmicos.

Não posso deixar de agradecer à minha esposa Maria do Carmo, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo incentivo e compreensão em todos os momentos. Seu amor e apoio incondicionais foram a força motriz que me impulsionou a seguir em frente, mesmo diante das dificuldades.

Agradeço a todos os profissionais e funcionários da Unifei, cujo trabalho nos bastidores contribuiu para que tivéssemos um ambiente propício ao aprendizado e à realização de todo curso.

A todos, mesmo a alguns que não mencionei aqui, muito obrigado.

(dedicatória)

Este trabalho é dedicado a minha esposa, Maria do Carmo Vianna Ferreira, “companheira que a vida me brindou, me dando a certeza de ser amado e a oportunidade de consagrar o meu amor, com quem desejo chegar muito além do fim desta caminhada”, pois “quando enfim a vida terminar e dos sonhos nada mais restar, num milagre supremo, Deus fará no céu eu te encontrar”.

Hélio S. Bastos e Hino ao amor (Marguerite Monot e Edith Piaff).

“A energia do sol é uma das maravilhas do cosmos, iluminando nossos dias e sustentando a vida em nosso planeta. Que possamos explorar e compreender suas maravilhas celestes para iluminar também as sombras do desconhecido aqui na Terra.”

Galileo di Vincenzo Bonaiuti de Galilei - Galileu Galilei (1564 - 1642)

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

POTENCIAL ATUAL E FUTURO DA ENERGIA SOLAR NO BRASIL USANDO OS MODELOS GLOBAIS DO CMIP6.

AUTOR: CLÁUDIO FERREIRA
ORIENTADORA: Dra. MICHELLE SIMÕES REBOITA
Local e Data da Defesa: Itajubá, XX de novembro de 2023.

Com o crescimento das preocupações ambientais, a energia solar surge como alternativa para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar a projeção da energia solar no Brasil entre 2020 e 2100, considerando dois cenários de mudanças climáticas usando modelos do Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). Para atingir os objetivos, o trabalho envolveu duas abordagens: uma teórica e outra de aplicação. A primeira apresenta o conhecimento básico necessário para a dedução de várias equações ligadas ao tema de radiação atmosférica. O segundo aplica algumas das equações para avaliar o impacto das mudanças climáticas no potencial de energia solar no Brasil, usando os modelos do CMIP6 e os cenários SSPs 2-4.5 e 5-8.5 em quatro períodos: futuro próximo (2021 - 2040) e futuro médio (2041 – 2100). Com os resultados obtidos, tem-se que o Brasil possui potencial para o desenvolvimento da energia solar em um futuro marcado pelas mudanças climáticas. No Brasil, em 2023, a energia solar fotovoltaica ultrapassou a marca de 35 GW, representando mais de 15% da matriz elétrica brasileira e ocupando a segunda posição em tecnologia de geração de energia elétrica do país. Até 2030 é possível instalar mais 46 GW de energia solar centralizada, não tendo previsão para o final do século. As mudanças climáticas mostram, em média, variações de $\pm 1\%$ no potencial de geração fotovoltaica até 2100, o que atualmente significa metade de uma máquina de Itaipu. A adoção efetiva dessa fonte renovável dependerá de políticas públicas assertivas, investimentos em pesquisa e desenvolvimento, bem como do engajamento de diversos setores da sociedade em prol de um futuro mais sustentável e resiliente.

Palavras-chave: radiação solar, modelos climáticos. potencial solar, CMIP6, mudanças climáticas, Brasil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura do Sol adaptado de “Solar Structure - Lesson”, 2023.....	8
Figura 2.2 - Espectro da radiação solar, adaptado de “How Other Forms of Energy from Sunshine May Affect Our Health”, 2023.....	9
Figura 2.3 - Geometria para definição do ângulo sólido, adaptado de “Basic Radiometric Quantities”, 2023.	11
Figura 2.4 - Figura esquemática da radiação.....	12
Figura 2.5 - Figura esquemática da potência radiante de uma fonte luminosa, adaptado de SILVA, 2015.	13
Figura 2.6 - Figura esquemática da irradiância.	14
Figura 2.7 - Irradiância sobre uma superfície inclinada, adaptado de SILVA, 2015.	14
Figura 2.8 - Figura esquemática da exitância.	16
Figura 2.9 - Geometria da definição de intensidade radiante, adaptado de SILVA, 2015.....	17
Figura 2.10 - Figura esquemática da radiância.	18
Figura 2.11 - Geometria de definição da radiância, adaptado de SILVA, 2015.	19
Figura 2.12 - Características de uma onda periódica senoidal.	21
Figura 2.13 - Frequências angular e linear de uma onda.	23
Figura 2.14 - Relação entre $X_s(s)$ e s , adaptado de (“Basic Radiometric Quantities”, 2023).....	24
Figura 2.15 - Cavidade ressonante com um pequeno orifício que se comporta como um corpo negro ideal, adaptado de LIMA, 2013.....	26
Figura 2.16 - Intensidade espectral como função do comprimento de onda obtida por Lummer e Pringsheim em novembro de 1899, adaptado de CREPEAU, 2009.	29
Figura 2.17 - Diagrama mostrando a mudança na radiação do corpo negro para objetos com temperaturas diferentes, adaptado de “Wien's Law vs. Stefan-Boltzmann Law”, 2022.	30
Figura 2.18 - Prego aquecido por um maçarico, apresentado em “Black body radiation and color temperature”, 2023.....	31
Figura 2.19 - Irradiância em função da frequência para radiação do corpo negro, adaptado de “Estatística da Radiação - Lei de Planck”, 2016.....	32
Figura 2.20 - Comparação da lei de Planck com suas aproximações de baixa frequência (lei de Rayleigh-Jeans) e alta frequência (lei de Wien) a 300 K, adaptado de FAIZAN, 2020.....	35
Figura 2.21 - Padrão espectral do Sol, obtido de “Sun's Spectrum”, 2023.....	43
Figura 2.22 - Propagação da radiação do Sol a partir da consideração de uma fonte pontual, adaptado de SÁ <i>et al.</i> , 2016.	44
Figura 2.23 - Cálculos de Aristarco do século III a.C. sobre os tamanhos relativos, a partir da esquerda, do Sol, da Terra e da Lua, de uma cópia grega do século X dC, “On the Sizes and Distances (Aristarchus)”, 2020.	46
Figura 2.24 - Série da constante solar dados ACRIM e modelo proxy, adaptado de GUEYMARD, 2018.	52
Figura 2.25 - Esfera celeste mostrando o caminho aparente do Sol.....	54
Figura 2.26 - Movimento da Terra ao redor do Sol.....	55
Figura 2.27 - Geometria da órbita da Terra. A linha ondulada vermelha traça o caminho do centro da Terra, e a elipse preta e lisa traça o caminho do baricentro.aparente do Sol, adaptado de STULL, 2017.	56
Figura 2.28 - Paralaxe Sol - Terra, adaptado de DUFFIE; BECKMAN, 2013.....	58
Figura 2.29 - Variação da constante solar com os meses do ano, adaptado de DUFFIE; BECKMAN, 2013.	60
Figura 2.30 - Espectro de irradiância solar acima da atmosfera e na superfície, adaptado de “Solar Spectrum.png”, 2023.....	62
Figura 2.31 - O espectro WRC padrão da radiação, adaptado de WIDÉN; MUNKHAMMAR, 2019. ..	63
Figura 2.32 - Algumas aplicações práticas da energia solar.....	64
Figura 2.33 - Concentrador Solar de Augustin Mouchot, PERLIN, 2013.....	66
Figura 2.34 - Experiência de Becquerel, adaptado de “First photovoltaic Devices”, 2023; BORVON, 2020.	70
Figura 2.35 - Barras de selênio usadas nos experimentos de Willoughby Smith, SZABO, 2017.	71
Figura 2.36 - Primeiros painéis solares no telhado da cidade de Nova York em 1884, CHU; TARAZANO, 2019.....	73

Figura 2.37 - Gerald L. Pearson, Daryl M. Chapin e Calvin S. Fulle (esquerda para direita) “Early Solar History”, 2019.	74
Figura 2.38 - Capacidade térmica solar global em operação e produção anual de energia 2000-2022, adaptado de WEISS; SPÖRK-DÜR, 2023.	82
Figura 2.39 - Capacidade global em operação (GW_{el}), (GW_{th}) e produção anual de energia (TWh_{el}), (TWh_{th}) em 2022, adaptado de WEISS; SPÖRK-DÜR, 2023.	84
Figura 2.40 - Países com as maiores taxas de crescimento em 2022, adaptado de (WEISS; SPÖRK-DÜR, 2023).	85
Figura 2.41 - Crescimento da capacidade cumulativa de energia por tecnologia, 2010-2027, adaptado de (“Solar PV”, 2023).	85
Figura 2.42 - Geração de energia solar fotovoltaica no cenário Net Zero, 2010 – 2030, “Solar PV”, 2023.	87
Figura 2.43 - Capacidade de energia solar fotovoltaica no cenário Net Zero, 2010 – 2030, “Solar PV”, 2023.	88
Figura 3.1 - Diagrama de circulação geral de três células de Ferrel, FERREL, 2015.	100
Figura 3.2 - Uma representação da grade na qual Lewis Fry Richardson realizou sua aproximação numérica de uma previsão do tempo para 20/05/2010, HEYMANN, 2018.	105
Figura 3.3 - Grade numérica de previsão do tempo de Richardson sobre parte da Europa, “Weather Forecasting by Computer”, 2023.	106
Figura 3.4 - ENIAC, a primeira computação de uso geral sistema desenvolvido para modelagem de armas nucleares, posteriormente usado para modelagem meteorológica numérica, obtido em “Timeline of Climate Models”, 2023.	107
Figura 3.5 - Syukuro Manabe e Klaus Hasselmann que receberam metade do premio Nobel de Fisica 2021, Nobel Prize in Physics 2021, 2021.	113
Figura 3.6 - Uma pirâmide de modelo climático mostrando complexidade crescente do modelo global no eixo vertical e os processos primários que interagem uns com os outros ao longo dos contornos: radiação, dinâmica, resolução, química e processos de superfície, adaptado de MCGUFFIE, 2007.	115
Figura 4.1 - Classificação das tecnologias de sistemas de energia solar concentrada, adaptado de KUMAR; GUPTA, 2021.	153
Figura 4.2 - Sistemas CSP: calha parabólica (topo), torre de energia (meio superior), prato parabólico (meio inferior) e linear Fresnel (base), adaptado de RAJAVI, 2023; “Compact Linear Fresnel Reflectors”, 2022.	154
Figura 4.3 - Motor solar de Ericsson, “The Sun Motor”, 2023.	158
Figura 4.4 - Desenho esquemático da concentração da radiação solar em um PTC, adaptado de LODI, 2009.	159
Figura 4.5 - Esquema de um coletor de calha parabólica, adaptado de KALOGIROU, 2004.	159
Figura 4.6 - Rastreamento do Sol no sentido leste - oeste, adaptado de LODI, 2009.	161
Figura 4.7 - Comparação da eficiência de vários coletores em dois níveis de irradiância, adaptado de KALOGIROU, 2004.	172
Figura 4.8 - Estrutura de uma célula fotovoltaica, adaptado de OSMANBASIC, 2023.	176
Figura 4.9 - Diagrama dos possíveis componentes de um sistema fotovoltaico, adaptado de Solar cell 2023.	177
Figura 4.10 - Diagrama simplificado de um sistema PVP.	178
Figura 4.11 - Potência elétrica máxima calculada versus a medida para um painel fotovoltaico situado em Nicósia, Chipre (superior) e rendimento de energia calculado versus medido para um módulo fotovoltaico situado em Heraklion, Creta, Grécia (inferior), adaptado de MAVROMATAKIS <i>et al.</i> , 2010.	181
Figura 4.12 - Variação temporal da temperatura fotovoltaica para o arranjo ASE 260 situado em Nicósia, Chipre, adaptado de MAVROMATAKIS <i>et al.</i> , 2010.	192
Figura 4.13 - Valores calculados de refletância (pontos) e modelados (linhas) para cada configuração indicada de módulos de silício cristalino e amorfo, adaptado de MARTIN; RUIZ, 2001.	198
Figura 5.1 - Parcela de cada tecnologia de Placa Solar Fotovoltaica no mercado brasileiro. Geração distribuída e concentrada, disponível em “Placa Solar Fotovoltaica: Tudo Sobre”, 2023.	207
Figura 6.1 – Região de valores de CSPOUT para as faixas de Rs e TAS na região de análise para todos os cenários, modelos e períodos analisados.	214
Figura 6.2 – Valores de CSPOUT para a faixa de Rs e TAS máximo e mínimo na região de análise para todos os cenários, modelos e períodos analisados.	215
Figura 6.3 – Valores de PVP para variação de Rs com TAS e ws constantes na região de análise para todos os cenários, modelos e períodos analisados.	216

Figura 6.4 – Valores de PVP para variação de w_s com R_s e TAS constantes na região de análise para todos os cenários, modelos e períodos analisados.	216
Figura 6.5 – Valores de PVP para variação de TAS com R_s e w_s constantes na região de análise para todos os cenários, modelos e períodos analisados.	217

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Estimativa da distância Terra – Sol, de acordo com Astronomical unit, 2019.....	47
Tabela 4.1 - Análise das tecnologias CSP, GONZALO; MARUGÁN; MÁRQUEZ, 2019.	155
Tabela 4.2 – Modelos para obtenção do valor da irradiância solar.	164
Tabela 4.3 - Características do sistema IST PTC, KALOGIROU, 2004; LODI, 2009.	173
Tabela 4.4 - Coeficientes do sistema IST PTC, KALOGIROU, 2004.	174
Tabela 4.5 - Coeficientes médios para os seis parâmetros de entrada, TAMIZHMANI <i>et al.</i> , 2003..	188
Tabela 4.6 - Coeficientes médios para os quatro parâmetros de entrada, TAMIZHMANI <i>et al.</i> , 2003.	189
Tabela 4.7 - Coeficientes empíricos para estimativa de temperatura de módulo e célula, para dois projetos de módulo típicos, KING; KRATOCHVIL; BOYSON, 1997.....	192
Tabela 4.9 - Valores de γ obtidos na literatura.....	194
Tabela 4.9 - $\bar{R}(0)$ e valores para cada configuração, erros padrão assintóticos relativos (σ) e coeficientes de determinação (r^2) obtido em cada análise de regressão, MARTIN; RUIZ, 2001.	199
Tabela 5.1 - Coeficientes para o silício monocristalino utilizados no estudo.	207
Tabela 6.1 - Formatação das figuras com os resultados obtidos do ERA5.....	218
Tabela 6.2 - Formatação das figuras com os resultados obtidos do CMIP6.	218
Tabela 6.3 – Valores do CSPOUT e PVP para o período histórico (1995-2014) do ERA5.....	220
Tabela 6.4 – Valores do CSPOUT para o período histórico (1995-2014) do CMIP6.....	224
Tabela 6.5 – Valores do PVP para o período histórico (1995-2014) do CMIP6.....	225
Tabela 6.6 - Anomalia do CSPOUT para o período (2020-2039), cenário SSP2-4.5, CMIP6.....	229
Tabela 6.7 - Anomalia do PVP para o período (2020-2039), cenário SSP2-4.5, CMIP6.	230
Tabela 6.8 - Anomalia do CSPOUT para o período (2040-2059), cenário SSP2-4.5, CMIP6.....	231
Tabela 6.9 - Anomalia do PVP para o período (2040-2059), cenário SSP2-4.5, CMIP6.	232
Tabela 6.10 - Anomalia do CSPOUT para o período (2060-2079), cenário SSP2-4.5, CMIP6.....	233
Tabela 6.11 - Anomalia do PVP para o período (2060-2079), cenário SSP2-4.5, CMIP6.	234
Tabela 6.12 - Anomalia do CSPOUT para o período (2080-2099), cenário SSP2-4.5, CMIP6.....	235
Tabela 6.13 - Anomalia do PVP para o período (2080-2099), cenário SSP2-4.5, CMIP6.	236
Tabela 6.14 - Anomalia do CSPOUT para o período (2020-2039), cenário SSP5-8.5, CMIP6.....	240
Tabela 6.15 - Anomalia do PVP para o período (2020-2039), cenário SSP5-8.5, CMIP6.	241
Tabela 6.16 - Anomalia do CSPOUT para o período (2040-2059), cenário SSP5-8.5, CMIP6.....	242
Tabela 6.17 - Anomalia do PVP para o período (2040-2059), cenário SSP5-8.5, CMIP6.	243
Tabela 6.18 - Anomalia do CSPOUT para o período (2060-2079), cenário SSP5-8.5, CMIP6.....	244
Tabela 6.19 - Anomalia do PVP para o período (2060-2079), cenário SSP5-8.5, CMIP6.	245
Tabela 6.20 - Anomalia do CSPOUT para o período (2080-2099), cenário SSP5-8.5, CMIP6.....	246
Tabela 6.21 - Anomalia do PVP para o período (2080-2099), cenário SSP5-8.5, CMIP6.	247

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	ix
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - ENERGIA SOLAR	4
2.1. INTRODUÇÃO.....	4
2.2. CONCEITUAÇÃO DE ENERGIA SOLAR.....	4
2.3. O SOL	6
2.4. GRANDEZAS FÍSICAS RELACIONADAS À ENERGIA SOLAR	9
2.5. LEIS FÍSICAS RELACIONADAS À ENERGIA SOLAR	25
2.6. DISPONIBILIDADE DE ENERGIA SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA TERRESTRE ..	37
2.7. LINHA DO TEMPO DA ENERGIA SOLAR	63
2.8. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DA ENERGIA SOLAR.....	76
2.9. UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR NO MUNDO.....	80
2.10. UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR NO BRASIL.....	88
CAPÍTULO 3 - MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS DO CMIP6	93
3.1. INTRODUÇÃO.....	93
3.2. LINHA DO TEMPO DOS MODELOS CLIMÁTICOS	95
3.3. CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS CLIMÁTICOS.....	116
3.4. SEXTO PROJETO DE INTERCOMPARAÇÃO DE MODELOS ACOPLADOS (CMIP6)	
.....	122
3.4.1. DESCRIÇÃO	123
3.4.2. DESENVOLVIMENTO	124
3.4.3. FASES	126
3.4.4. ESTRUTURA.....	129
3.4.5. METAS	131
3.4.6. ACESSO AOS DADOS CLIMÁTICOS DO PROJETO CMIP6	133
3.4.7. CENÁRIOS.....	142
CAPÍTULO 4 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA	144
4.1. ANÁLISE DO ARTIGO DE REFERÊNCIA	144
4.2. SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR CONCENTRADA	149
4.3. PRODUÇÃO DE ENERGIA SOLAR CONCENTRADA	156
4.3.1. OBTENÇÃO DA IRRADIÂNCIA DIRETA R_D	162
4.3.2. OBTENÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA H_{CSP}	167
4.3.3. EQUAÇÃO PARA O CÁLCULO DE CS_{POUT}	174
4.4. SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	174
4.5. ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	178
4.5.1. OBTENÇÃO DO FATOR DE DESEMPENHO $P_R(T)$	182
4.5.2. PERDAS ANGULARES NOS MÓDULOS SOLARES	194
4.5.3. OBTENÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR R_S	200
4.5.4. OBTENÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR R_{STC}	200
4.5.5. EQUAÇÃO PARA O CÁLCULO DE $PVP(T)$	201

CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA	202
5.1. INTRODUÇÃO.....	202
5.2. VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS	203
5.3. EQUAÇÕES UTILIZADAS NAS ANÁLISES	204
5.4. CONSTANTES EMPÍRICAS ADOTADAS PARA O BRASIL	205
5.5. TRATAMENTO ADICIONAL PARA AS VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS.....	208
5.6. METODOLOGIA	209
CAPÍTULO 6 - ESTUDO DE CASO.....	212
6.1. INTRODUÇÃO.....	212
6.2. SENSIBILIDADE DE CSPOUT E PVP A PARTIR DAS EQUAÇÕES DE DEFINIÇÃO	212
6.3. VALORES DE CSPOUT E PVP POSSÍVEIS DE OCORRER COM OS DADOS CLIMÁTICOS DISPONIBILIZADOS.....	213
6.3. VALORES DE CSPOUT E PVP PARA O TERRITÓRIO BRASILEIRO E ANÁLISES CORRESPONDENTES	217
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	250
CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS	254

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

“Ao aproveitarmos a energia solar, não apenas abraçamos uma tecnologia inovadora, mas também abrimos as portas para um futuro mais limpo, seguro e próspero para todos.”
Rajendra Pachauri, ex-presidente do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (1940 - 2020)

A energia solar é uma fonte de energia renovável e limpa que tem se tornado cada vez mais importante no cenário global devido à crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

A energia solar pode ser aproveitada e usada para uma variedade de propósitos, incluindo geração de energia elétrica, aquecimento de água e fornecimento de energia para residências e empresas.

Isso geralmente é feito por meio do uso de painéis e coletores solares térmicos, projetados para capturar e converter a luz solar em energia utilizável, elétrica ou térmica.

A energia solar depende da radiação solar, que é a energia emitida pelo Sol na forma de ondas eletromagnéticas. Essas ondas de energia viajam pelo espaço e chegam à superfície da Terra, onde podem ser captadas e utilizadas como descrito acima por PEREIRA *et al.*, 2017.

A quantidade de energia solar que atinge a superfície da Terra depende de vários fatores, incluindo a hora do dia, a estação do ano, a latitude geográfica, a altitude e as condições climáticas locais.

As mudanças climáticas são um fenômeno global que tem preocupado especialistas e governos em todo o mundo. As emissões de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, provenientes de atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis para gerar energia, transporte e produção industrial, têm contribuído para o aquecimento global e o consequente aumento da temperatura média da Terra de acordo com o Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.

Os modelos climáticos sugerem que as mudanças climáticas terão impactos significativos no clima da Terra, incluindo mudanças nos padrões de precipitação,

aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como tempestades, furacões e secas descritos em (ABBASS *et al.*, 2022; DUTTA; CHANDA; MAITY, 2022; “Consequences of climate change - European Commission”, 2023; LINDSEY, 2009; “Climate change impacts - NOAA”, 2021; O’GORMAN, 2015; TRENBERTH, 2011; WILD, 2012).

Na literatura técnica podem ser encontrados muitos estudos que avaliam o impacto das mudanças climáticas na energia solar em todo o mundo conforme (CROOK *et al.*, 2011; FERON *et al.*, 2020; HOU *et al.*, 2021; JEREZ *et al.*, 2015; KOCH *et al.*, 2015; MFONGANG *et al.*, 2023; SAWADOGO; ABIODUN; OKOGBUE, 2020; YIN; MOLINI; PORPORATO, 2020; ZHANG; YOU; ULLAH, 2022).

No Brasil existem alguns artigos que abordam a contribuição da energia solar na mitigação das mudanças climáticas, mas não em análises ao longo do tempo, podendo-se citar (FERREIRA *et al.*, 2018; FRATE; BRANNSTROM, 2017; JANNUZZI; DE MELO, 2013; MARQUES; EMÍLIA; VIANNA, 2020; NUNES, 2023; PINTO; AMARAL; JANISSEK, 2016; ROSAS LUNA *et al.*, 2019; VIANA *et al.*, 2011).

Diante do exposto esse trabalho tem dois objetivos: um teórico e outro de aplicação. O primeiro irá apresentar o conhecimento básico necessário para a dedução de várias equações ligadas ao tema da radiação atmosférica e o segundo irá aplicar algumas das equações para avaliar o impacto das mudanças climáticas no potencial de energia solar no Brasil usando os cenários SSP245 e SSP585 do Modelo Climático Global CMIP6 em dois períodos: futuro próximo (2021 - 2040) e futuro de meados do século (2041- 2100).

A presente monografia está desenvolvida em sete capítulos que são os seguintes:

- Capítulo 1 - Introdução: corresponde ao presente capítulo.
- Capítulo 2 - Energia Solar: neste capítulo será feita a conceituação de energia solar, envolvendo sua descrição, história, importância, vantagens e desvantagens, produção e potencial no Brasil e no mundo.
- Capítulo 3 - Modelos Climáticos Globais do CMIP6: neste capítulo será feita uma abordagem dos modelos climáticos globais e regionais, onde serão apresentadas as descrições, história e características, utilização, etc., destes modelos, dando ênfase no modelo a ser utilizado nas análises subsequentes.

- Capítulo 4 - Formulação Matemática do Problema: neste capítulo será feita a análise referenciada como trabalho referência (SAWADOGO *et al.*, 2020) que norteará o estudo das projeções climáticas, de artigos relacionados no mesmo e de outros artigos correlacionados, correspondendo ao estado da arte no assunto Também serão descritas detalhadamente todas as grandezas utilizadas no artigo referência e importantes para compreensão do assunto desenvolvido, bem como serão demonstradas as expressões quando não for empírica, descrição das expressões empíricas em detalhes e de outras grandezas relacionadas.
- Capítulo 5 - Metodologia: neste capítulo será feita a descrição da metodologia utilizada no estudo, dados utilizados, limitações, abrangência, etc..
- Capítulo 5 - Estudo de Caso: neste capítulo será feito o estudo do caso relacionado ao assunto em questão, envolvendo as simulações efetuadas e análises correspondentes.
- Capítulo 6 - Conclusões e Recomendações: neste capítulo serão apresentadas as conclusões e recomendações resultantes dos estudos.
- Capítulo 7 - Bibliografia: neste capítulo serão referenciados os artigos, livros, normas, teses e sites visitados que foram utilizados nos estudos.

Capítulo 2 - ENERGIA SOLAR

“De uma coisa tenho certeza ... é que a raça humana deve finalmente utilizar a energia solar direta ou voltar à barbárie.”
Frank Shuman, engenheiro e inventor (1862 -1918)

2.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados as ideias básicas e os procedimentos de cálculo que devem ser compreendidos para a análise do processo de geração solar e de seu desempenho com vistas à geração de energia elétrica, que é o foco deste trabalho.

Não serão discutidas todas as características da energia solar, mas somente aquelas necessárias às formulações a serem feitas no estudo do caso, bem como o embasamento necessário para o entendimento destas formulações.

Na literatura se encontram muitas citações de energia solar com vistas à geração de eletricidade. Cabe observar que energia elétrica é diferente de eletricidade. A energia elétrica é uma forma de energia que pode ser gerada por diversos meios e transmitida por uma corrente elétrica. A eletricidade é um termo amplo que se refere a vários fenômenos referentes à presença e/ou movimento de cargas elétricas. Entre os leigos o termo eletricidade normalmente é confundido com energia elétrica. No presente trabalho a referência será sempre a energia elétrica.

2.2. Conceituação de Energia Solar

A energia solar como o próprio nome diz é a energia proveniente do Sol, sendo, literalmente, toda a energia irradiada pelo Sol, seja em sua forma de luz visível ou não.

Com relação ao conceito de energia não há uma definição exata para a mesma, mas de uma forma geral pode-se dizer que energia é a propriedade de um corpo, substância ou sistema físico que lhe permite realizar trabalho, ou seja, uma

ação ou movimento. É um conceito muito importante, porém muito abstrato.

A etimologia da palavra energia deriva do grego *enérgeia* (ἐνέργεια). Desenvolvido por Aristóteles, *enérgeia* não tem tradução direta para outra língua, sendo frequentemente descrita como *év* (dentro) e *épyeia* (trabalho, obra), significando “dentro do trabalho” ou “estar no trabalho”. Em 1800, o físico inglês Thomas Young (1773 - 1829) introduziu pela primeira vez a palavra “energia” no campo da física, conforme SNURR R.; FREUDE D., 2019.

A energia solar alimenta todos os processos térmicos, dinâmicos e químicos, sejam eles naturais ou artificialmente desenvolvidos, com aplicação do conhecimento científico e tecnológico produzido pela sociedade, de acordo com PEREIRA *et al.*, 2017.

Nos processos naturais à energia solar desempenha um papel importante na manutenção da vida e dos ecossistemas, podendo-se citar a fotossíntese, o ciclo hidrológico (evaporação/precipitação), a dinâmica da atmosfera e oceanos (ventos e correntes oceânicas), aquecimento da Terra, equilíbrio térmico do planeta, entre outros.

A energia solar pode ser aproveitada de diversas formas pelos seres humanos, além da própria contribuição para a saúde, sendo principalmente utilizada em iluminação, aquecimento de água e ambientes e produção de energia elétrica.

O uso da energia solar é uma forma importante de reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis e poluentes, como o petróleo e o carvão.

Também o impacto da energia solar na vida humana e no ambiente é muito menor que as outras formas de energia, sendo classificada como uma energia limpa e renovável.

É uma energia limpa, pois não libera gases, não produz ruídos, não polui o ar, nem a terra e água, não interfere no aquecimento global e nem mesmo tem relação com a produção de chuva ácida ou de camadas de poluição nas grandes cidades do mundo.

Observando com exatidão, a energia solar não é renovável, mas uma fonte inesgotável levando em consideração a escala de tempo da vida no planeta Terra.

2.3. O Sol

O Sol é a estrela mais próxima da Terra, de classificação estelar tipo espectral G2 e classe de luminosidade V (anãs), constituído de matéria gasosa, principalmente hidrogênio.

Em astronomia, a classificação estelar é a classificação das estrelas com base em suas características espectrais. A classificação espectral de Harvard, só leva em conta a temperatura da superfície das estrelas (HETEM, 2023). Em ordem decrescente de temperatura as classes espectrais são: O, B, A, F, G, K, M, R, N e S, cada uma tendo 10 subdivisões. A classificação de luminosidade ou classificação espectral de Yerkes (MKK) é baseada em linhas espectrais sensíveis à temperatura estelar e gravidade de superfície, que está relacionada à luminosidade e são: 0 ou Ia+, Ia, IaB, Ib, II, III, IV, V, VI (prefixo sd) e VII (prefixo D).

O Sol é categorizado como uma estrela de sequência principal, ou seja, está na parte estável de seu ciclo de vida, quando está fundindo átomos de hidrogênio em átomos de hélio no núcleo e brilhando estavelmente, em equilíbrio hidrostático.

Sua energia é gerada através das reações de fusão nuclear dos átomos de hidrogênio, que produz hélio e libera enormes quantidades de energia na forma de luz e calor, sendo que a cada segundo 700 milhões de toneladas de hidrogênio são convertidos em hélio, de acordo com HAMILTON, 2023.

Neste processo o hidrogênio (ou seja, quatro prótons) se combina para formar o hélio (ou seja, um núcleo de hélio), e como a massa do núcleo de hélio é menor que a massa dos quatro prótons, uma quantidade de massa foi perdida na reação e convertida em energia.

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, valor este estimado na diferença da massa de hidrogênio e hélio, HAMILTON, 2023.

A estrutura do Sol é bastante complexa e pode ser considerada como composta por várias camadas que se estendem desde o seu núcleo até a sua atmosfera exterior:

– Núcleo: região mais interna do Sol, onde ocorre a fusão nuclear que gera a sua

energia. A temperatura no núcleo é de cerca de 15.000.000 °C, densidade de cerca de 150 g cm⁻³ e pressão cerca de 340 bilhões de vezes a pressão atmosférica da Terra ao nível do mar. Tanto a temperatura quanto a densidade diminuem à medida que se afasta do centro do Sol. Na borda externa do núcleo (cerca de 25% da distância até a superfície ou 175.000 km do centro) a temperatura é a metade do seu valor central e a densidade cai para cerca de 20 g cm⁻³ citados em (HAMILTON, 2023; Marshall Solar Physics, 2015).

- Zona de radiação: é a camada do Sol logo acima do núcleo, se estendendo até a camada de interface ou tacoclina na base da zona de convecção (de 25% da distância até a superfície para 70% dessa distância). A energia produzida no núcleo é transportada para a superfície através de radiação. A densidade cai para apenas 0,2 g cm⁻³ (menos que a densidade da água) do fundo ao topo da zona radiativa. A temperatura cai de 7.000.000 °C para cerca de 2.000.000 °C na mesma distância, Marshall Solar Physics, 2015.
- Zona de convecção: camada mais externa do interior solar. Estende-se desde uma profundidade de cerca de 200.000 km até à superfície visível. Na base da zona de convecção, a temperatura é de cerca de 2.000.000 °C. A energia é transportada através de convecção, ou seja, pelo movimento do plasma quente que sobe para a superfície e é substituído por plasma mais frio que desce. Na superfície visível, a temperatura caiu para 5.700 K e a densidade é de apenas 0,0000002 g cm⁻³ (cerca de 1/10.000 da densidade do ar ao nível do mar), Marshall Solar Physics, 2015.
- Fotosfera: camada visível do Sol, onde a luz é emitida para o espaço. A temperatura na fotosfera é de cerca de 5.500 °C e é onde ocorrem as manchas solares, conforme DUFFIE; BECKMAN, 2013.
- Cromosfera: camada fina acima da fotosfera, onde a temperatura aumenta para cerca de 20.000 °C. A cromosfera é visível durante um eclipse solar total.
- Coroa: camada mais externa do Sol, que se estende por milhões de quilômetros no espaço. A temperatura na coroa é de cerca de 1.000.000 °C e é onde ocorrem as ejeções de massa coronal, DUFFIE; BECKMAN, 2013.

A Figura 2.1 ilustra as camadas do Sol.

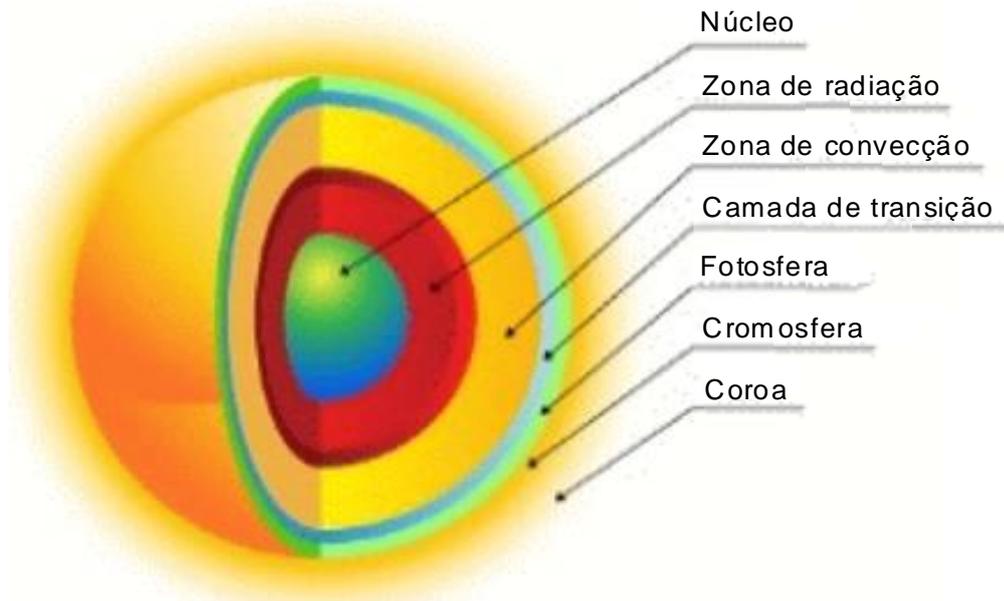


Figura 2.1 - Estrutura do Sol adaptado de “Solar Structure - Lesson”, 2023.

O Sol aparentemente está ativo há 4,6 bilhões de anos e tem combustível suficiente para continuar por aproximadamente mais 5 bilhões de anos. No fim de sua vida, o Sol começará a fundir o hélio em elementos mais pesados, se expandirá e engolirá a Terra. Após um bilhão de anos como uma estrela gigante vermelha, ele colapsará em uma anã branca, de acordo com HAMILTON, 2023.

O Sol é categorizado como uma estrela anã amarela em virtude da classificação espectral. Esse nome, todavia, não está relacionado à sua cor visual, uma vez que o Sol é capaz de produzir todos os comprimentos de onda da radiação visível como comentado acima (“Espectro Solar”, 2023). Dessa forma, quando visto de fora da Terra, sua coloração é branca.

O processo de emissão de luz realizado pelo Sol é o de irradiação térmica através de ondas eletromagnéticas, que será comentado no próximo item.

Estima-se que a energia gerada no interior do Sol leve milhões de anos chocando-se com as partículas de plasma até emergir na superfície brilhante. A maior parte do trajeto, no caso do calor, é feita em forma de radiação, como ocorre com a luz. Ao chegar à superfície leva cerca de 8,3 minutos para chegar a Terra.

A luz visível e a radiação infravermelha constituem a maior fração da radiação solar que atinge a atmosfera da Terra. Cerca de 50% (52 a 55%) encontra-se no intervalo da radiação infravermelha próxima (entre 780 e 2.500 nm).

Aproximadamente 40% da energia da radiação é luz visível de comprimentos de onda entre 400 e 700 nm. A radiação ultravioleta é dividida em diferentes bandas: UVC (entre 200 e 280 nm), UVB (entre 280 e 320 nm) e UVA (entre 320 e 400 nm). Cerca de 10 (8 a 5%) da energia de radiação que atinge a atmosfera da Terra está dentro do espectro UV.

A Figura 2.2 ilustra o espectro da radiação solar

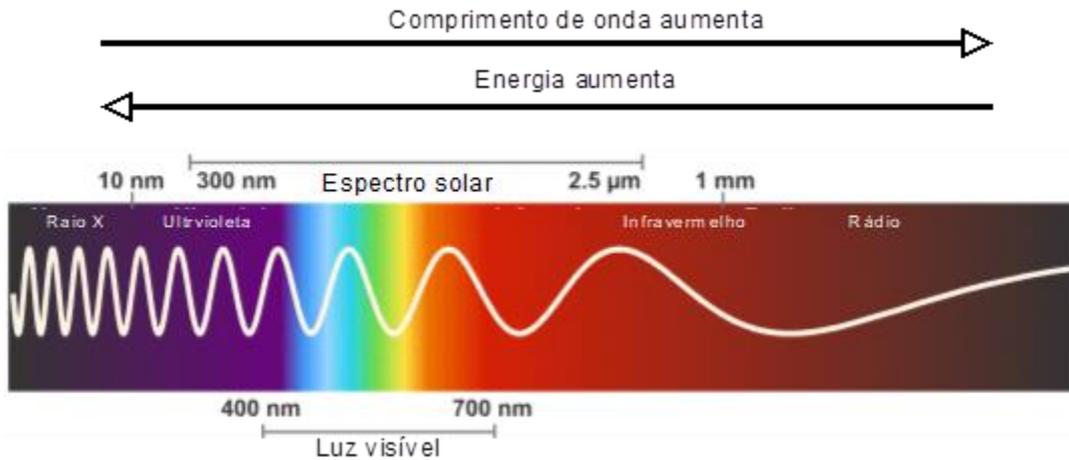


Figura 2.2 - Espectro da radiação solar, adaptado de "How Other Forms of Energy from Sunshine May Affect Our Health", 2023.

2.4. Grandezas físicas relacionadas à Energia Solar

A disponibilidade da energia solar na Terra e sua variabilidade espacial e temporal estão relacionadas a vários conceitos físicos, geométricos e astronômicos que serão mencionados e apresentados quanto pertinentes.

Na Física, radiação designa qualquer forma de transmissão de energia através do espaço de um ponto a outro (sem necessidade de uma ligação física entre os dois pontos)

Também na Física, radiação eletromagnética consiste em ondas do campo eletromagnético, que se propagam pelo espaço e carregam momento e energia radiante eletromagnética e classicamente, consiste em ondas eletromagnéticas, que são oscilações em fase de campos elétricos e magnéticos. No vácuo, as ondas eletromagnéticas viajam na velocidade da luz e em meios homogêneos e isotrópicos, as oscilações desses campos são perpendiculares entre si e

perpendiculares à direção de propagação da energia e da onda, formando uma onda transversal. Do ponto de vista da Mecânica Quântica, podem ser entendidas, ainda, como o deslocamento de pequenas partículas, os fótons.

Quando se trata de energia solar, principalmente em sistemas solares fotovoltaicos, existem muitas palavras e significados diferentes, para descrever a quantidade de luz solar disponível em qualquer local específico, podendo-se citar radiação solar, irradiância solar, irradiação solar, insolação solar, entre outros.

Cabe inicialmente descrever as grandezas relacionadas ao assunto e diferenciar toda nomenclatura que envolve estes fenômenos.

A radiometria trata da medição da energia eletromagnética emitida por fontes de luz ou que incide sobre uma dada superfície. De acordo com as diretivas da Comissão Internacional de Iluminação - CIE (*Comission Internationale de l'Éclairage*) na norma internacional CIE S 017:2020 ILV: *International Lighting Vocabulary, 2nd edition*, os símbolos usados para as grandezas radiométricas são denotados com o subscrito “e” de “energia”. Do mesmo modo, grandezas radiométricas dependentes do comprimento de onda são identificadas com o prefixo “espectral” e o subscrito λ apresentados em (“e-ILV”, 2023; SILVA, 2015).

As definições de grandezas radiométricas, que serão feitas a seguir, são funções de grandezas diferenciais. Para uma compreensão intuitiva, as grandezas diferenciais $d\lambda$, dA e $d\Omega$ podem ser consideradas como pequenos intervalos ou elementos $\Delta\lambda$, ΔA e $\Delta\Omega$ da respectiva grandeza. Como consequência do fato desses intervalos ou elementos serem muito pequenos, as grandezas radiométricas podem ser consideradas constantes na faixa definida por $d\lambda$, dA e/ou $d\Omega$ citados em “Basic Radiometric Quantities”, 2023.

Uma fonte consiste em um objeto que produz luz ou outro fluxo radiante.

Se os interesses nas análises forem nas características de uma fonte situada em uma distância muito maior que as dimensões geométricas da própria fonte, pode-se desprezar o tamanho real da fonte e assumir que a luz é emitida de um ponto, consistindo em uma fonte pontual ou puntiforme. Como regra geral, essa aproximação é justificada se a distância for pelo menos 10 vezes maior que as dimensões da fonte.

Uma fonte pontual que emite uniformemente em todas as direções é chamada

de fonte pontual uniforme ou fonte pontual isotrópica de acordo com “e-ILV”, 2023.

Quando as dimensões da fonte são pequenas o suficiente, em comparação com a distância entre a fonte e a superfície irradiada, para serem desprezíveis em cálculos e medições, a fonte é dita fonte de radiação incoerente ainda “e-ILV”, 2023.

Seja a Figura 2.3 que ilustra um holofote emitindo luz situada em um ponto P. O campo visual completo do holofote pode ser descrito por uma esfera de raio arbitrário r. Portanto, certa parte deste campo visual completo define uma área A na superfície da esfera e a quantidade geométrica que quantifica esta parte do campo visual é denominado ângulo sólido.

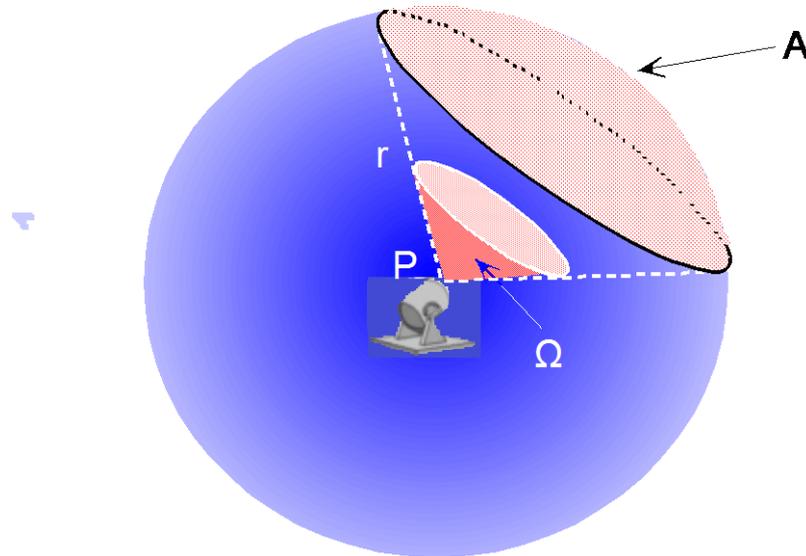


Figura 2.3 - Geometria para definição do ângulo sólido, adaptado de “Basic Radiometric Quantities”, 2023.

O ângulo sólido é explicitado pela letra Ω e dado na equação 2.1.

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad 2.1$$

Como a área A é proporcional a r^2 , então o ângulo sólido é independente da escolha real de r.

A definição acima foi feita para a área de uma calota esférica. No entanto, como o ângulo sólido não é definido apenas para partes cônicas do campo visual completo, a área A pode ser qualquer forma arbitrária na superfície da esfera.

Embora Ω seja adimensional, é comum usar a unidade esferorradiano ou esterradiano, representada por (sr).

O campo visual total é descrito por toda a superfície da esfera, que corresponde a um ângulo sólido de 4π (sr).

Cabe observar que o esferorradiano é o equivalente tridimensional do ângulo ordinário, sendo a unidade sr análogo ao radiano (rad)..

A energia radiante, Q_e , é a energia emitida, transferida ou recebida na forma de ondas eletromagnéticas e também considerada a energia total emitida por uma fonte radiante, sendo sua unidade no SI o joule (J), dados em (“e-ILV”, 2023; “Basic Radiometric Quantities”, 2023).

A radiação ou radiação eletromagnética é o fenômeno pelo qual a energia na forma de ondas eletromagnéticas ou fótons emana de uma fonte e é transferida através do espaço, conforme “Basic Radiometric Quantities”, 2023.

A Figura 2.4 ilustra esquematicamente a radiação.

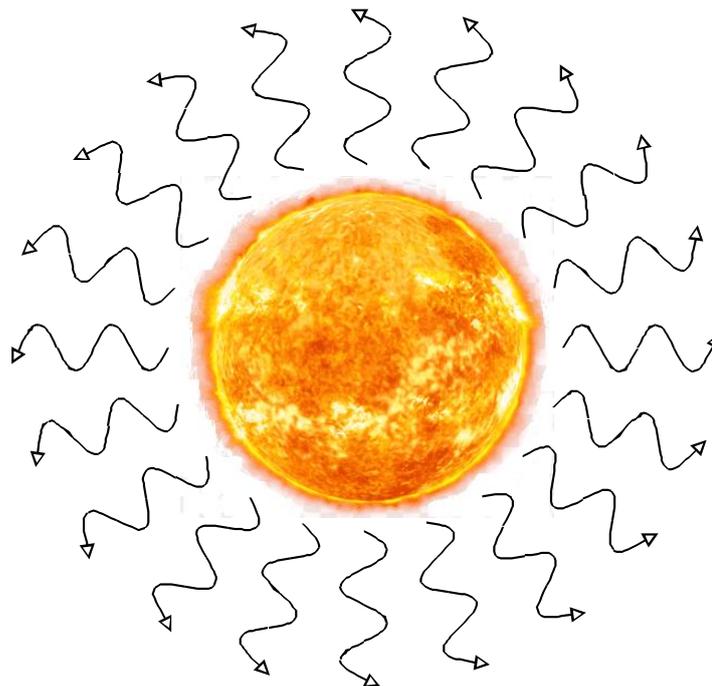


Figura 2.4 - Figura esquemática da radiação.

Usando a definição acima, tem-se que a radiação solar é a energia emitida pelo Sol, ou seja, a radiação emitida pelo Sol, que se propaga em todas as direções através do espaço por meio de ondas eletromagnéticas.

A potência radiante ou fluxo radiante, Φ_e , também usado, P_e , Φ ou P , corresponde a quantidade de energia radiante total liberada por segundo, ou seja, a

potência total de radiação emitida por uma fonte, transmitida através de uma superfície ou incidente sobre uma superfície, sendo sua unidade o watt (W), correspondendo à equação 2.2. Esta grandeza não fornece qualquer informação sobre a distribuição espectral ou direcional da radiação da fonte, descritos em (SILVA, 2015; “Basic Radiometric Quantities”, 2023).

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad 2.2$$

A Figura 2.5 ilustra esquematicamente a potência radiante.

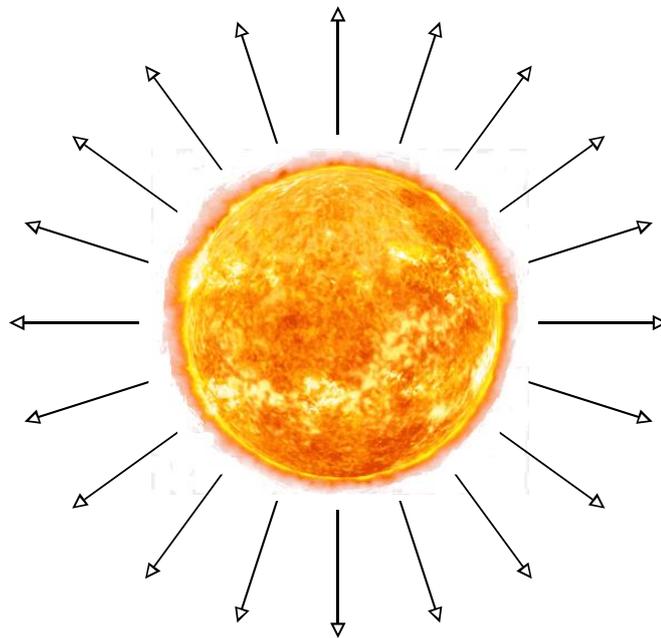


Figura 2.5 - Figura esquemática da potência radiante de uma fonte luminosa, adaptado de SILVA, 2015.

O termo "fluxo radiante" é o termo preferido para a maioria das aplicações radiométricas, já em radiometria a laser, o termo "potência radiante" é mais comumente usado citado em (“e-ILV”, 2023; “Basic Radiometric Quantities”, 2023).

A irradiância, ou densidade de fluxo radiante, E_e ou E , é a taxa na qual a energia radiante chega a uma área específica da superfície (A), real ou imaginária, durante um intervalo de tempo específico, sendo sua unidade, no SI, $W\ m^{-2} = J\ m^{-2}\ s^{-1}$, e, por definição, é um fluxo de energia radiante instantâneo, mostrada na equação 2.3.

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad 2.3$$

A Figura 2.6 ilustra esquematicamente a irradiância.

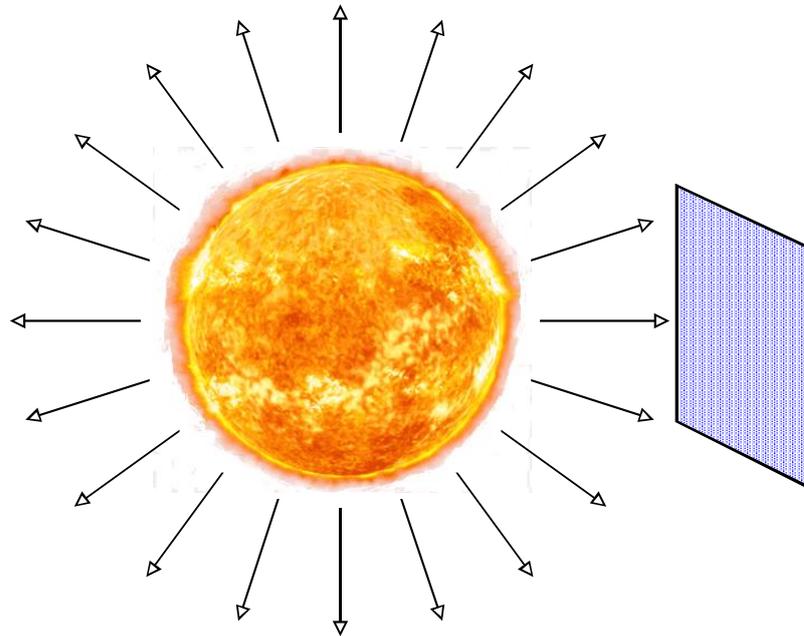


Figura 2.6 - Figura esquemática da irradiância.

Geralmente, o elemento de superfície pode ser orientado em qualquer ângulo na direção do feixe. Para isto veja a Figura 2.7, onde um feixe de radiação paralelo (colimado) incide sobre uma superfície plana, que faz um ângulo θ com a normal a superfície, e $A(0)$ e $A(\theta)$, são as áreas da secção reta do feixe e da superfície receptora iluminada pelo feixe.

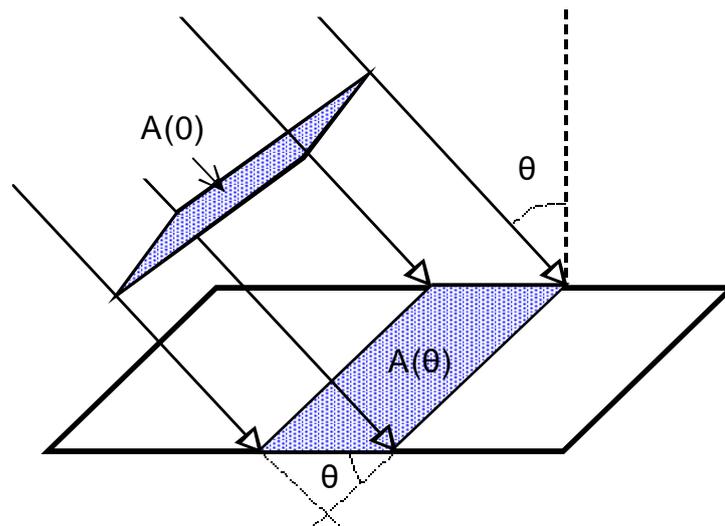


Figura 2.7 - Irradiância sobre uma superfície inclinada, adaptado de SILVA, 2015.

A irradiância $E_e(\theta)$ é dado pela equação 2.4, onde $E(0)$ corresponde a irradiância quando a superfície receptora está orientada perpendicularmente ao feixe

incidente ($\theta = 0$).

$$E_e(\theta) = \frac{\Phi_e}{A(\theta)} = \frac{\Phi_e}{\left[\frac{A(0)}{\cos(\theta)} \right]} = \left[\frac{\Phi_e}{A(0)} \right] \cos(\theta) = E_e(0) \cos(\theta) \quad 2.4$$

Pode-se observar que a irradiância é maximizada quando o elemento de superfície é perpendicular ao feixe

.A irradiância corresponde ao módulo do vetor de Poynting da radiação eletromagnética. Na Física, o vetor de Poynting representa a densidade direcional do fluxo de energia de um campo eletromagnético. Foi nomeado em homenagem ao físico inglês John Henry Poynting (1852 - 1914), aluno do famoso físico e matemático escocês James Clerck Maxwell (1831 - 1879), que demonstrou a existência deste vetor, conforme “John Henry Poynting”, 2020.

A equação 2.5 representa o vetor de Poynting, onde \vec{E} corresponde ao vetor campo elétrico, \vec{H} ao vetor campo magnético e \vec{P} ao vetor de Poynting, cuja dedução pode ser feita a partir das equações de Maxwell e foge ao escopo deste trabalho.

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad 2.5$$

A irradiação é a quantidade de energia radiante que chega a uma superfície durante certo intervalo de tempo, por unidade de área, ou seja, a irradiância em um intervalo de tempo, sendo sua unidade $W \text{ h m}^{-2}$ ou $W \text{ h m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para a irradiação diária, descritas pela equação 2.6. Corresponde à exposição à radiação e não tem um símbolo próprio.

$$\text{Irradiação} = E_e \Delta t = E_e (3.600 t_{\text{horas}}) = E_e (86.400 t_{\text{dias}}) \quad 2.6$$

A exitância radiante, M_e , de uma superfície, antigamente denominada emitância, é a potência radiante emitida ou refletida por unidade de área, sendo sua unidade, no SI, $W \text{ m}^{-2}$, descrita pela equação 2.7.

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad 2.7$$

A Figura 2.8 ilustra esquematicamente a exitância.

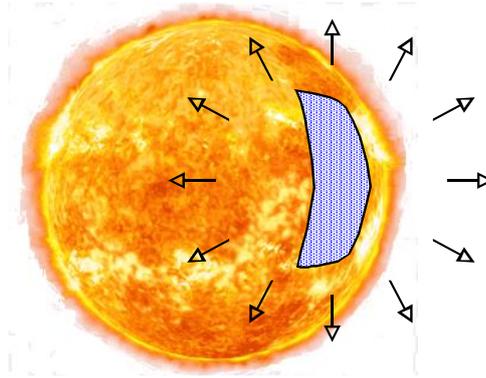


Figura 2.8 - Figura esquemática da exitância.

A diferença da exitância com a irradiância é somente no sentido do fluxo de energia, sendo que a exitância é usado na emissão ou reflexão de energia e a irradiância para recebimento de energia. Estas quantidades são comumente chamadas de intensidade, mas o uso desse nome leva à confusão com intensidade radiante, que tem unidades diferentes e será apresentado a seguir.

A intensidade radiante, I_e ou I , descreve a potência radiante de uma fonte emitida numa dada direção por unidade de ângulo sólido, sendo descrita pela equação 2.8, onde Φ_e é o fluxo radiante emitido em uma direção especificada e Ω é o ângulo sólido que contém essa direção, sendo sua unidade $W\ sr^{-1}$.

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad 2.8$$

A Figura 2.9 ilustra a geometria da definição de intensidade radiante, onde dI_e é a potência radiante no interior do ângulo sólido infinitesimal $d\Omega$ na direção de observação definida pelo versor \hat{s} , correspondente ao ângulo θ .

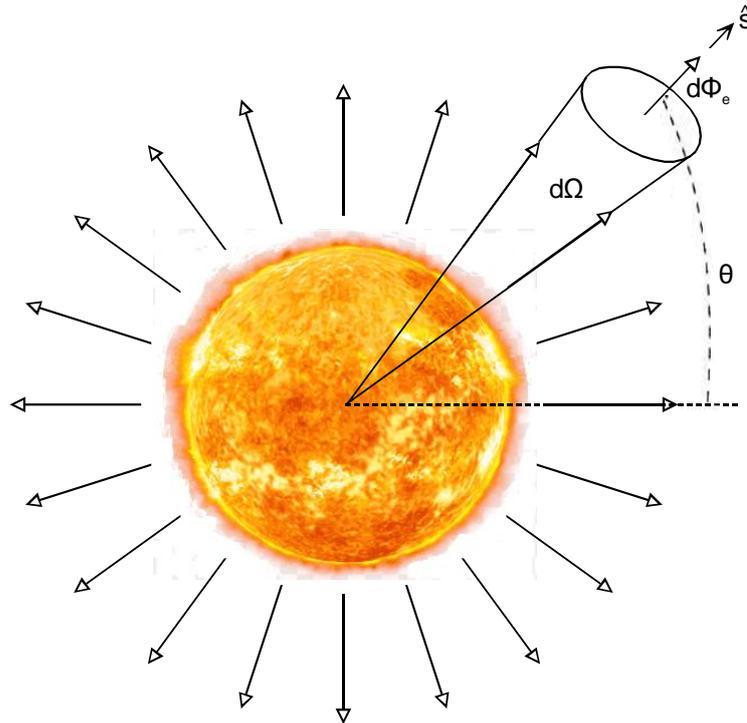


Figura 2.9 - Geometria da definição de intensidade radiante, adaptado de SILVA, 2015.

Partindo da equação 2.8, considerando um ângulo sólido infinitesimal $d\Omega$ centrado na fonte, a potência radiante da fonte no interior de $d\Omega$ é dado pela equação 2.9

$$d\Phi_e = I_e d\Omega \quad \rightarrow \quad \Phi_e = \int_0^{\Omega} I_e d\Omega \quad 2.9$$

A potência total da fonte corresponde a toda área superficial da esfera e subtende ao maior ângulo sólido possível (4π), sendo dado pela equação 2.10, derivada de (9) onde a intensidade radiante $I_e(\theta)$ está representada como uma função da direção, ou seja, do ângulo θ .

$$\Phi_e = \int_0^{4\pi} I_e(\theta) d\Omega \quad 2.10$$

Se a fonte for isotrópica a equação 2.10 resume na equação 2.11.

$$\Phi_e = \int_0^{4\pi} I_e d\Omega = I_e \int_0^{4\pi} d\Omega = I_e \Omega \Big|_0^{4\pi} = 4\pi I_e \quad \rightarrow \quad I_e = \frac{\Phi_e}{4\pi} \quad 2.11$$

No caso mais geral, a energia não se propaga isotropicamente e, portanto a intensidade radiante $I_e(\theta)$ depende da direção θ .

A intensidade radiante como função da direção de emissão dada, por exemplo, pelos ângulos polares (θ , φ), dentro de certo ângulo sólido, Ω , de uma fonte é calculada pela equação 2.12.

$$\Phi_e = \iint_{\Omega} I_e(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} I_e(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi \quad 2.12$$

A radiância, L_e ou L , descreve a potência radiante emitida ou refletida por unidade de ângulo sólido e por unidade de área da superfície emissora ou refletora, real ou imaginária, projetada na direção do ângulo sólido, sendo sua unidade $W m^{-2} sr^{-1}$. A definição da CIE é mais geral e de acordo com a aplicação.

A Figura 2.10 ilustra esquematicamente a radiância.

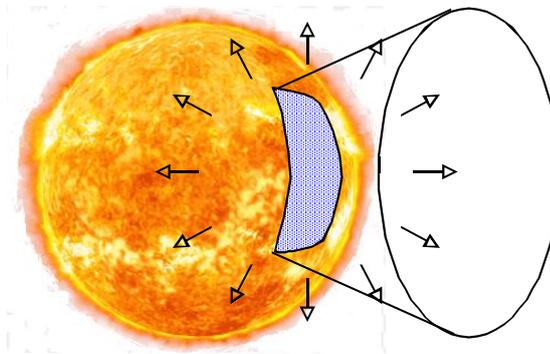


Figura 2.10 - Figura esquemática da radiância.

Seja a Figura 2.11, onde para auxiliar definir a radiância matematicamente foi feita uma representação geométrica do problema, sendo $d\Phi_e$ a potência radiante no interior do ângulo sólido infinitesimal $d\Omega$, emitida ou refletida pelo elemento de área dA , ao qual corresponde uma área projetada dA_{proj} na direção de observação e \hat{s} e \hat{n} são os versores da direção de observação e da direção normal da superfície dA , respectivamente.

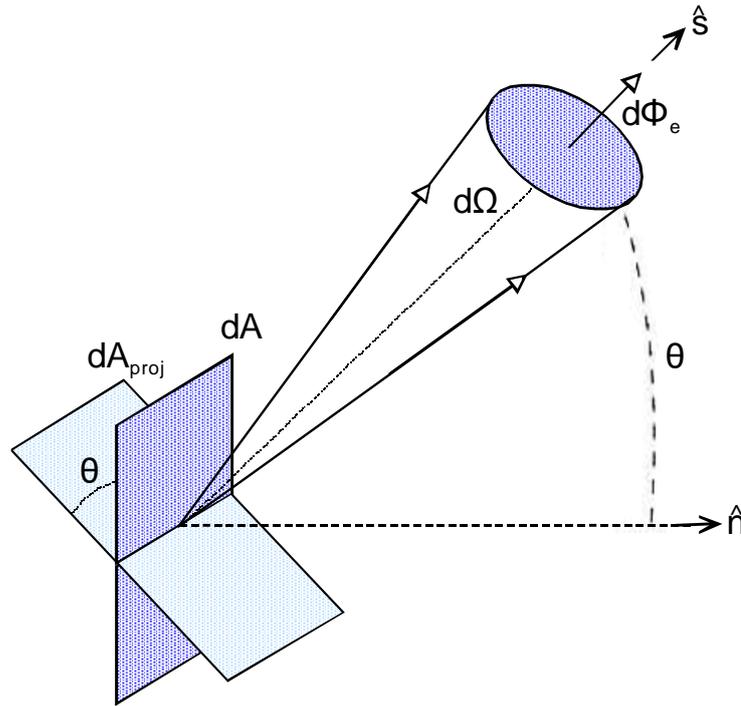


Figura 2.11 - Geometria de definição da radiância, adaptado de SILVA, 2015.

A área do elemento de superfície projetada segundo a direção \hat{s} é dado pelo produto escalar apresentado na equação 2.13.

$$dA_{\text{proj}} = dA \hat{n} \cdot \hat{s} = dA \cos(\theta) \quad 2.13$$

Aplicando a definição de radiância, tem-se a equação 2.14, onde é usada a derivada parcial devido às várias variáveis envolvidas.

$$L_e = \frac{\partial \left[\frac{\Phi_e(\theta)}{\partial A_{\text{proj}}} \right]}{\partial \Omega} = \frac{\partial^2 \Phi_e(\theta)}{\partial A_{\text{proj}} \partial \Omega} \quad 2.14$$

Expandindo a equação 2.14 resulta na equação 2.15.

$$L_e = \frac{\partial^2 \Phi_e(\theta)}{\partial A_{\text{proj}} \partial \Omega} = \frac{\partial^2 \Phi_e(\theta)}{\partial [A \cos(\theta)] \partial \Omega} = \left[\frac{1}{\cos(\theta)} \right] \frac{\partial^2 \Phi_e(\theta)}{\partial A \partial \Omega} - \left[\frac{1}{A \sin(\theta)} \right] \frac{\partial^2 \Phi_e(\theta)}{\partial \theta \partial \Omega} \quad 2.15$$

Substituindo a equação 2.8 na equação 2.15 a radiância pode ser dada ainda pela equação 2.16

$$L_e = \left[\frac{1}{\cos(\theta)} \right] \frac{\partial I_e(\theta)}{\partial A} - \left[\frac{1}{A \sin(\theta)} \right] \frac{\partial I_e(\theta)}{\partial \theta} \quad 2.16$$

Se a fonte for isotrópica o segundo termo da equação 2.16 é anulado

resultando na equação 2.17.

$$L_e = \left[\frac{1}{\cos(\theta)} \right] \frac{\partial^2 \Phi_e(\theta)}{\partial A \partial \Omega} \quad 2.17$$

Substituindo a equação 2.4 na equação 2.17 a irradiância resulta na integral da radiância pelo ângulo sólido e pelos ângulos polares (θ , φ), dentro deste ângulo sólido, conforme mostra a equação 2.18.

$$\begin{aligned} L_e = \left[\frac{1}{\cos(\theta)} \right] \frac{dE_e(\theta)}{d\Omega} &\quad \rightarrow \quad E_e(\theta) = \int_0^{\Omega} L_e \cos(\theta) d\Omega = \\ &= \iint_{\Omega} L_e \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi = \\ &= \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{L_e}{2} \sin(2\theta) d\theta d\varphi \end{aligned} \quad 2.18$$

A equação 2.18 pode ser aplicada também para a excitância.

A densidade de energia radiante, u ou ω , corresponde a energia radiante por unidade de volume, descrita pela equação 2.19, onde V é o volume, sendo sua unidade $J m^{-3}$.

$$u = \frac{dQ_e}{dV} \quad 2.19$$

A radiação sempre transmite energia. Suponha que a transmissão de energia ocorra com uma velocidade c , o que significa que em um tempo Δt , a energia desloca $\Delta x = c\Delta t$. Substituindo na equação 2.19, $dV = dA \Delta x = cdA\Delta t = cdAdt$, e considerando as equações 2.2 e 2.3, resulta a equação 2.20, onde por motivos já explicados se utiliza a derivada parcial.

$$u = \frac{1}{c} \frac{\partial^2 Q_e}{\partial t \partial A} = \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial A} \left(\frac{\partial Q_e}{\partial t} \right) = \frac{1}{c} \frac{\partial \Phi_e}{\partial A} = \frac{1}{c} E_e \quad 2.20$$

A equação 2.20 fornece a densidade de energia em função da irradiância.

Substituindo Φ_e pelas equações 2.1 e 2.8 e considerando uma área de propagação esférica, tem-se a equação 2.21.

$$u = \frac{1}{c} \frac{\partial \Phi_e}{\partial A} = \frac{1}{c} L_e \frac{\partial \Omega}{\partial A} = \frac{1}{c} L_e \frac{\Omega \partial A}{\partial A} = \frac{4\pi}{c} L_e \quad 2.21$$

A equação 2.21 fornece a densidade de energia em função da radiância

As grandezas radiométricas introduzidas até o momento quantificam a radiação total sem discriminar outras características da onda de radiação. É também possível, e em muitos casos conveniente, quantificar não apenas a quantidade absoluta dessas quantidades, mas também a contribuição de diferentes comprimentos de onda, frequência ou número de onda, que são características de uma onda periódica.

As características acima estão definidas a seguir:

- O comprimento de onda, λ , é a distância entre cristas (ou vales) sucessivas e corresponde ao espaço que a onda percorre para completar uma oscilação (um ciclo), ilustrado na Figura 2.12. É medido em unidades de comprimento e no SI é dado em (m).
- O período da onda, T , é a duração de tempo que leva para que um comprimento de onda passe por um determinado ponto no espaço e no SI é dado em (s). Na Figura 2.12 pode ser ilustrado pelo tempo que a onda gasta para se deslocar de C até C'.

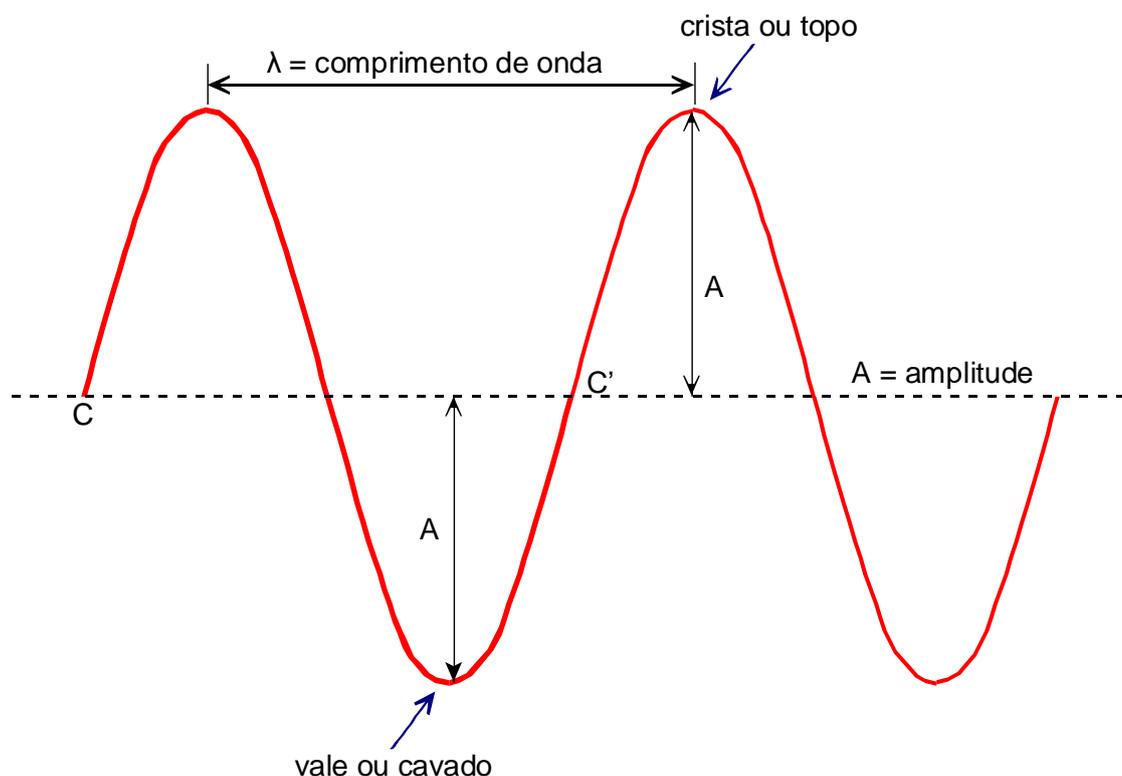


Figura 2.12 - Características de uma onda periódica senoidal.

- A frequência da onda, f ou ν (grego *ni*) também chamado de frequência linear, é o número de ondas completas que passa por um dado ponto por unidade de tempo. Sua unidade no SI é o Hertz ($\text{Hz} = \text{s}^{-1}$).

A frequência corresponde ao inverso do período, como mostrado na equação 2.22.

$$f = \nu = \frac{1}{T} \quad 2.22$$

- A velocidade de propagação da onda, velocidade de fase ou celeridade, v (grego *upsilon*), é a velocidade da onda no meio e, portanto, depende exclusivamente do meio em que elas se encontram e no SI é dado por (m s^{-1}). Com base no comprimento de onda, no período ou frequência, a velocidade da onda é dada pela equação 2.23.

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad 2.23$$

- A frequência angular ω , também chamada de velocidade angular, é a rapidez com que o ponto realiza o ciclo, dada em radiano/unidade de comprimento e no SI é dado por (rad s^{-1}), mostrado na equação 2.24.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad 2.24$$

A frequência angular e a frequência linear são dois conceitos diferentes com uso diferentes. A frequência angular determina a mudança de fase, enquanto a frequência linear fornece a especificação do número de oscilações completadas em um segundo.

A Figura 2.13 ilustra a frequência angular (esquerda) e a frequência linear (direita) de uma onda.

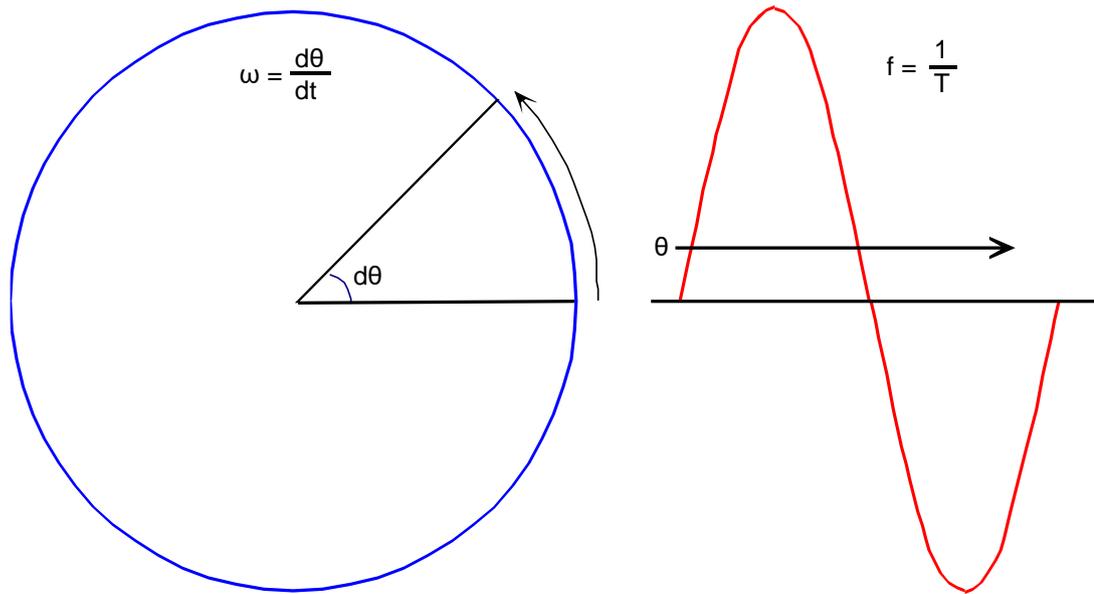


Figura 2.13 - Frequências angular e linear de uma onda.

- O número de onda, k ou κ (grego kappa), é uma grandeza física escalar inversamente proporcional ao comprimento de onda, frequentemente usada em espectroscopia, química, óptica, física de partículas, etc., podendo ser definido de duas maneiras:
 - Pelo número de comprimentos de onda por unidade de distância, dado no SI por (1/m), mas também usado em (1/cm), mostrado na equação 2.25.

$$\kappa = \frac{1}{\lambda} \quad 2.25$$

- Pela equação 2.26. Na literatura além de ser comumente referido como número de onda, também é denominado número de onda angular ou número de onda circular. Sua unidade no SI é dada por (rad m⁻¹).

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} \quad 2.26$$

Em se tratando de radiação eletromagnética, o número de onda é proporcional à frequência e a energia (que será comentado no próximo item). Substituindo a equação 2.23 na equação 2.24 resulta a equação 2.27.

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\left(\frac{v}{f}\right)} = \frac{2\pi f}{v} = \frac{\omega}{v} \quad 2.27$$

O número de onda é uma característica de uma onda e é constante para a mesma, mas varia de uma onda para outra.

Existem alguns casos especiais em que o número de onda resulta variável e também pode resultar negativo.

As grandezas espectrais radiométricas representam densidades das correspondentes grandezas radiométricas por unidade de intervalo da característica da onda escolhida.

A uma grandeza radiométrica X_e corresponde uma grandeza radiométrica espectral $X_{e,s}(s)$ dada pela equação 2.28.

$$X_{e,s}(s) = \frac{\partial X_e}{\partial s} \quad 2.28$$

Em consequência a grandeza radiométrica X_e associada a uma grandeza espectral $X_{e,s}(s)$, corresponde à área sob a curva de $X_{e,s}(s)$, podendo ser calculada pela equação 2.29.

$$X_e = \int_0^{\infty} X_s(s) ds \quad 2.29$$

A Figura 2.14 ilustra estes conceitos, onde a grandeza espectral no intervalo de comprimento de onda entre s e $s + ds$ é dada pela área marcada a tracejado de valor $X_s(s) ds$.

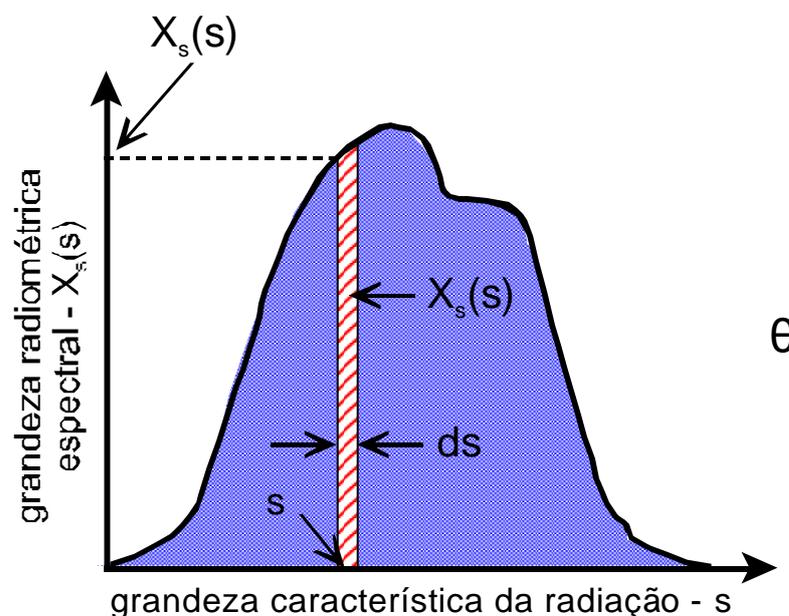


Figura 2.14 - Relação entre $X_s(s)$ e s , adaptado de ("Basic Radiometric Quantities", 2023).

A unidade da grandeza espectral corresponde a $\left(\frac{\text{grand}(X)}{\text{grand}(s)} \right)$.

Com isso pode ser definida a intensidade radiante espectral $I_{e,s}$, $I_e(s)$ ou I_s , a radiância espectral $L_{e,s}$, $L_e(s)$ ou L_s , a irradiância espectral $E_{e,s}$, $E_e(s)$ ou E_s e a exitância espectral $M_{e,s}$, $M_e(s)$ ou M_s .

2.5. Leis físicas relacionadas à Energia Solar

A aplicação das grandezas relacionadas no item anterior partem do pressuposto do conhecimento da energia radiante emitida, Q_e , que pode ser medida ou estimada através das leis da radiação.

As leis da radiação são as formas matemáticas de definir as relações entre temperatura, energia e comprimento de onda e formuladas a partir de algumas considerações.

Existem inúmeras leis e princípios físicos relacionados a ondas e radiação, mas serão apresentadas somente aquelas necessárias no decorrer do trabalho.

Por volta do meio do século XIX quando a pesquisa na área de radiação começou a despertar o interesse dos físicos, uma pergunta foi formulada: como descrever matematicamente como um corpo aquecido irradia energia e quanto ele emite em cada comprimento de onda.

Para tentar responder a pergunta, o primeiro passo foi dado pelo físico germânico Gustav Robert Kirchhoff (1824 - 1877), em 1859, ao introduzir dois conceitos fundamentais: a intensidade espectral, $I_v(T)$, que provou só depender da frequência e da temperatura, e a noção de corpo negro.

Ao se referir a temperatura, deve-se ter em mente que será sempre usada (a menos que citado explicitamente) a temperatura absoluta ou temperatura termodinâmica, chamada também escala de temperatura Kelvin, baseada no zero absoluto, que é a temperatura mais baixa possível, na qual todas as partículas em um sistema estão em repouso absoluto. Ela foi proposta em 1848, pelo físico britânico William Thomson, 1º barão Kelvin, (1824 - 1907), também conhecido como Lorde Kelvin, motivado pela necessidade de um método mais preciso de medir temperaturas em experimentos científicos. As escalas de temperatura anteriores, como a escala Celsius e a escala Fahrenheit, eram baseadas em pontos de fusão e

ebulição de substâncias específicas, o que tornava difícil a comparação de medidas de temperatura em diferentes experimentos. Por ser "absoluta", a temperatura termodinâmica não é seguida por um símbolo de grau.

O conceito de corpo negro consiste em um objeto que absorve toda a radiação que incide sobre ele, sem refletir nada da radiação incidente. Um corpo com essa propriedade, em princípio, não pode ser visto e, portanto, é negro. Em equilíbrio termodinâmico, um corpo negro ideal irradia energia na mesma taxa que a absorve do contrário ele esquentaria ou esfriaria, e sua temperatura variaria. Na natureza não existem corpos negros perfeitos, já que nenhum objeto consegue ter absorção e emissão perfeitas. Todos os corpos negros, em uma mesma temperatura, emitem radiação térmica de mesmo espectro.

Um corpo negro pode ser idealizado por uma cavidade ressonante dotada de um pequeno orifício como mostrado na Figura 2.15. Praticamente, toda a radiação, vinda do meio externo, que entra na cavidade através do orifício, não conseguindo sair dela, acaba sendo absorvida pelas suas paredes. Por causa das agitações térmicas, as partículas carregadas que compõem as paredes da cavidade ressonante, oscilam e produzem radiação térmica. A radiação térmica emitida através do orifício da cavidade ressonante é denominada de radiação de cavidade e tem característica espectral de radiação de corpo negro, conforme LIMA, 2013.

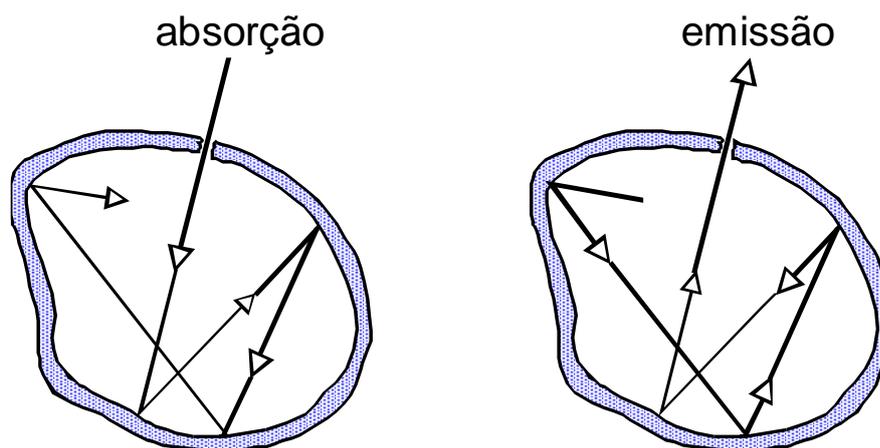


Figura 2.15 - Cavidade ressonante com um pequeno orifício que se comporta como um corpo negro ideal, adaptado de LIMA, 2013.

Nesta época Maxwell realizou notáveis pesquisas sobre o eletromagnetismo e mostrou que ondas eletromagnéticas, que são ondas transversais, se propagam em termos das constantes fundamentais do eletromagnetismo, calculando que a

velocidade resulta muito próxima à da velocidade da luz. Em 1864, unificando as leis de Coulomb, Ampère, Faraday e Lenz, desenvolveu as equações fundamentais do eletromagnetismo, conhecidas hoje como Equações de Maxwell.

Buscando explicar a natureza da luz, Maxwell propôs a teoria de que a luz seria constituída por ondas eletromagnéticas transversais em um meio hipotético denominado "ether" (éter), um meio invisível que envolveria todos os objetos e com isso conseguiu explicar muitos fenômenos, como o modo de sua propagação. As diferentes radiações visíveis (cores) e invisíveis (raios gama, raios X, ultravioleta, infravermelho, etc.) distinguir-se-iam por possuírem comprimentos de onda e frequências diferentes.

Existiam alguns aspectos que a teoria de Maxwell não explicava, sendo que o principal tratava-se da cor que determinados objetos emitiam quando aquecidos, que será comentado a frente.

Em 1879, o físico e matemático austro-esloveno Josef Stefan (1835 - 1893), como resultado de seus estudos experimentais, mostrou que a potência total da radiação por unidade de área (hoje irradiância) emitida por um corpo negro é proporcional a quarta potência da temperatura absoluta do corpo. A mesma relação foi derivada em 1884 pelo físico austríaco Ludwig Eduard Boltzmann (1844 - 1906) a partir de considerações termodinâmicas. Com isso surgiu a Lei de Stefan-Boltzmann, que estabelece, que a energia total emitida/irradiada por unidade de área de superfície de um corpo negro em todos os comprimentos de onda por unidade de tempo é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura termodinâmica, dado pela equação 2.30, onde T é a temperatura termodinâmica do corpo e A uma constante de proporcionalidade.

$$E_{\lambda}(T) = AT^4 \quad 2.30$$

Curiosamente, Stefan nunca calculou um valor de A, mas a partir de uma análise direta do artigo de autoria de Stefan (STEFAN, 1879), pode ser facilmente determinado como $5,056 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, cerca de 11% abaixo do valor atualmente aceito do que agora é conhecida como constante de Stefan-Boltzmann, símbolo σ de acordo com (CREPEAU, 2009; STEFAN, 1879).

De forma empírica, o físico germânico Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864 - 1928) descobriu que o comprimento de onda de emissão máxima de

radiação de um corpo negro se relaciona com a temperatura e publicou em 1896 um artigo, WIEN, 1896, onde afirma que a radiância espectral da radiação de corpo negro por unidade de comprimento de onda atinge o pico no comprimento de onda λ_{pico} dado pela equação 2.31, onde T é a temperatura absoluta do corpo e b é uma constante de proporcionalidade.

$$\lambda_{\text{pico}} = \frac{b}{T} \quad 2.31$$

A equação 2.31 foi referida pela primeira vez como a Lei do Deslocamento de Wien pelo pelos físicos germânicos Otto Richard Lummer (1860 - 1925) e Ernest Pringheim (1859 - 1917), que também calcularam a constante b como sendo 0,294 (cm·K), dito em CREPEAU, 2009. Lummer e Pringsheim também fizeram uma série de experimentos para determinar com mais precisão o valor da constante de Stefan - Boltzmann.

Wien foi contemplado com o Premio Nobel de Física em 1911, pela descoberta das leis da irradiação do calor. Nas palavras de seu colega o físico germânico Max von Laue (18979 - 1960), Premio Nobel de Física em 1914, “sua glória imortal” foi que ele “nos conduziu aos próprios portões da física quântica” de acordo com CREPEAU, 2009.

A Figura 2.16 mostra os resultados experimentais da intensidade espectral como função do comprimento de onda, obtidos por Lummer e Pringsheim no final de 1899.

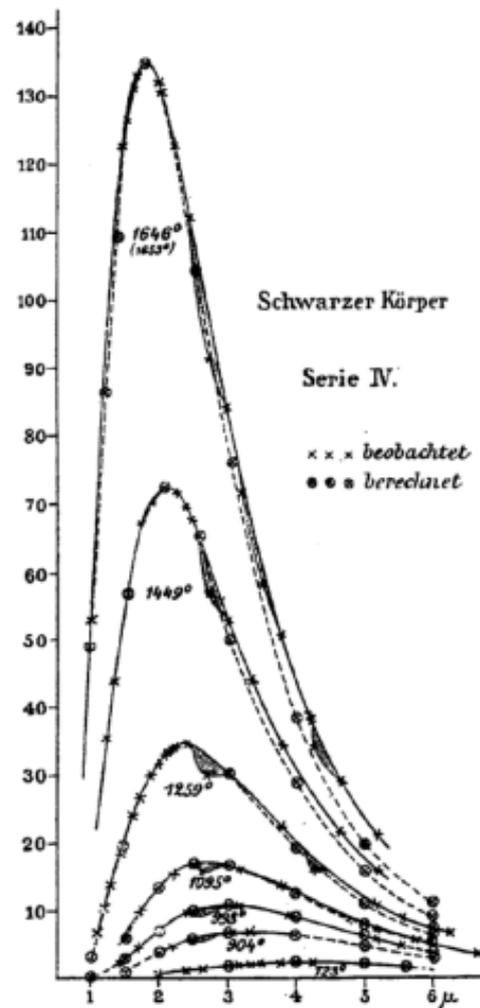


Figura 2.16 - Intensidade espectral como função do comprimento de onda obtida por Lummer e Pringsheim em novembro de 1899, adaptado de CREPEAU, 2009.

A expressão da Lei de Wien ajustou-se satisfatoriamente aos resultados experimentais 'preliminares' mostrados na Figura 2.16 sendo apresentado na Figura 2.17 de forma mais didática.

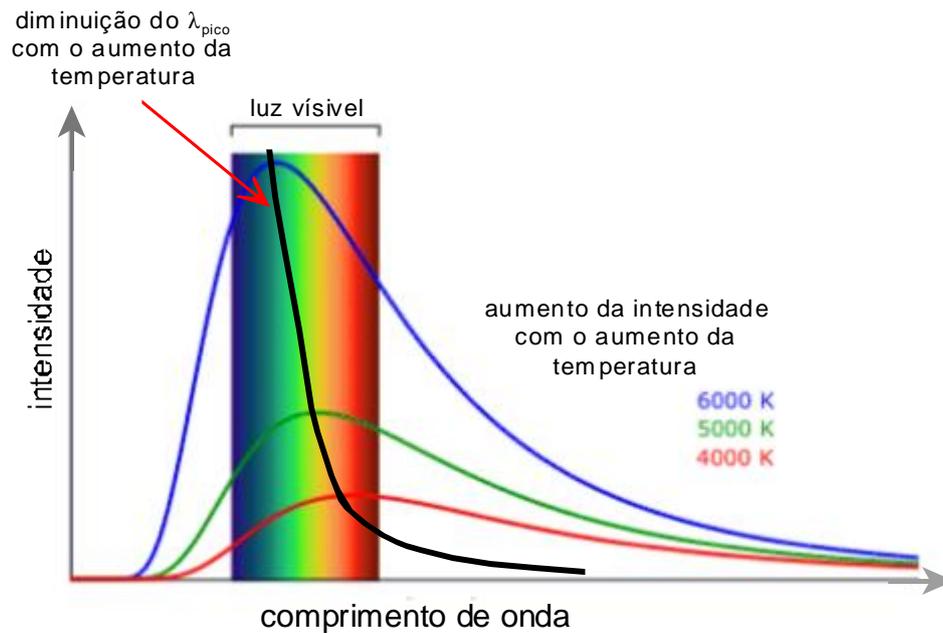


Figura 2.17 - Diagrama mostrando a mudança na radiação do corpo negro para objetos com temperaturas diferentes, adaptado de “Wien's Law vs. Stefan-Boltzmann Law”, 2022.

O comprimento de onda do pico da curva de radiação do corpo negro diminui de forma linear à medida que a temperatura aumenta (lei do deslocamento de Wien). Essa variação linear não é evidente no gráfico da Figura 2.17, pois a intensidade aumenta com a quarta potência da temperatura (lei de Stefan - Boltzmann). A natureza da mudança de comprimento de onda de pico é tornada mais evidente plotando a quarta raiz da intensidade.

No cotidiano observam-se algumas situações que podem ser descritas pela Lei de Wien como a clássica experiência de aquecer um metal. Aquecendo por exemplo, um prego de ferro com maçarico de propano, mostrado na Figura 2.18, à medida que sua temperatura aumenta sua cor muda. Inicialmente fica vermelho quando os comprimentos de onda visíveis mais longos aparecem que corresponde a parte media do prego não sendo atingida diretamente pela chama, depois se torna alaranjado à medida que a temperatura aumenta, na parte superior do prego e, em temperaturas muito altas, resulta em um branco quente com comprimentos de onda cada vez mais curtos e, em temperaturas extremamente elevadas, o branco fica ligeiramente azul, passando a predominar no espectro de emissão do corpo negro. Na parte de baixo do prego a irradiação corresponde à faixa do infravermelho, sendo de cor preta na figura porque as câmeras normais não conseguem registrar esta radiação. Cabe observar que a cor azul da chama não se deve à radiação do corpo

negro, pois sendo a temperatura do maçarico de cerca de 3.000K, a chama deveria brilhar em amarelo, mas a reação química que ocorre emite uma radiação azul muito mais forte, mascarando o brilho amarelo fraco, apresentado em “Black body radiation and color temperature”, 2023.



Figura 2.18 - Prego aquecido por um maçarico, apresentado em “Black body radiation and color temperature”, 2023.

De acordo com a Física Clássica, e aí se inclui a teoria ondulatória de Maxwell, um corpo negro ideal em equilíbrio térmico deve emitir certa quantidade de energia em cada frequência. Neste caso, quando se calcula a quantidade total de energia emitida para comprimentos de onda elevados, ou seja, baixas frequências, os resultados experimentais estão de acordo com a teoria. Já para comprimentos de ondas pequenos, ou seja, altas frequências, a intensidade da radiação emitida tende para o infinito, que não concorda com os resultados obtidos experimentalmente.

Esta situação foi denominada catástrofe do ultravioleta, também chamada catástrofe de Rayleigh-Jeans, sendo uma falha da teoria clássica do eletromagnetismo para explicar a emissão eletromagnética de um corpo negro em equilíbrio térmico com o ambiente. O termo catástrofe do ultravioleta foi primeiramente usado em 1911, apesar do conceito já ser utilizado em 1900 com a aplicação da Lei de Rayleigh-Jeans e a palavra ultravioleta refere-se ao fato de que

o problema aparece na região de pequeno comprimento de onda do espectro eletromagnético.

A Figura 2.19 ilustra esta situação, onde é mostrado a irradiância do corpo negro em função da frequência. A curva pontilhada corresponde a Lei Clássica de Rayleigh-Jeans, não apresentada neste trabalho, que funciona bem para frequências baixas e a linha contínua resultados obtidos experimentalmente. A Lei de Rayleigh - Jeans usava argumentos da Física Clássica e descrevia a radiação espectral eletromagnética de todos os comprimentos de onda de um corpo negro a uma temperatura dada.

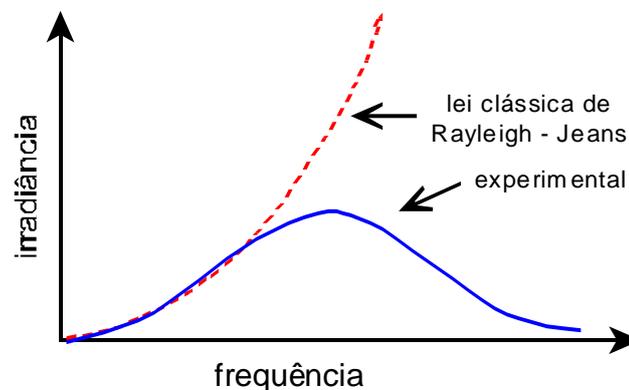


Figura 2.19 - Irradiância em função da frequência para radiação do corpo negro, adaptado de “Estatística da Radiação - Lei de Planck”, 2016.

A explicação para este problema foi dada pelo físico germânico Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 - 1947) e levou ao surgimento da Física Quântica.

Nos últimos anos do século XIX, Planck fez algumas tentativas de ajuste da curva experimental mostrada na Figura 2.16 sempre com diversos problemas, e sem justificativas físicas mais concretas. No segundo semestre de 1900, em comunicado a Sociedade Alemã de Física, Planck propôs uma fórmula matemática que se ajustava muito bem aos dados experimentais, bem melhor do que outras propostas, explicando o comportamento da irradiância a baixas quanto a altas frequências. Pouco antes do Natal de 1900, Planck apresentou uma comunicação em que esboçava justificativas da sua fórmula empírica.

Uma das justificativas, Planck postulou que a radiação eletromagnética absorvida ou emitida por um corpo aquecido, não ocorre sob a forma de ondas, mas de forma descontínua por meio de pequenos “pacotes” de energia, chamados *quantum*, plural *quanta*, palavra originária do latim que significa quantidade,

literalmente quanto, passando a ideia de unidade mínima, indivisível, cada um com energia (E) proporcional à sua frequência (ν), dado pela equação 2.32, onde h é chamada constante de Planck, que na época foi estimada como, $6,55 \times 10^{-34}$ (J.s), com uma incerteza de cerca de 1%.

$$E = h\nu \quad 2.32$$

Este é o menor valor de um quantum, assim, todos os valores de energia devem ser múltiplos e inteiros desse valor, o que significa dizer que não é possível ter uma energia de 0,3E ou 1,7E, mas sim, de 2E, 3E, ..., nE, onde n é um número inteiro.

De forma mais geral, envolvendo o colocado acima, a equação 2.32 pode ser reescrita como a equação 2.33, onde $n = 0, 1, 2, \dots$, é um número inteiro positivo.

$$E = nh\nu \quad 2.33$$

Cabe observar que o conceito de um “*quantum* finito de energia”, quase sempre atribuída a Planck, aparece no artigo de Wien de 1893 (CREPEAU, 2009).

Atualmente um quantum é chamado de um fóton.

No artigo de 1901, denominado *Über des Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum, Annalen der Physik*, PLANCK, 1901, (Sobre a Lei de Distribuição de Energia no Espectro Normal) Planck apresentou com detalhes uma justificativa física e completa de sua expressão para obter a radiância espectral em função da frequência e da temperatura termodinâmica de um corpo negro, chamada de Lei de Planck, ou Lei de Planck da Radiação, sendo dada pela expressão apresentada na equação 2.34.

$$L_e(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} \quad 2.34$$

onde $L_e(\nu, T)$ é a radiância espectral dada em $W m^{-2} sr^{-1} Hz^{-1}$, ν a frequência dada em (Hz), T a temperatura do corpo negro dado em (K), c a velocidade da luz no vácuo dado em ($m s^{-1}$), h a constante de Planck já referenciada e k_B a constante de Boltzmann, que na época Planck obteve como $1,346 \times 10^{-16}$ erg K^{-1} conforme STUDART, 2000.

O comprimento de onda está relacionado com a frequência de acordo com a

equação 2.23, que substituindo na equação 2.34 resulta na equação 2.35 para a Lei de Planck, sendo $L_e(\lambda, T)$ a radiância espectral dada em $W m^{-2} sr^{-1} m^{-1}$.

$$L_e(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k_B \lambda T}} - 1} \quad 2.35$$

Em função do número de onda a Lei de Planck pode ser escrita como mostrado na equação 2.36, obtido a partir das equações 2.25 e 2.34, tendo como unidade $J m m^{-3}$.

$$L_e(\kappa, T) = \frac{2hc^2 \kappa^3}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc\kappa}{k_B T}} - 1} \quad 2.36$$

Em termos de energia espectral a Lei de Planck pode ser escrita como mostrado na equação 2.37, obtido a partir das equações 2.22 e 2.34, tendo como unidade $W m m^{-2} sr^{-1}$.

$$u(\nu, T) = \frac{4\pi}{c} L_e(\nu, T) = \frac{4\pi}{c} \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} \quad 2.37$$

A energia espectral dada na equação 2.37 também pode ser expressa como função do comprimento de onda de acordo com a equação 2.38, tendo como unidade $J m^{-3} m^{-1}$.

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k_B \lambda T}} - 1} \quad 2.38$$

Quando $\nu \rightarrow 0$, que corresponde que $\lambda \rightarrow \infty$, tomando o limite nas equações 2.34 ou 2.35 e aplicando L'Hopital chega-se que $L_e \rightarrow 0$.

Em baixas frequências, que corresponde a comprimentos de onda elevados, aplicando o desenvolvimento em série no termo exponencial da equação 2.34 e observando que $h\nu \ll kT$ a Lei de Planck resulta na equação 2.39 que corresponde a lei de Rayleigh-Jeans.

$$L_e(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{1 + \left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) + \frac{1}{2!}\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right)^2 + \dots - 1} =$$

$$\approx \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\frac{h\nu}{k_B T}} \approx \frac{2\nu^2}{c^2} k_B T$$
2.39

Quando $\nu \rightarrow \infty$, que corresponde que $\lambda \rightarrow 0$, tomando o limite na equação 2.34 ou 2.35 e aplicando L'Hopital chega-se que $L_e \rightarrow 0$ exponencialmente.

Uma comparação da lei de Planck com suas aproximações de alta frequência (Wien) e baixa frequência (Rayleigh-Jeans) está mostrada na Figura 2.20.

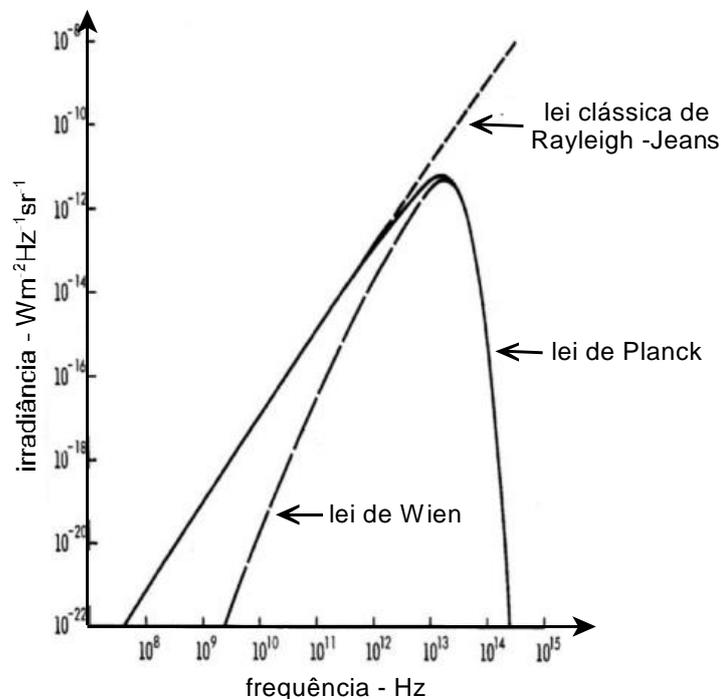


Figura 2.20 - Comparação da lei de Planck com suas aproximações de baixa frequência (lei de Rayleigh-Jeans) e alta frequência (lei de Wien) a 300 K, adaptado de FAIZAN, 2020.

Evidentemente, a localização do pico da distribuição espectral pela lei de Planck depende da escolha da variável espectral. No entanto, de certa forma, esta fórmula significa que a forma da distribuição espectral é independente da temperatura, de acordo com a lei de deslocamento de Wien.

O desenvolvimento feito por Planck foi a base da teoria quântica, que surgiu dez anos depois com a colaboração de Albert Einstein e Niels Bohr, que receberam o Premio Nobel de Física em 1921 e 1922, respectivamente.

Alguns anos mais tarde, em 1918, Planck recebeu o Prêmio Nobel de Física pelos seus estudos e contribuições na área de Física Quântica.

As constantes σ , b , h e k_B foram obtidas na época de sua concepção por meio experimentais e com o passar do tempo seus valores foram sendo atualizados devido a novas técnicas desenvolvidas para suas obtenções.

Em 16/11/2018, na 26ª reunião da *Conférence générale des poids et mesures* - CGPM (Conferência Geral de Pesos e Medidas) ocorrida em Versalhes, França, foi votado e aprovado que doravante todas as unidades do SI passam a ser definidas em termos de constantes fundamentais da natureza. Isso garante a estabilidade do SI para as futuras gerações e possibilita seu uso para o desenvolvimento de novas tecnologias, incluindo tecnologias quânticas. As mudanças entraram em vigor em 20 de maio de 2019, data em que se comemora o Dia Mundial da Metrologia, sendo o 144º aniversário da Convenção do Metro.

As constantes fundamentais da natureza são quantidades físicas que aparecem em equações fundamentais da física, e cujos valores são considerados fixos e universais em todo o universo. Essas constantes são consideradas fundamentais porque elas descrevem características básicas do mundo físico e não podem ser derivadas a partir de outras grandezas físicas mais básicas.

O *Committee on Data for Science and Technology* - CODATA (Comitê de Dados para Ciência e Tecnologia) é um comitê interdisciplinar internacional que tem como objetivo fornecer avaliações críticas e atualizadas de valores numéricos de constantes físicas fundamentais e outras propriedades físicas de interesse para a ciência e tecnologia. O CODATA é gerenciado pela *International Council for Science* (ICSU) e tem sido um recurso importante para a comunidade científica há mais de 50 anos, descrito em “About CODATA”, 2023.

As avaliações do CODATA são atualizadas regularmente, com o objetivo de fornecer os valores mais precisos e atualizados possíveis para as constantes físicas. A última atualização foi realizada em 2018, com a publicação do relatório CODATA 2018, que apresenta os valores recomendados mais recentes para as constantes físicas fundamentais, descrito em “About CODATA”, 2023.

A constante de Planck é considerada uma constante fundamental da natureza e seu valor é dado exatamente pela equação 2.40.

$$h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ (Js)} \quad 2.40$$

A constante de Boltzmann também é considerada uma constante fundamental da natureza e seu valor é dado exatamente pela equação 2.41.

$$k_B = 1,380649 \times 10^{-23} \left(\frac{\text{J}}{\text{K}} \right) \quad 2.41$$

A constante de Wien não é uma constante fundamental da natureza, sendo uma constante derivada e seu valor é dado pela equação 2.42, definida pelo CODATA em 2018 na referência “CODATA RECOMMENDED VALUES OF THE FUNDAMENTAL PHYSICAL CONSTANTS: 2018”, 2018.

$$b = 2.897771955 \dots \times 10^{-3} \text{ (mK)} \quad 2.42$$

A constante de Stephan-Boltzmann também não é uma constante fundamental da natureza e seu valor é dado pela equação 2.43, definida pelo CODATA em 2018 em “CODATA RECOMMENDED VALUES OF THE FUNDAMENTAL PHYSICAL CONSTANTS: 2018”, 2018.

$$\sigma = 5,670374419 \dots \times 10^{-8} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \right) \quad 2.43$$

2.6. Disponibilidade de Energia Solar no Topo da Atmosfera Terrestre

A taxa de energia emitida pelo Sol é aproximadamente constante há bilhões de anos e pode ser medida, estimada ou obtida por fórmulas físicas.

Medir a energia na superfície do Sol diretamente é um desafio, já que essa é uma região extremamente quente e nenhum instrumento ou nave espacial ainda foi capaz de resistir às condições lá presentes.

Por outro lado, a estimativa da energia na superfície do solo feita daqui da Terra, já não é uma tarefa impossível e foi realizada por vários cientistas.

Talvez a primeira medição quantitativa da radiação solar que atinge a Terra tenha sido realizada, no início do século XIX, pelo o físico francês Claude Servais Mathias Pouillet (1690 - 1868) e pelo polímata, matemático, astrônomo, químico,

inventor e fotógrafo experimental inglês John Frederick William Herschel (1792 - 1891), descrito em KIDWELL, 1981.

Em 1838, Herschel estimou a energia na superfície do Sol usando um método indireto que envolveu medir o diâmetro aparente do Sol e a temperatura da luz solar. Para medir o diâmetro usou técnica do trânsito que envolve a observação do tempo que leva para o Sol cruzar o meridiano local em 16/08/1837 quando o Sol estava próximo do equador celeste, e encontrou um valor de 32 minutos de arco. Para medir a temperatura da luz solar usou um termômetro colocado dentro de uma caixa preta, exposta diretamente ao Sol, e medindo a variação da temperatura ao longo do dia. Herschel encontrando cerca de 57°C. Herschel assumiu que a energia total emitida pelo Sol por unidade de área na superfície era proporcional à quarta potência da temperatura da luz solar e com isso estimou que a energia total emitida pelo Sol por unidade de área na superfície era de cerca de $2,94 \times 10^6 \text{ W m m}^{-2}$, KIDWELL, 1981.

Também a potência emitida pelo Sol pode ser estimada a partir da Lei de Stefan - Boltzmann dada na equação 2.30. Para isto é necessário conhecer o diâmetro D_{\square} e a temperatura da superfície do Sol, T_{\square} .

Como o Sol é um corpo fluido em rotação, a passagem do fluxo do interior para as camadas gasosas externas é progressiva e o diâmetro solar precisa de uma definição. A definição mais comumente usada estipula que o raio do Sol é definido como a meia distância entre os pontos de inflexão da função de borda de escurecimento do membro, em duas extremidades opostas de uma linha que passa pelo centro do disco. Outras definições podem ser usadas, por exemplo, a localização do membro no mínimo de temperatura, ou um nível equipotencial de gravidade que define a forma externa, etc. conforme ROZELOT; KOSOVICHEV; KILCIK, 2016.

O tamanho do diâmetro do Sol tem sido debatido por muito tempo. Abordado pela primeira vez pelos astrônomos gregos do ponto de vista geométrico, foi determinada uma estimativa, embora incorreta, que não foi verdadeiramente questionada por vários séculos. Aristarco de Samos (cerca de 310 - 230 aC), por meio de um procedimento geométrico brilhante, ainda em ROZELOT; KOSOVICHEV; KILCIK, 2016, foi capaz de estabelecer o diâmetro solar como a

720ª parte do círculo zodiacal, ou 30' de arco. Alguns anos depois, Arquimedes de Siracusa (por volta de 287 - 212 aC) escreveu no *Psammites* (Contador de Areia) que o diâmetro aparente do Sol parecia estar entre a 164ª e a 200ª parte do ângulo reto e, portanto, o diâmetro solar poderia ser estimado entre 27' e 32'56". Curiosamente, tais valores não foram verdadeiramente questionados durante vários séculos, exceto durante o século XIV sob o impulso da Escola Marãgha (Irã) quando o astrônomo e matemático sírio Ibn-al-Shatir (1304 - 1375) escreveu em seu livro *kitab nihayat al-sul fi tashih al-usul* (A Busca Final Sobre a Retificação dos Princípios) que o diâmetro solar varia de 29'5" (no apogeu) a 32'32" (no perigeu), resultando em uma razão de 0,913, cerca de 6% da melhor estimativa atual que é 0,967, ROZELOT; KOSOVICHEV; KILCIK, 2016.

O crédito pela primeira medição precisa do diâmetro aparente do Sol geralmente é atribuído ao astrônomo e clérigo inglês Jeremiah Horrocks (1618 - 1641), que o fez em 1639. Horrocks observou o trânsito de Vênus em frente ao Sol e usou essa ocasião rara para medir o diâmetro aparente do Sol. Com a ajuda de suas observações, Horrocks pôde estabelecer o diâmetro aparente de Vênus como 1º12' de arco, em comparação com o diâmetro do Sol de 30' de arco, conseguindo estimar o diâmetro solar em cerca de 1,4 milhão de quilômetros. O relato da experiência foi feito no livro *Vênus in Sole Visa* (Vênus na Face do Sol), publicado postumamente em 1662 conforme OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2019.

Em 1656, o astrônomo e padre católico Giovanni Battista Riccioli (1598 - 1671) ao revisar as medidas do diâmetro solar, relatou um limite inferior de 30'30" (dado por Kepler) e um limite superior de 32'44" (dado por Copérnico). Por fim, a escola francesa liderada pelos astrônomos e religiosos franceses Gabriel Mouton (1618 - 1694) e Jean Picard (1620 - 1682) pode ser considerada pioneira neste campo, pois os dois astrônomos conseguiram relatar as primeiras medições do raio solar com uma precisão astrométrica moderna (0,8%). Picard em 06/03/1670 realizou a medição do diâmetro do Sol usando a técnica de paralaxe. Picard observou o Sol de dois locais diferentes na França e mediu a diferença angular na posição aparente do Sol. Com base nessa diferença, ele calculou o diâmetro aparente do Sol em cerca de 32' de arco, ROZELOT; KOSOVICHEV; KILCIK, 2016.

Desde então, muitos outros astrônomos usaram várias técnicas para medir o diâmetro do Sol, incluindo observações de trânsito, fotometria, interferometria,

observações de telescópio, etc.

Atualmente, a medida aceita para o diâmetro do Sol é baseada em observações e medições recentes, realizadas com tecnologias de ponta. No entanto, essa medida é constantemente reavaliada e atualizada conforme novas tecnologias e técnicas de medição se tornam disponíveis.

O diâmetro atualmente aceito para o Sol é dado na equação 2.44.

$$D_{\odot} = 1.392.684 \pm 130 \text{ (km)} \quad 2.44$$

Este valor está apresentado no artigo *Measuring the Solar Radius from Space during the 2003 and 2006 Mercury Transits*, publicado em 2012 (EMILIO *et al.*, 2012), dos pesquisadores Marcelo Emilio, Jeffrey Richard Kuhn, Isabelle F. Scholl e Rock I. Bush do Instituto Mānoa da Universidade do Havaí. Cabe destacar que Marcelo Emílio é brasileiro.

A medida do diâmetro do Sol foi feita com um espectrômetro de imagem de alta resolução denominado *Michelson Doppler Imager* - MDI, situado na sonda espacial *Solar and Heliospheric Observatory* - SOHO da NASA, a partir da cronometragem do trânsito do planeta Mercúrio na face do Sol nos dias 07/05/2003 e 08/11/2006.

Embora o tempo de trânsito de Mercúrio com o Sol tem sido usado desde o século XVII para derivar o seu tamanho, esta foi a primeira vez que imagens de alta qualidade do espaço, acima da atmosfera da Terra, estão disponíveis. Ao contrário de outras medições, esta técnica é amplamente independente da distorção óptica.

Como não há atmosfera no espaço para distorcer a imagem solar, os pesquisadores foram capazes de usar a excelente sensibilidade de imagem para medir a forma solar com precisão sem precedentes. Os resultados indicam que se o Sol fosse reduzido a uma bola de um metro de diâmetro, seu diâmetro equatorial seria apenas 17 milionésimos de metro maior que o diâmetro através de seu polo norte - sul, que é seu eixo de rotação.

Eles também descobriram que o achatamento solar é notavelmente constante ao longo do tempo e muito pequeno para concordar com o previsto pela rotação de sua superfície. Isso sugere que outras forças subterrâneas, como magnetismo solar ou turbulência, podem ser uma influência mais poderosa do que o esperado.

Usando D_{\odot} a área da superfície solar S_{\odot} resulta no valor dado na equação 2.45.

$$S_{\odot} = \pi (D_{\odot})^2 = \pi [1.392.684 \pm 130 \text{ (km)}]^2 = (6.093,3 \pm 1,1) \times 10^{15} \text{ (m}^2\text{)} \quad 2.45$$

As estimativas antigas e modernas da temperatura da superfície do Sol, T_{\odot} , são baseadas em comparações com a radiação do corpo negro.

Denomina-se temperatura efetiva de uma estrela a temperatura de um corpo negro ideal que irradia a mesma quantidade de energia por unidade de área que a estrela.

A temperatura efetiva do Sol foi determinada usando várias técnicas ao longo do tempo. Uma das primeiras formas de se estimar essa temperatura foi através da observação do espectro solar, ou seja, da luz que o Sol emite em diferentes comprimentos de onda. A cor da luz que uma estrela emite está relacionada com a sua temperatura, o que significa que pode ser determinada a temperatura efetiva do Sol medindo a quantidade de luz que ele emite em cada comprimento de onda e comparando o espectro resultante com modelos.

Em 1859, Kirchhoff descobriu que o espectro do Sol continha linhas escuras em certas partes do espectro, que são agora conhecidas como linhas de absorção. Essas linhas são causadas pela absorção de luz por elementos químicos na atmosfera do Sol e fornecem informações sobre a temperatura e a composição do mesmo. Cabe observar que Kirchhoff não estimou a temperatura efetiva do Sol conforme a publicação “Gustav Kirchhoff (1824-1887)”, 2023.

Mais tarde, em 1904, o astrofísico norte-americano Charles Greeley Abbot (1872 - 1973) desenvolveu um método para medir a temperatura da superfície do Sol usando um pireliômetro, instrumento que mede a quantidade de energia solar que atinge uma superfície plana, sendo as medições usadas para estimar a temperatura da fotosfera do Sol, que resultou em cerca de 5.700 °C, de acordo com a publicação Charles Greeley Abbot, 1872-1973, 2011.

Em 1920, o astrônomo britânico Arthur Stanley Eddington (1882 - 1944) usou observações de um eclipse solar para estimar a temperatura da superfície do Sol. Ele usou a teoria da relatividade de Einstein para calcular a curvatura da luz estelar que passava perto do Sol e comparou os resultados com observações feitas durante

o eclipse. Com base em seus cálculos estimou que a temperatura da superfície do Sol fosse cerca de 6.000 °C conforme DYSON; EDDINGTON; DAVIDSON, 1920.

Desde então, os astrônomos desenvolveram várias técnicas para medir a temperatura do Sol, incluindo medições do espectro solar, análise de imagens de alta resolução da superfície solar, observações diretas da fotosfera usando telescópios solares e sondas espaciais que medem as propriedades da coroa solar, entre outros. As diferentes técnicas fornecem uma visão mais completa da distribuição de temperatura na atmosfera solar e ajudam a entender as complexas interações físicas que ocorrem no Sol.

A temperatura efetiva do Sol é dada na equação 2.46 e foi definida pela *International Astronomical Union* - IAU (União Astronômica Internacional) na sua XXVII Assembleia Geral realizada em 13/08/2009, no Rio de Janeiro, Brasil (MASAKI, CORBETT, 2015).

$$T_{\square} = 5.772 \pm 0,8 \text{ (K)} \quad 2.46$$

A IAU é a autoridade responsável por manter e aprovar dados e unidades em astronomia, além de nomenclatura de corpos celestes e outros padrões.

A Figura 2.21 mostra uma versão de alta resolução do espectro do Sol, criada a partir de um atlas digital observado com o Espectrômetro de Transformada de Fourier no telescópio refletor solar McMath - Pierce situado no Observatório Nacional de Kitt Peak, no Arizona, Estados Unidos, obtida em 30/11/2017. As imagens foram criadas para imitar um espectro *echelle* (padrão de linhas espectrais em seus diferentes comprimentos de onda), com comprimento de onda aumentando da esquerda para a direita ao longo de cada faixa e de baixo para cima. Cada uma das 50 fatias cobre 60 angstroms, para um espectro completo na faixa visual de 4.000 a 7.000 angstroms, conforme a publicação “Gustav Kirchhoff (1824-1887)”, 2023.

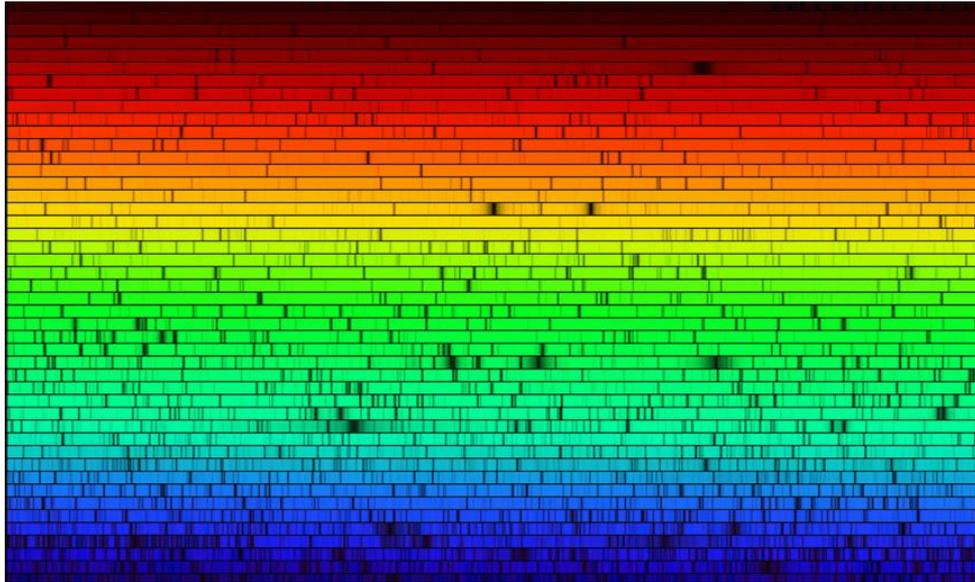


Figura 2.21 - Padrão espectral do Sol, obtido de “Sun’s Spectrum”, 2023.

Com T_{\square} definido pode-se então aplicar as equações 2.30 e 2.43 para obter a potência irradiada por unidade de área pelo Sol em sua superfície, E_{\square} , dado pela equação 2.47.

$$\begin{aligned} E_{\square} &= \sigma T^4 = \left[5,670374419 \dots \times 10^{-8} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \right) \right] \times [5.772 \pm 0,8 \text{ (K)}]^4 = \\ &= 62.938,5 \pm 34,9 \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right) \end{aligned} \quad 2.47$$

Com o valor de E_{\square} dado na equação 2.47, com a área da superfície do Sol, S_{\square} , dado na equação 2.45 e aplicando a equação 2.3 pode-se obter a potência total irradiada pelo Sol, Φ_{\square} , dado pela equação 2.48.

$$\begin{aligned} \Phi_{\square} &= E_{\square} \times S_{\square} = (62.938,5 \pm 34,9) \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right) \times (6.093,3 \pm 1,1) \times 10^{15} \text{ (m}^2\text{)} = \\ &= (3.835,0 \pm 2,8) \times 10^{23} \text{ (W)} \end{aligned} \quad 2.48$$

Esta potência irradiada pode ser considerada sendo gerada por uma fonte pontual localizada no centro do Sol com relação à Terra, pois as suas dimensões é muito menor que a distância da Terra ao Sol.

A potência irradiada irá se propagar pelo espaço, no caso o vácuo, um meio homogêneo e isotrópico, com a mesma velocidade em todas as direções.

Conseqüentemente, em cada instante, a frente de onda da potência terá

forma esférica constituindo esferas concêntricas imaginárias ao redor do Sol.

A área total da superfície esférica da frente de onda, corresponde a $4\pi r^2$, onde r é o raio da esfera e aumenta com o quadrado da distância (r^2) à fonte pontual como mostrado na Figura 2.22.

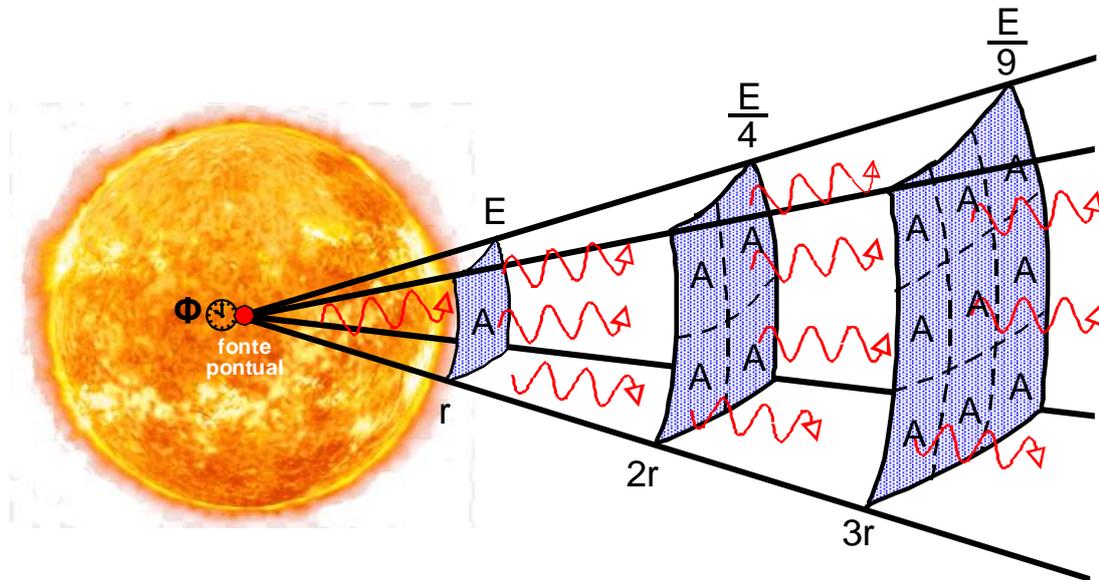


Figura 2.22 - Propagação da radiação do Sol a partir da consideração de uma fonte pontual, adaptado de SÁ *et al.*, 2016.

Assim, a energia proveniente da fonte pontual vai sendo transferida para uma área total cada vez maior, e enquanto a distância aumenta por um fator qualquer a irradiância, E , diminui pelo quadrado deste fator, ou seja, E é inversamente proporcional ao quadrado da distância do ponto até a fonte pontual.

A lei do inverso do quadrado é uma lei de grande utilidade na física e se aplica sempre que uma força, energia ou alguma outra quantidade conservada se propaga a partir de uma fonte pontual radialmente e uniformemente para todas as direções em um espaço tridimensional. A origem da lei do inverso do quadrado é puramente geométrica e apesar de muitos não a conhecerem pelo seu nome, ela é instintiva e natural conforme BARROZO, 2023.

Isso pode ser facilmente comprovado com uma lanterna. No escuro, ao iluminar um objeto próximo com a lanterna, a luz se espalha pouco e o objeto fica bem iluminado, incide muita luz sobre o mesmo e pouca sobre o ambiente. Já quando se ilumina um objeto mais longe, a luz se espalha muito pelo ambiente e acaba iluminando pouco o objeto.

Aplicando a lei acima para duas distâncias r_1 e r_2 da fonte solar, tem-se a equação 2.49.

$$\left. \begin{aligned} E_{r_1} &= \frac{\Phi_{\square}}{4\pi r_1^2} \rightarrow \Phi_{\square} = 4\pi r_1^2 E_{r_1} \\ E_{r_2} &= \frac{\Phi_{\square}}{4\pi r_2^2} \rightarrow \Phi_{\square} = 4\pi r_2^2 E_{r_2} \end{aligned} \right\} \Phi_{\square} = 4\pi r_1^2 E_{r_1} = 4\pi r_2^2 E_{r_2} \rightarrow E_{r_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2} E_{r_1} \quad 2.49$$

Aplicando a equação 2.49 para $r_1 = R_{\square}$ (raio do Sol) e $r_2 = D_{\oplus-\square}$ (distância do Sol a Terra) resulta a equação 2.50) que fornece a irradiância que chega a Terra, E_{\oplus} , vinda do Sol.

$$E_{\oplus} = \frac{R_{\square}^2}{D_{\oplus-\square}^2} E_{\square} \quad 2.50$$

O cálculo da distância Terra - Sol é uma questão antiga que intrigou os astrônomos por muitos séculos.

Uma das primeiras tentativas registradas para medir essa distância foi feita pelos antigos gregos por volta do século III aC.

O filósofo e matemático grego Aristarco de Samos propôs um método para medir a distância Terra-Sol baseado na observação do ângulo formado entre a Terra, a Lua e o Sol durante um eclipse lunar. Ele argumentou que, quando a Terra está entre o Sol e a Lua durante um eclipse, o ângulo entre a Terra e o Sol é o mesmo que o ângulo entre a Lua e a Terra, e a distância da Terra ao Sol pode ser calculada a partir daí usando trigonometria. No seu livro *Περὶ μεγεθῶν καὶ ἀποστημάτων* (O livro Sobre os Tamanhos e Distâncias do Sol e da Lua), que é atribuído a Aristarco, diz que a distância da Terra ao Sol é de 18 a 20 vezes a distância à Lua. A Figura 2.23 ilustra o comentado acima, obtido de *Astronomical unit*, 2023.

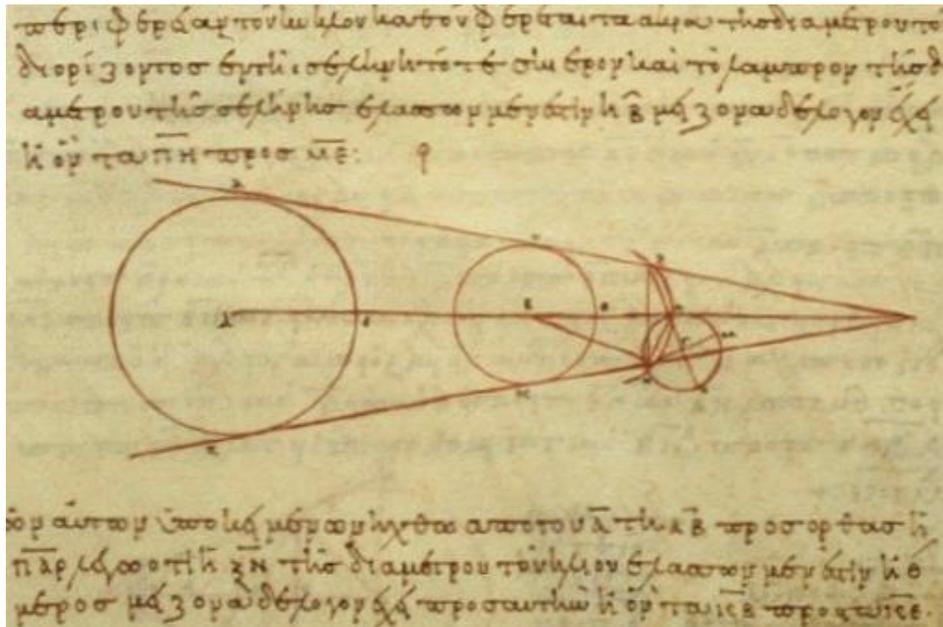


Figura 2.23 - Cálculos de Aristarco do século III a.C. sobre os tamanhos relativos, a partir da esquerda, do Sol, da Terra e da Lua, de uma cópia grega do século X dC, “On the Sizes and Distances (Aristarchus)”, 2020.

Ao longo dos séculos seguintes, vários outros astrônomos gregos propuseram métodos para medir a distância Terra - Sol, podendo-se citar, Arquimedes (século III aC), Hiparco (século II aC), Posidonius (século I aC) e Ptolomeu (século II dC).

Depois que a astronomia grega foi transmitida ao mundo islâmico medieval, os astrônomos não mudaram muito sua estimativa da distância Terra - Sol, podendo-se citar al-Farghānī (século IX dC), al-Battānī (século IX dC) e al-Bīrūnī (século IX dC) entre outros.

Mais tarde na Europa, destacam-se os astrônomos Copérnico (polonês, 1635), Tycho Brahe (século XVI, dinamarquês), Johannes Kepler (1609, germânico), Godefroy Wendelen (1635, flamengo), Jeremiah Horrocks (1639, inglês), Christian Huygens (1659, holandês), Giovanni D. Cassini e Jean Richer (1672, italiano e francês), John Flamsteed (1672, inglês), J. Jérôme L. Lalande (1771, francês), Simon Newcomb (1895, americano - canadense), Artur R. Hinks (1909, britânico), H. Spencer Jones (1941), Astronomical unit, 2023.

A Tabela 2.1 mostra valores da distância Terra - Sol estimado durante os séculos, em termos da paralaxe (mudança aparente do Sol em relação a um observador na Terra) e na relação com o raio da Terra.

Tabela 2.1- Estimativa da distância Terra – Sol, de acordo com Astronomical unit, 2019.

Quem estimou	Data da estimativa	Estimativa	
		Paralaxe	Raio da Terra
Aristarco	século III aC	13'24"- 7'12"	256,5 - 477,8
Arquimedes	século III aC	21'	10.000
Hiparco	século II aC	7'	490
Posidonius	século I aC	21'	10.000
Ptolomeu	século II dC	2'50"	1.210
al-Farghānī	século IX dC		120
al-Battānī	século IX dc		240
al-Bīrūnī	Século XI dC		38
Tycho Brahe	Século XVI		1.140
Copérnico	1635		6.540
Tycho Brahe	Século XVI		1.140
Kepler	1609		≈ 23.400
Wendelin	1635	15"	14.000
Horrocks	1639	15"	14.000
Christian Huygens	1659	8,2"	25.086
Cassini e Richer	1672	9,5"	21.700
Flamsteed	1672	9,5"	21.700
Lalande	1771	8,6"	24.000
Newcomb	1895	8,80"	23.440
Hinks	1909	8,807"	23.420
Spencer Jones	1941	8,790"	23.466

Ao longo do século XX, as medições e estimativas da distância Terra - Sol tornaram-se cada vez mais precisas e sofisticadas, e cada vez mais dependentes da observação acurada dos efeitos descritos pela teoria da relatividade de Einstein e das ferramentas matemáticas por ela utilizadas.

Em 1976, durante a XVI Assembleia Geral da IAU realizada em Grenoble, França foi definida formalmente a unidade astronômica, uma unidade de comprimento que se aproxima da distância Terra - Sol, com o símbolo AU para denotar um comprimento igual à unidade astronômica, IAU, 1976.

Na literatura astronômica, o símbolo AU era (e continua sendo) comum. Em

2006, o *Bureau International de Pesos e Medidas* - BIPM (Escritório Internacional de Pesos e Medidas) recomendou ua como símbolo para a unidade, do francês "unité astronomique", Astronomical unit, 2019.

A definição oficial da distância média entre a Terra e o Sol em uma Unidade Astronômica, símbolo oficial e único ua, foi adotada em 2012, durante a XXVIII Assembleia Geral da IAU realizada em Pequim, China. A decisão foi tomada em uma resolução intitulada *RESOLUTION B2 - on the re-definition of the astronomical unit of length* (RESOLUÇÃO B2 - sobre a redefinição da unidade astronômica de comprimento) de 31/08/2012. Esta definição é válida independentemente da escala de tempo utilizada, sendo dada pela equação 2.51) (IAU, 2012).

$$1 \text{ UA} = 1 D_{\oplus-\square} = 149.597.870.700 \text{ (m)} \quad \rightarrow \quad \text{por definição} \quad 2.51$$

Aplicando a equação 2.50) com E_{\square} dado pela equação 2.47, R_{\square} dado pela equação 2.44 e $e = D_{\oplus-\square} = 1 \text{ ua}$, dado pela equação 2.51) resulta na irradiância que chega a Terra, E_{\oplus} , apresentado na equação 2.52).

$$E_{\oplus} = \frac{[1.392.684 \text{ (km)}]^2}{[149.597.870.700 \text{ (m)}]^2} 62.938,5 \pm 34,9 \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right) = 1.376,7 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) \quad 2.52$$

Este valor é chamado de constante solar, que tem vários símbolos para sua representação e que será utilizada neste trabalho, G_{sc} , sendo definida como a energia do Sol por unidade de tempo recebida em uma unidade de área de superfície perpendicular à direção de propagação da radiação na distância média Terra - Sol fora da atmosfera.

Antes dos foguetes e dos satélites, as estimativas da constante solar tinham que ser feitas a partir de medições terrestres da radiação solar após ela ter sido transmitida pela atmosfera e, portanto, em parte absorvida e espalhada pelos componentes da atmosfera.

As extrapolações das medições terrestres feitas em altas montanhas foram baseadas em estimativas de transmissão atmosférica em várias porções do espectro solar conforme DUFFIE; BECKMAN, 2013.

Não se tem certeza, talvez a primeira medição quantitativa da constante solar tenha sido realizada por Pouillet em 1838. Usando um pireliômetro muito simples

que ele desenvolveu, ele obteve um valor de 1.228 W m^{-2} próximo da estimativa atual, dado em “Solar constant”, 2021. A partir de seus dados, ele calculou que a radiação solar anual seria suficiente para derreter uma camada de gelo de 14 m de espessura ao redor da Terra de acordo com KIDWELL, 1981.

Também em 1838, Herschel estava trabalhando no Cabo da Boa Esperança, realizando observações astronômicas, incluindo a produção de um catálogo de nebulosas. A partir dos dados coletados com um instrumento desenvolvido por ele, Herschel propôs uma unidade de radiação solar, a actina, que foi definida como a intensidade da radiação incidente verticalmente que derreterá uma camada de gelo de um micrômetro de espessura em um minuto. Ele calculou que a intensidade da radiação solar anual seria suficiente para derreter uma camada de gelo de 26,652 m de profundidade na superfície da Terra, KIDWELL, 1981.

Em 1875, o físico francês Jules Louis Gabriel Violle (1841 - 1923) retomou o trabalho de Pouillet e estimou um valor um pouco maior para a constante solar de 1.700 W m^{-2} baseada, em parte, em uma medição que ele fez do Mont Blanc na França, dado em “Solar constant”, 2021.

Em 1884, o astrônomo e físico norte-americano Samuel Pierpont Langley (1834 - 1906) tentou estimar a constante solar com medições no Monte Whitney, na Califórnia. Ao fazer leituras em diferentes momentos do dia, ele tentou corrigir os efeitos devido à absorção atmosférica, chegando ao final em um valor muito elevado de 2.903 W m^{-2} , “Solar constant”, 2021.

Entre 1902 e 1957, as medições de Abbot e outros em vários locais de grande altitude encontraram valores entre 1.322 e 1.465 W m^{-2} . Abbot mostrou que uma das correções de Langley foi aplicada erroneamente. Os resultados de Abbot variaram entre 1.318 a 1.548 W m^{-2} , uma variação que parecia ser devida ao Sol e não à atmosfera da Terra, “Solar constant”, 2021.

Esses estudos e medições posteriores foram resumidos pelo físico norte americano Richard Edwin Johnson em 1954; O valor dado por Abbot da constante solar de 1.322 W m^{-2} foi revisado para cima por Johnson para 1.395 W m^{-2} . Os resultados estão apresentados no artigo denominado *Radiation and Heat Balance of the Earth* (Radiação e balanço de calor na Terra) publicado no periódico científico *Proceedings of the American Philosophical Society*. Em seu artigo, Johnson calculou

a constante solar com base em dados de várias fontes, incluindo o observatório solar de Mount Wilson, na Califórnia, e a nave espacial V-2, que foi lançada em uma altitude de cerca de 100 km, DUFFIE; BECKMAN, 2013.

Embora o valor que Johnson obteve para a constante solar seja um pouco diferente do valor atualmente aceito, seu trabalho foi um marco importante na determinação da constante solar e contribuiu significativamente para o avanço do estudo da física solar, DUFFIE; BECKMAN, 2013.

Desde os cálculos de Johnson, houve inúmeras medições da constante solar, usando instrumentação mais precisa e técnicas mais precisas.

A disponibilidade de aeronaves, balões e espaçonaves em altitudes muito elevadas permitiu medições diretas da radiação solar fora da maior parte ou de toda a atmosfera terrestre. Essas medições foram feitas com uma variedade de instrumentos em nove programas experimentais separados. Eles resultaram em um valor da constante solar de $1,353 \text{ W m}^{-2}$ com um erro estimado de $\pm 1,5\%$. Este valor padrão foi aceito pela NASA em 1971 e pela *American Society of Testing and Materials* (Sociedade Americana de Testes e Materiais) em 2006.

Os dados nos quais o valor de 1.353 W m^{-2} foi baseado foram reexaminados por Claus Fröhlich em 1977, e com base em novos dados de radiômetros e satélites ele recomenda, no ano seguinte, um novo valor da constante solar de 1.373 W m^{-2} com um erro provável de 1 a 2%, DUFFIE; BECKMAN, 2013.

Medições adicionais de espaçonaves foram feitas e publicadas, podendo-se citar os artigos (WILLSON *et al.*, 1981), relatando 1.368 W m^{-2} , (HICKEY *et al.*, 1982) mencionando 1.373 W m^{-2} , e medições de três voos de foguetes (DUNCAN *et al.*, 1982) que foram de 1.367 , 1.372 e 1.374 W m^{-2} . O *World Radiation Center - WRC* (Centro Mundial de Radiação) adotou um valor de 1.367 W m^{-2} , com uma incerteza da ordem de 1%, DUFFIE; BECKMAN, 2013. Cabe destacar o capítulo denominado *Solar Irradiante* (Irradiância Solar), escrito por R.C.Wilson, do livro *Atlas of Satellite Observations Relate to Global Change* (Atlas de observações de satélite relacionadas à mudança global) (GURNEY; FOSTER; PARKINSON, 1993), onde é discutida a importância da medição da irradiância solar e a variedade de instrumentos e técnicas utilizados para sua medição. O autor também revisa as tendências observadas na irradiância solar e a influência do ciclo solar nas variações

a curto e longo prazo na radiação solar. Além disso, o artigo também discute a necessidade de monitorar a irradiância solar em relação às mudanças climáticas globais e as implicações das flutuações da radiação solar para o clima da Terra. Cabe destacar o artigo de WILLSON, 1984, onde é comentado a evolução dos experimentos de obtenção da irradiação solar e da utilização do pireliometro.

A constante solar não é uma constante física no sentido científico moderno da CODATA, ou seja, não é como a constante de Planck ou a velocidade da luz que são absolutamente constantes na física e por esta razão não tem um valor padronizado. A constante solar é uma média de um valor variável, sendo que nos últimos 400 anos, variou menos de 0,2% e a bilhões de anos atrás, era significativamente menor, “Solar constant”, 2021.

No trabalho de Christian A. Gueymard publicado no artigo *A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations* (Uma reavaliação da constante solar com base em uma série temporal de irradiância solar total de 42 anos e uma reconstrução de observações espaciais), GUEYMARD, 2018, é feita uma reavaliação da constante solar é realizada aqui para levar em conta o progresso na radiometria espacial que ocorreu desde o início dos anos 2000. Com base na reconstrução da constante solar resultante, foi obtido um valor da constante solar revisada de $1.361,1 \text{ W m}^{-2}$, com uma incerteza padrão de $0,5 \text{ W m}^{-2}$. A constante solar revisada é aproximadamente 5 W m^{-2} menor que os valores anteriores promulgados nas normas ASTM E490-00a, 2006 e ISO 14222, 2022.

A Figura 2.24 obtida do artigo acima ilustra a série temporal da constante solar do modelo proxy e de dados de longo termo ACRIM durante 1976 - 2017. Modelo proxy é um modelo matemático que utiliza indicadores ou variáveis substitutas para estimar ou inferir um fenômeno ou variável de interesse e são frequentemente usados quando a variável de interesse não pode ser medida diretamente ou é muito complexa ou cara de ser medida com precisão. Já os dados de longo termo ACRIM é um conjunto de dados que contêm a irradiância solar total medida por satélites ao longo de um período de tempo longo realizado por um grupo de pesquisa denominado ACRIM (*Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor*). A linha horizontal em $1.361,1 \text{ W m}^{-2}$ indica a constante solar revisada.

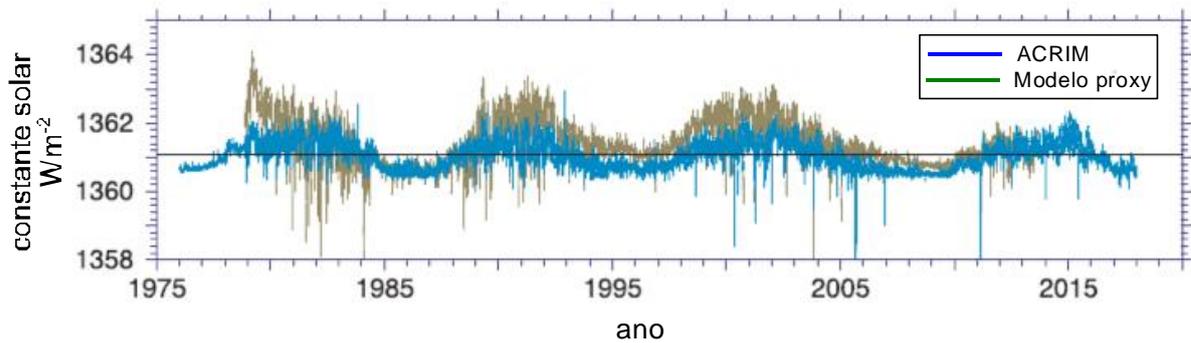


Figura 2.24 - Série da constante solar dados ACRIM e modelo proxy, adaptado de GUEYMARD, 2018.

Vale lembrar que o valor da constante solar pode variar ligeiramente ao longo do tempo, devido à atividade solar e outras influências. Por isso, é importante consultar a fonte mais atualizada e confiável para obter o valor mais preciso e atualizado da constante solar.

Dois fontes de variação na irradiação que chega do Sol e, portanto na constante solar, devem ser consideradas. A primeira, que já foi comentada, é a variação temporal da radiação emitida pelo Sol. Existem relatos conflitantes na literatura sobre variações periódicas da radiação solar intrínseca. Tem sido sugerido que existem pequenas variações (menos de $\pm 1,5\%$) com diferentes periodicidades e variações relacionadas às atividades das manchas solares (até $0,2\%$). Outros consideram as medições inconclusivas ou não indicativas de variabilidade regular. Para fins de engenharia e no uso da energia solar, tendo em vista as incertezas e variabilidade da transmissão atmosférica, a energia emitida pelo Sol pode ser considerada fixa, DUFFIE; BECKMAN, 2013.

A segunda fonte de variação na irradiação que chega do Sol está relacionada com a variação da distância Terra - Sol, que acarreta modificação da irradiância solar na faixa de $\pm 3,3\%$.

Esta variação está relacionada com a geometria Terra - Sol.

A Terra e a Lua giram com um período sideral, ou seja, relativo às estrelas, de 27,32 dias em torno de seu centro de gravidade comum, chamado baricentro da Lua Terrestre. Como a massa da Lua é apenas $1,23\%$ da massa da Terra, o baricentro (centro de massa) do conjunto Terra - Lua está muito mais próximo do centro da Terra do que do centro da Lua e situa a 4.671 km do centro da Terra, portanto

abaixo da superfície, STULL, 2017.

O baricentro Terra - Lua orbita em torno do Sol e ao mencionar Terra* no texto significa que está referindo ao baricentro do conjunto Terra - Lua.

A órbita da Terra* em torno do Sol é uma elipse e, portanto há momentos de maior aproximação e maior afastamento do Sol da Terra*.

O periélio e afélio são dois termos usados para descrever estes dois pontos extremos, sendo o periélio o ponto da órbita em que a Terra* está mais próxima do Sol e o afélio o ponto da órbita em que a Terra* está mais distante do Sol. O semieixo maior dessa órbita elíptica é definido como a metade do segmento de linha reta que une o periélio e o afélio. O centro do Sol encontra-se neste segmento de linha reta, mas não em seu ponto médio, ocupando um dos focos.

Por causa do movimento orbital da Terra*, o Sol parece mover-se em torno da esfera celeste levando um ano para completar uma revolução.

A Terra, por sua vez, gira ao redor de um eixo central, chamado eixo polar, completando uma volta por dia. Este eixo gira ao redor da normal ao plano da eclíptica, ou seja, polo norte celeste, com um ângulo constante e igual a $23,45^\circ$.

Em astronomia, eclíptica é a projeção sobre a esfera celeste da trajetória aparente do Sol observada a partir da Terra e equinócio é definido como o instante em que o Sol, em sua órbita aparente, cruza o equador celeste.

A Figura 2.25 ilustra a esfera celeste e o caminho aparente do Sol na eclíptica.

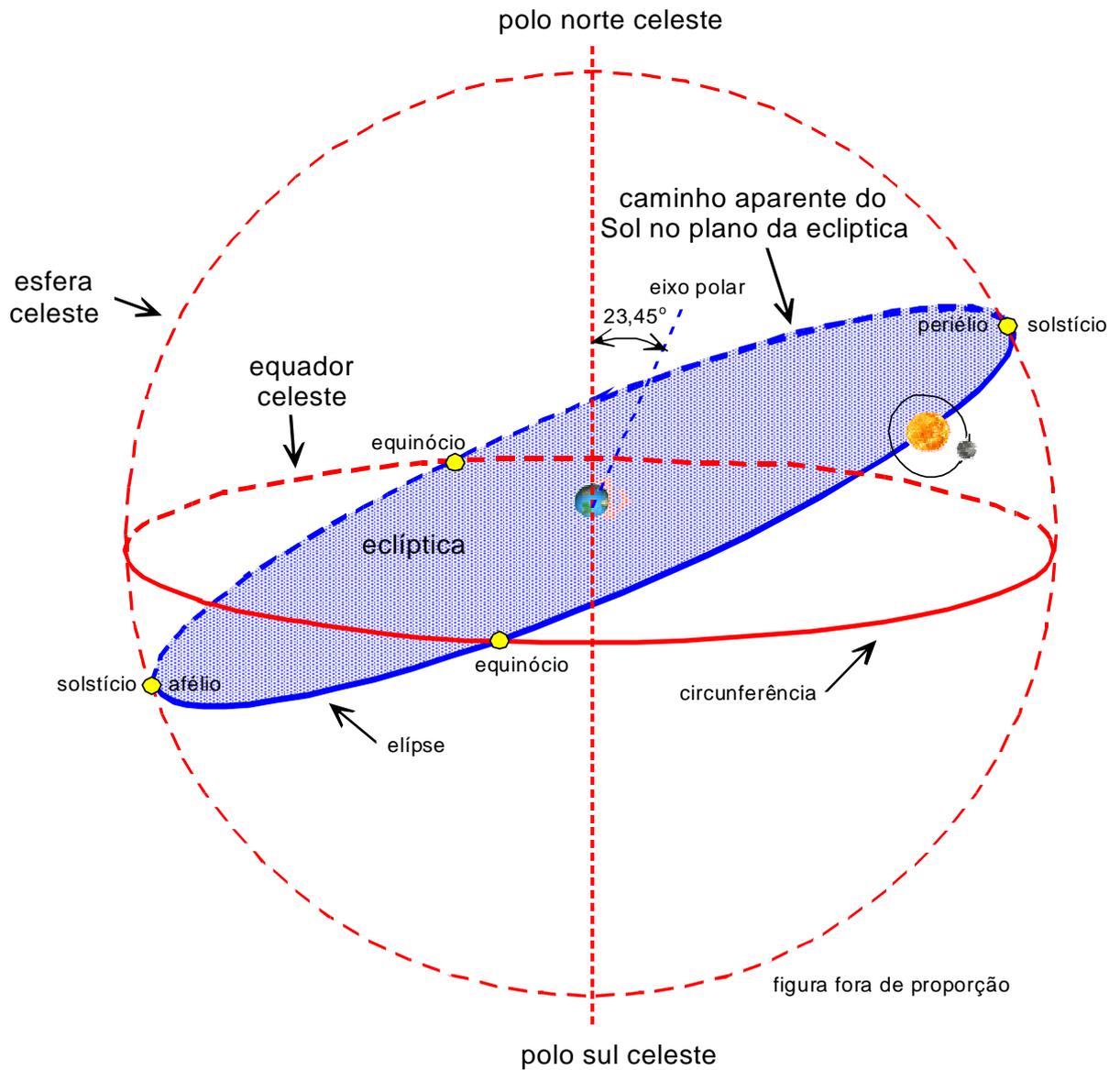


Figura 2.25 - Esfera celeste mostrando o caminho aparente do Sol.

A Figura 2.26 mostra a órbita da Terra em torno do Sol. A eclíptica é muito próxima de um círculo, sendo exagerado na figura para facilitar visualização.

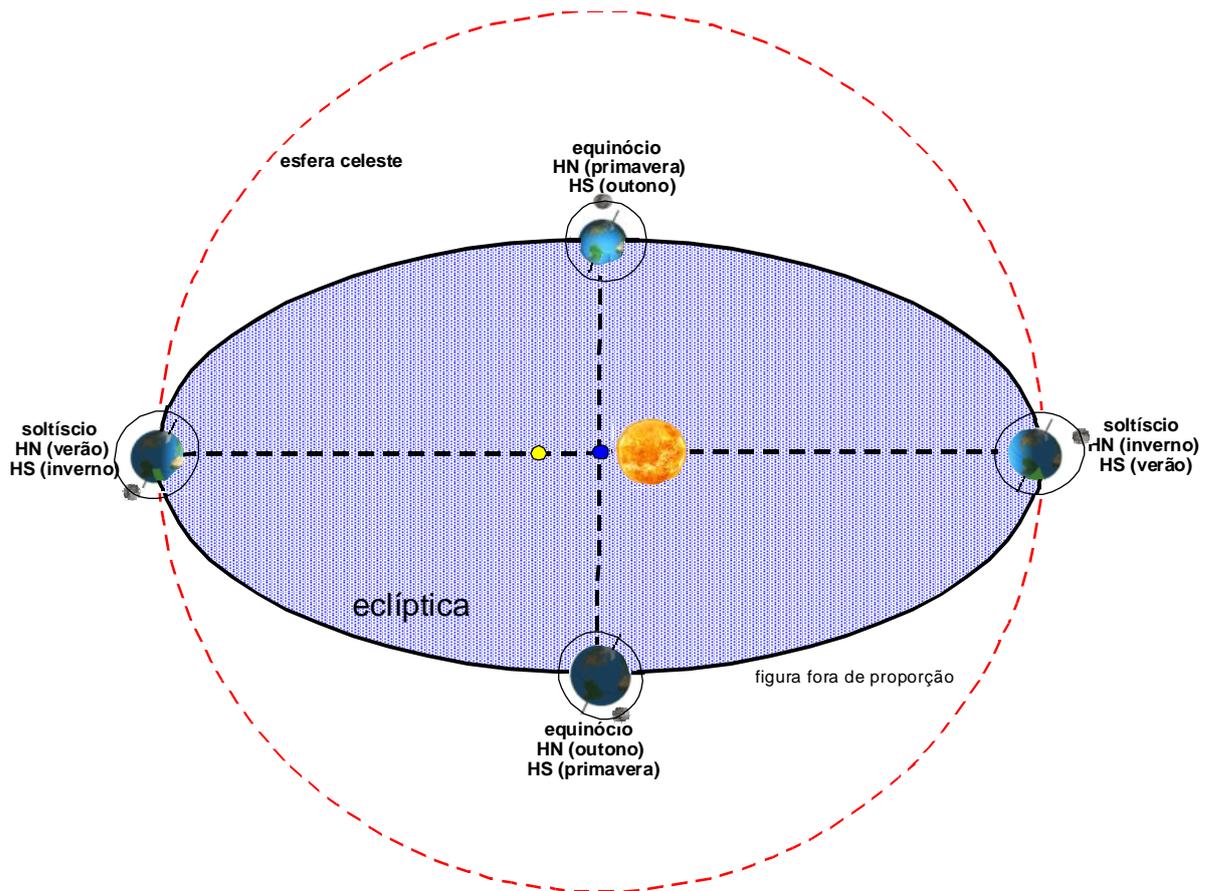


Figura 2.26 - Movimento da Terra ao redor do Sol.

Kepler, no século XVII, descobriu que os planetas do Sistema Solar têm órbitas elípticas ao redor do Sol. Para a maioria dos planetas do Sistema Solar as órbitas são quase circulares.

Para órbitas circulares, ele também descobriu que o período de tempo Y de cada órbita está relacionado à distância R do planeta ao Sol dado pela equação 2.59, onde $a_1 \approx 0,1996$ d, onde d são dias terrestres e R dado em $(Gm) = 10^6$ (km), de acordo com STULL, 2017.

$$Y = a_1 R^{\frac{3}{2}} \quad 2.53$$

Aplicando a equação 2.53 para a Terra, $R = 1$ ua, resulta $Y = 365,215$ dias, muito próximo do valor real (período sideral), 365,256363 dias.

Em um ano, ou seja, 365,0 dias, a Terra não executa uma órbita completa em torno do Sol. Depois de quatro anos, esse déficit (0,256363 dias) se acumula para quase um dia, que é corrigido usando um ano bissexto com um dia extra.

O periélio ocorre por volta de dia 4 de janeiro e o afélio por volta de 5 de julho.

As datas do periélio e do afélio saltam um ou dois dias de ano para ano porque o período orbital não é exatamente de 365 dias.

Além disso, as datas do periélio e do afélio tornam-se gradualmente mais atrasadas em um dia a cada 58 anos, devido à precessão (mudança da localização dos eixos maior e menor) da órbita da Terra em torno do Sol.

Como a Terra está girando em torno do baricentro da Lua terrestre enquanto este baricentro gira em torno do Sol, a localização do centro da Terra traça um caminho ligeiramente sinuoso enquanto orbita o Sol. Este caminho está exagerado na Figura 2.27, em cor vermelha.

O ângulo no Sol entre o periélio e a localização da Terra* é chamado de anomalia verdadeira v . Esse ângulo aumenta durante o ano à medida que o dia aumenta a partir do dia do periélio. De acordo com a segunda lei de Kepler, o ângulo aumenta mais lentamente quando a Terra está mais longe do Sol, de modo que uma linha conectando a Terra e o Sol varrerá áreas iguais em intervalos de tempo iguais.

O ângulo entre o Equador da Terra e a linha que une os centros da Terra e do Sol é chamado de declinação solar δ e muda continuamente ao longo do ano.

Os ângulos acima estão mostrados na Figura 2.27.

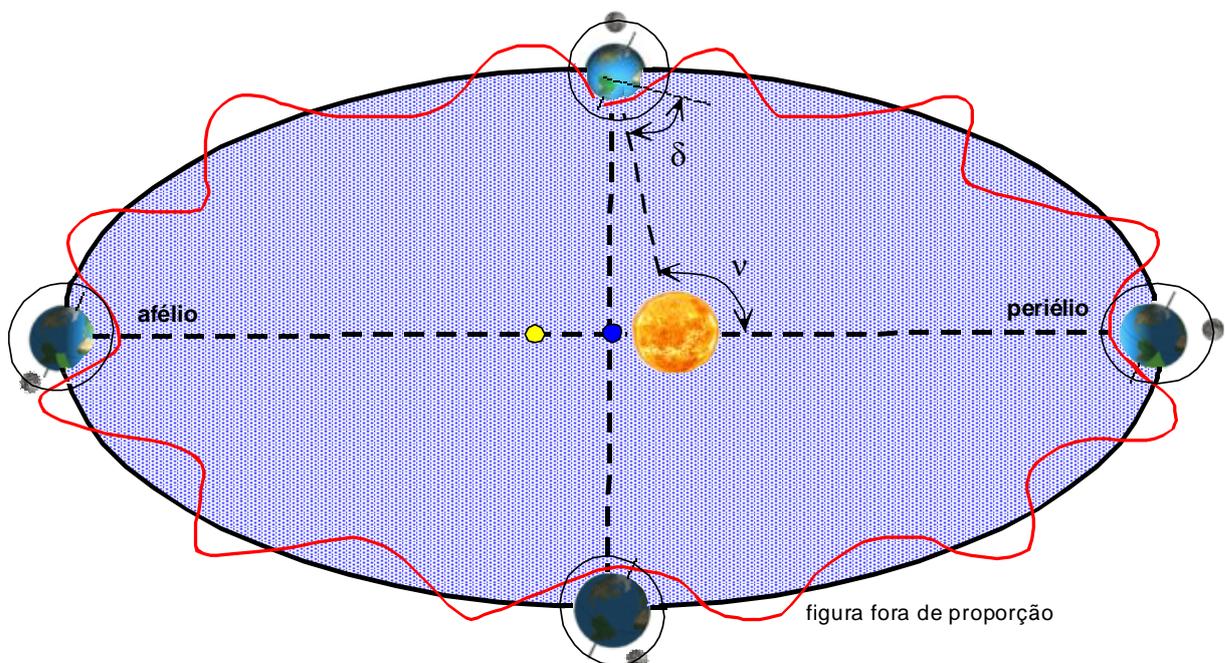


Figura 2.27 - Geometria da órbita da Terra. A linha ondulada vermelha traça o caminho do centro da Terra, e a elipse preta e lisa traça o caminho do baricentro aparente do Sol, adaptado de STULL, 2017.

Uma aproximação simples da anomalia verdadeira é a chamada anomalia média, M , que é mais simples de ser obtida e dada pela equação 2.54, mostrada em HUANG; LIU, 2022

$$M = \left| \begin{array}{l} 2\pi \\ \text{ou} \\ 360^\circ \end{array} \right| \frac{d - d_p}{P} \begin{pmatrix} \text{rad} \\ \text{ou} \\ \text{graus} \end{pmatrix} \quad 2.54$$

onde $P = 365,256363$ dias é o período orbital (sideral) e d é o dia juliano e d_p é o dia juliano correspondente ao periélio.

Como a órbita da Terra é quase circular, $v \approx M$. Uma aproximação melhor para a anomalia verdadeira da órbita elíptica da Terra é dada pela equação 2.55, onde $\varepsilon_{\oplus-\square}$ é a excentricidade da órbita da Terra, HUANG; LIU, 2022.

$$v \approx M + \left(2\varepsilon_{\oplus-\square} - \frac{\varepsilon_{\oplus-\square}^3}{4} \right) \text{sen}(M) + \frac{5}{4} \varepsilon_{\oplus-\square}^2 \text{sen}(2M) + \frac{13}{12} \varepsilon_{\oplus-\square}^3 \text{sen}(3M) \quad 2.55$$

A excentricidade da órbita da Terra em torno do Sol, nomeada neste trabalho como $\varepsilon_{\oplus-\square}$ é um parâmetro adimensional que determina o quanto a órbita da Terra em torno do Sol se desvia de um círculo perfeito, sendo dada pela equação 2.56.

$$\varepsilon_{\oplus-\square} = \frac{D_{\text{max}-\oplus-\square} - D_{\text{min}-\oplus-\square}}{D_{\text{max}-\oplus-\square} + D_{\text{min}-\oplus-\square}} \quad 2.56$$

onde $D_{\text{max}-\oplus-\square}$ é a distância máxima entre a Terra e o Sol (afélio) e $D_{\text{min}-\oplus-\square}$ é a distância mínima entre a Terra e o Sol (periélio).

A excentricidade $\varepsilon_{\oplus-\square}$ pode ser dada ainda pela equação 2.57.

$$\varepsilon_{\oplus-\square} = \sqrt{1 - \left(\frac{D_{\text{solstício}-\oplus-\square}}{D_{\text{equinócio}-\oplus-\square}} \right)^2} \quad 2.57$$

onde $D_{\text{solstício}-\oplus-\square}$ e $D_{\text{equinócio}-\oplus-\square}$ correspondem a distância entre a posição da Terra nos dois solstícios e nos dois equinócios do ano, respectivamente.

A excentricidade da órbita da Terra varia periodicamente de 0,005 (quase circular) para 0,058, com um período de 100.000 anos (o primeiro ciclo de Milutin Milankovića). Também a posição do eixo de rotação da Terra é periodicamente alterada em relação a estrela Polaris e Vega com um período de cerca de 23.000

anos (terceiro ciclo de Milutin Milankovića), o que resulta na alteração do afélio e do periélio apresentado em SOFIU *et al.*, 2011.

Atualmente, a excentricidade da órbita da Terra é relativamente baixa, sendo de aproximadamente 0,0167. Alguns sites apresentam valores mais precisos, sem referir como foram obtidos, como o da NASA (WILLIAMS, 2019) que dá um valor de 0,01671022 e o da Universidade de Nevada com 0,0167086, JEFFERY, 2023.

Como a distância entre o Sol e a Terra varia em cerca de 1,7% (excentricidade) e a uma distância de 1 ua, o Sol subtende um ângulo de 32' como mostrado na Figura 2.28.

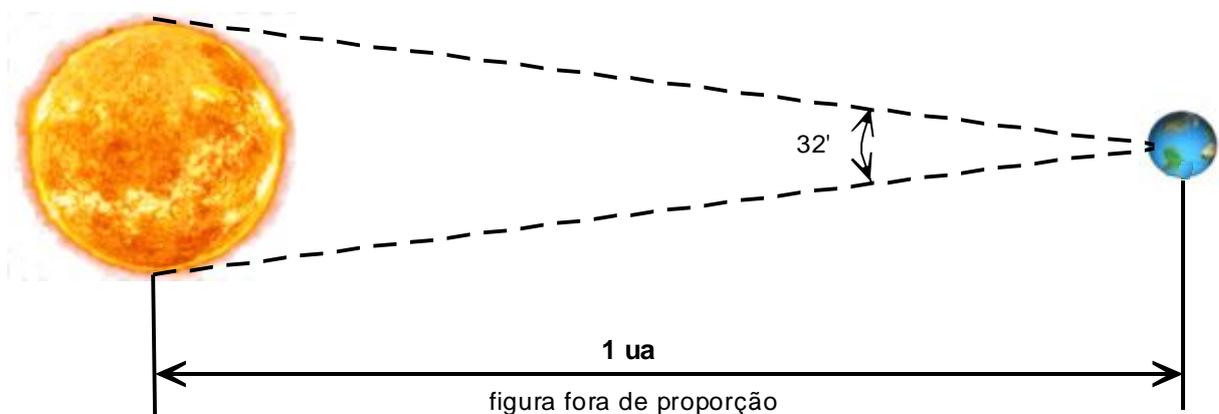


Figura 2.28 - Paralaxe Sol - Terra, adaptado de DUFFIE; BECKMAN, 2013.

Encontram-se na literatura algumas expressões empíricas que fornecem a variação da excentricidade da Terra ao longo dos anos, obtido através de observações astronômicas precisas e cálculos matemáticos complexos.

No artigo de Simon e outros, 1994, intitulado *Numerical expressions for precession formulae and mean elements for the Moon and the planets*, SIMON *et al.*, 1994, (Expressões numéricas para fórmulas de precessão e elementos médios para a Lua e os planetas) é apresentada uma equação para obtenção da excentricidade da Terra, dada na equação 2.58.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\oplus-\square} = & 0,0167088342 - 0,0004203654t - 0,0000126734t^2 + \\ & + 1,444 \times 10^{-10}t^3 - 2 \times 10^{-10}t^4 + 3 \times 10^{-10}t^5 \end{aligned} \quad 2.58$$

onde t é dado em mil anos julianos a partir da Época J2000 em tempo dinâmico. O sistema J2000 é uma referência padrão para localização de objetos no céu em astronomia, definido com base na posição da Terra em relação às estrelas fixas em

01/01/2000. Época J2000 é um ponto de referência na escala temporal de medidas de tempo, definido como o instante de tempo em que o Sol está localizado na intersecção do plano do equador celeste com o plano da eclíptica, medido a partir do equinócio de J2000.

Em outras palavras, se JD (data juliana) é o número do dia juliano, que é definido como o número de dias e frações de dia desde o meio-dia (12:00) do dia juliano inicial, que foi definido como o dia 01/01/4713 a.C. no calendário juliano, t é dado pela equação 2.59).

$$t = \frac{JD - 2.451.545}{365.250} \quad 2.59$$

A validade da equação 2.58 é de 4.000 aC até 8.000 dC, que corresponde ao intervalo $-6 < t < 6$.

No livro *More Mathematical Astronomy Morsels* (Mais Detalhes Matemáticos de Astronomia), MEEUS, 2002, consta outra equação para estimar a excentricidade da Terra, que está mostrada na equação 2.60.

$$\varepsilon_{\oplus-\square} = \sqrt{h^2 + k^2} \quad 2.60$$

onde h e k são dados pela equação 2.61), H_j , g_j e β_j são tabelados (não apresentados neste trabalho) e TJ corresponde a mil anos julianos a partir da Época J1850 (não J2000).

$$\begin{aligned} h &= \sum_{j=1}^{19} H_j \sin(g_j TJ + \beta_j) \\ k &= \sum_{j=1}^{19} H_j \cos(g_j TJ + \beta_j) \end{aligned} \quad 2.61$$

A excentricidade atual da órbita da Terra - Sol é pequena, mas significativa na medida em que o quadrado da distância Terra - Sol, $D_{\oplus-\square}$ e, portanto, a irradiância solar na Terra (constante solar) varia em $\pm 3,3\%$ da média.

A Figura 2.29 mostra a dependência da constante solar e os meses do ano, onde se pode observar que no afélio, no mês de julho, por volta do dia 4, a constante solar resulta no seu menor valor e no periélio que ocorre no mês de janeiro, por volta do dia 3, atinge seu maior valor.

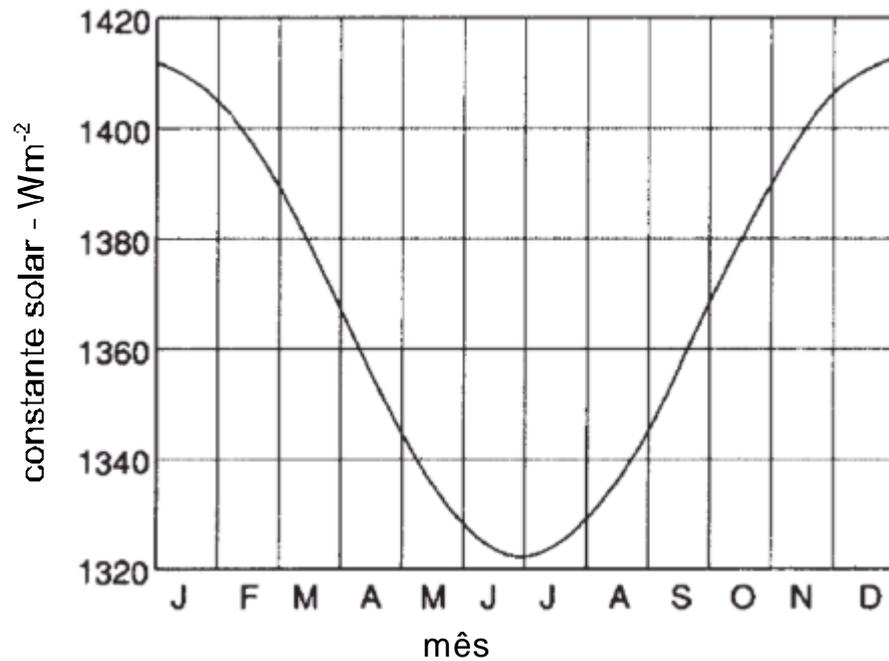


Figura 2.29 - Variação da constante solar com os meses do ano, adaptado de DUFFIE; BECKMAN, 2013.

Para uma precisão melhor que $\pm 10^{-4}$ (0,01%) a equação 2.62) pode ser usada para efetuar a correção da irradiação solar média.

$$\left(\frac{D_{\oplus-\square}}{D_{\oplus-\square-\text{atual}}} \right)^2 = 1,000110 + 0,034221 \cos(\Gamma) + 0,001280 \sin(\Gamma) + 0,000719 \cos(2\Gamma) + 0,000077 \sin(2\Gamma) \quad 2.62$$

onde $\left(\frac{D_{\oplus-\square}}{D_{\oplus-\square-\text{atual}}} \right)^2$ é chamado fator de correção da excentricidade da órbita terrestre.

Nesta equação Γ , chamado ângulo do dia, é dado pela equação 2.63), onde d_n é o número do dia do ano no calendário Juliano, variando de 1 (01/janeiro) até 365 (31/dezembro).

$$\Gamma = \left| \begin{array}{l} 2\pi \\ \text{ou} \\ 360 \end{array} \right| \frac{d_n - 1}{365} \left(\begin{array}{l} \text{rad} \\ \text{ou} \\ \text{graus} \end{array} \right) \quad 2.63$$

A equação 2.62 é amplamente divulgada nos livros e artigos a respeito do assunto e foi apresentada no artigo *Fourier Series Representation of the Position of the Sun* (Representação da Posição do Sol através da Série de Fourier) de James W. Spencer, originalmente publicado em maio de 1971, na revista científica *Search 2*

(5), 172. Search era uma revista interdisciplinar que publicava artigos em várias áreas da ciência, incluindo astronomia, biologia, física, química e matemática. A revista foi publicada de 1970 a 1985 e tinha como objetivo fornecer uma plataforma para a discussão de ideias em ciência e tecnologia. O artigo original não é mais encontrado, sendo recuperada uma cópia divulgada por John Pickard, SPENCER, 2023.

Uma equação simples com precisão adequada para a maioria de cálculos de engenharia para obter $\left(\frac{D_{\oplus-\square}}{D_{\oplus-\square\text{-atual}}}\right)^2$ é dado pela equação 2.64, dada em DUFFIE; BECKMAN, 2013.

$$\left(\frac{D_{\oplus-\square}}{D_{\oplus-\square\text{-atual}}}\right)^2 = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{d_n}{365} \left| \begin{array}{l} 2\pi \text{ rad} \\ \text{ou} \\ 360^\circ \end{array} \right. \right) \quad 2.64$$

Com isso, para obter a constante solar na data desejada, $G_{\text{sc-atualc}}$, deve ser empregada a equação 2.65), com $\left(\frac{D_{\oplus-\square}}{D_{\oplus-\square\text{-atual}}}\right)^2$ escolhido.

$$G_{\text{sc-atual}} = \left(\frac{D_{\oplus-\square}}{D_{\oplus-\square\text{-atual}}}\right)^2 G_{\text{sc}} \quad 2.65$$

Além da energia total no espectro solar (ou seja, a constante solar), é útil conhecer a distribuição espectral da radiação extraterrestre, ou seja, a radiação que seria recebida na ausência da atmosfera. Os raios do Sol são atenuados à medida que passam pela atmosfera, reduzindo a irradiância normal na superfície da Terra.

Uma curva de irradiância espectral está apresentada na Figura 2.30, onde está incluída a radiação espalhada ou reemitida pela atmosfera e arredores. Cabe observar que a figura real varia com o ângulo do Sol e as circunstâncias atmosféricas.

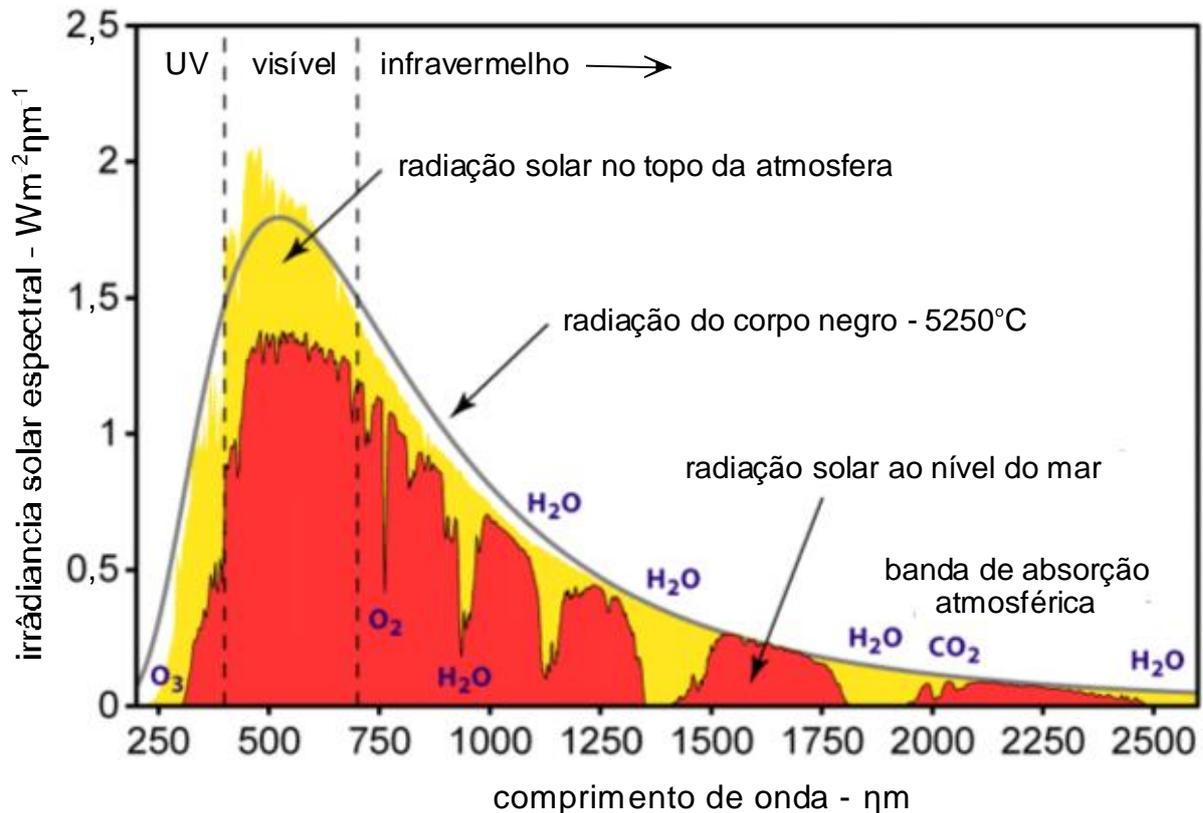


Figura 2.30 - Espectro de irradiância solar acima da atmosfera e na superfície, adaptado de "Solar Spectrum.png", 2023.

A Figura 2.31 mostra a curva de irradiância espectral padronizada do WRC, obtida a partir de medições de grande altitude no espaço. Esta curva padrão foi inicialmente estabelecida em 1981 e atualizada em 2008, sendo conhecida como *WMO standard spectral irradiance* (irradiância espectral padrão da WMO) e é amplamente usada como referência para medições de radiação solar em todo o mundo. Cabe observar que esta distribuição espectral de radiação segue de perto a forma da curva de radiação do corpo negro que é obtida avaliando a lei de Planck com a temperatura da superfície do Sol (veja Figura 2.30).

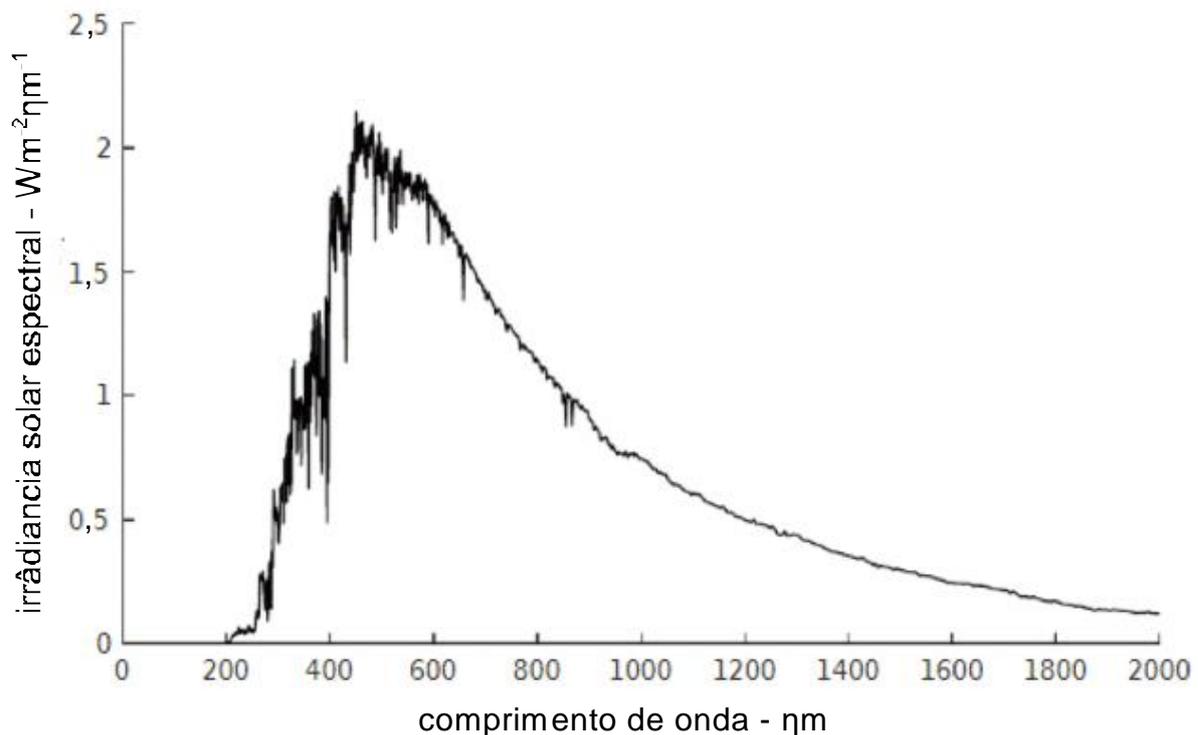


Figura 2.31 - O espectro WRC padrão da radiação, adaptado de WIDÉN; MUNKHAMMAR, 2019.

Outras definições e fatores ligados a energia solar, como equação do tempo, relação de massa na atmosfera (air mass), radiação difusa e total, fotoperíodo, variação na inclinação axial da Terra, obstrução e composição da atmosfera, altitude, posição geográfica, características das emissões de radiação eletromagnética, entre outros, que podem afetar a quantidade e qualidade da radiação solar que atinge a superfície terrestre serão discutidas no capítulo 4 a medida da sua necessidade.

2.7. Linha do Tempo da Energia Solar

O Sol não é apenas o centro do Sistema Solar, mas também a maior fonte de energia nele. A Terra recebe mais energia do Sol em uma hora do que toda a energia que o mundo utiliza por um ano.

O Sol tem um papel vital na vida na Terra. Isso foi reconhecido e celebrado por todas as culturas já nas eras antigas. Os povos daqueles dias admiravam o Sol, e até frequentemente o personificavam e o adoravam como uma divindade. Quase

todas as culturas antigas ao redor do mundo tinham seu deus Sol, que representava o poder e a força dessa estrela do Sistema Solar.

Não há registros precisos sobre o primeiro uso da energia solar pelo homem, mas é sabido que culturas antigas, como os egípcios, gregos e romanos, já utilizavam a energia solar para várias atividades cotidianas.

Basicamente a energia solar pode ser classificada em duas categorias, dependendo do modo de conversão: passiva e ativa. A energia solar ativa pode ser considerada em duas tecnologias: térmica e concentrada. Todas têm uma história muito longa e são usados intensamente também hoje em dia. Nas últimas décadas, uma nova tecnologia foi desenvolvida, a fotovoltaica, que permite a conversão direta de energia solar em energia elétrica. As constantes inovações neste campo resultaram em aumento de eficiência, redução de tamanho e custo, tornando-o mais prevalente em toda a sociedade humana.

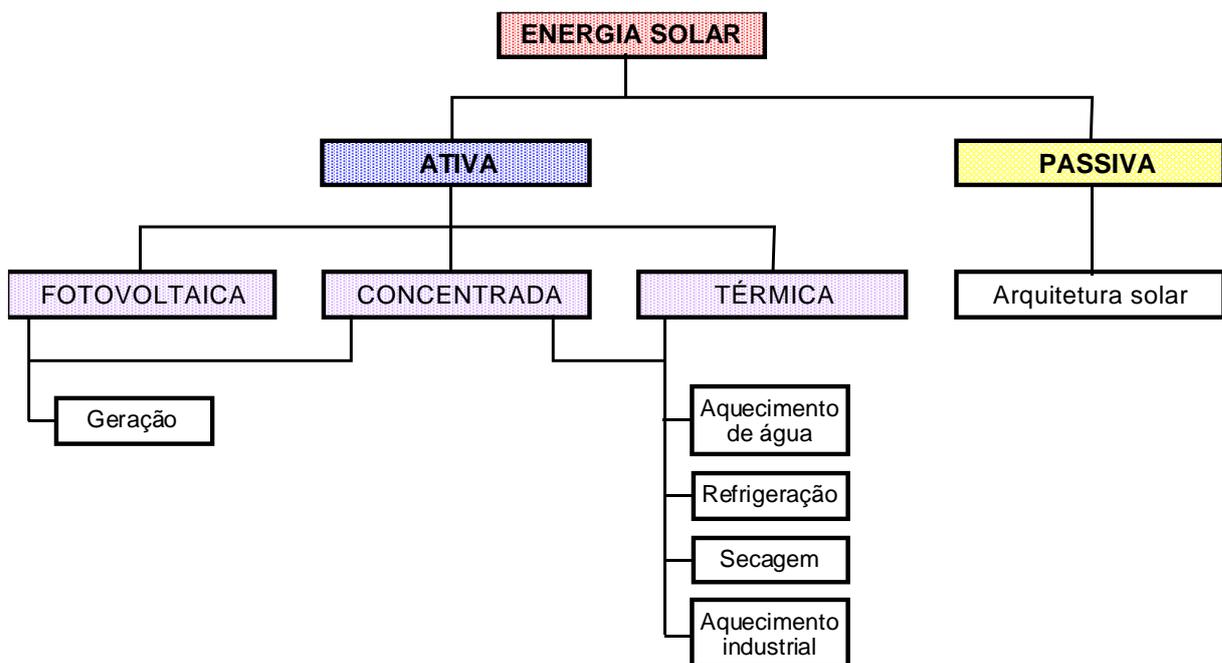


Figura 2.32 - Algumas aplicações práticas da energia solar.

Os sistemas solares passivos são os sistemas utilizados para captar e acumular o calor da energia solar diretamente. São chamados passivos porque não tem nenhum dispositivo eletro-mecânico para recircular o calor, isso acontece por conta dos princípios físicos básicos de condução, radiação e convecção de calor.

Por exemplo, os antigos gregos e romanos utilizavam a arquitetura solar passiva para aquecer ambientes. As construções eram projetadas de forma a

aproveitar ao máximo a luz solar e os raios solares eram refletidos para dentro dos espaços habitáveis através de materiais como vidro e espelhos, SZABO, 2017.

Também há registros de usos de energia solar para aquecimento em outras culturas antigas, como os egípcios, que utilizavam fornos solares para cozinhar alimentos e purificar água, e os chineses, que desenvolveram a técnica de aquecimento solar de água utilizando tubos de bambu e cerâmica, além dos persas e hindus, SZABO, 2017.

Este conhecimento foi perdido durante a Idade Média na Europa, mas a partir do século XVII, cresceu o interesse em usar o Sol como fonte de energia e, embora não houvesse um grande desenvolvimento nas técnicas solares passivas, houve um progresso significativo nos sistemas solares ativos.

Desde o século XX, tem havido uma grande variedade de desenvolvimentos solares passivos razoavelmente modernos, podendo-se citar o design que incorpora elementos como persianas móveis, massas térmicas para armazenamento de calor, esmaltes especiais e isolamento.

O sistema ativo de energia térmica solar consiste em aproveitar a energia solar para gerar energia térmica para uso na indústria e nos setores residencial e comercial, utilizando o calor do Sol diretamente para aquecer outro meio, através de coletores solares ou tubos a vácuo que captam e transferem o calor da radiação solar para um meio líquido (como a água) ou gasoso.

O objetivo deste sistema é para aquecimento e não obtenção de energia elétrica.

Na era do Renascimento (séculos XIV a XVII), o número de novas invenções e inovações aumentou radicalmente. Na área da energia solar térmica, diversas inovações foram propostas para a coleta, armazenamento e controle da energia convertida do Sol, principalmente devido ao despertar da consciência do vidro para reter o calor solar, SZABO, 2017.

Em 1767, o físico, geólogo e naturalista suíço Horace Bénédict de Saussure (1740 - 1799) construiu seu chamado coletor de placas "caixa quente", conhecido como o primeiro coletor de energia solar do mundo. Era uma caixa retangular de madeira, isolada com cortiça preta e coberta por vidro. Dentro da caixa havia uma caixa menor coberta de vidro. Quando a caixa era colocada à luz do sol, a água da

caixa interna podia ferver. Este coletor usado por Herschel para cozinhar alimentos durante sua expedição na África do Sul em 1830, SZABO, 2017.

O professor e engenheiro francês Augustin Mouchot (1825 - 1912) se notabilizou como um dos pioneiros do estudo e aproveitamento da energia solar a partir de 1860. Entre os projetos criados por Mouchot, estão fogões solares, coletores solares, fornos solares, motores solares a vapor (com versões modificadas) e até mesmo um compressor movido a vapor solar concentrado usado para fazer gelo e/ou sorvete. Na EXPO 1878 (Exposição Universal de Paris) ele demonstrou um coletor solar com um motor de resfriamento fazendo sorvete. Nesta exposição ele recebeu uma medalha de ouro, SZABO, 2017.

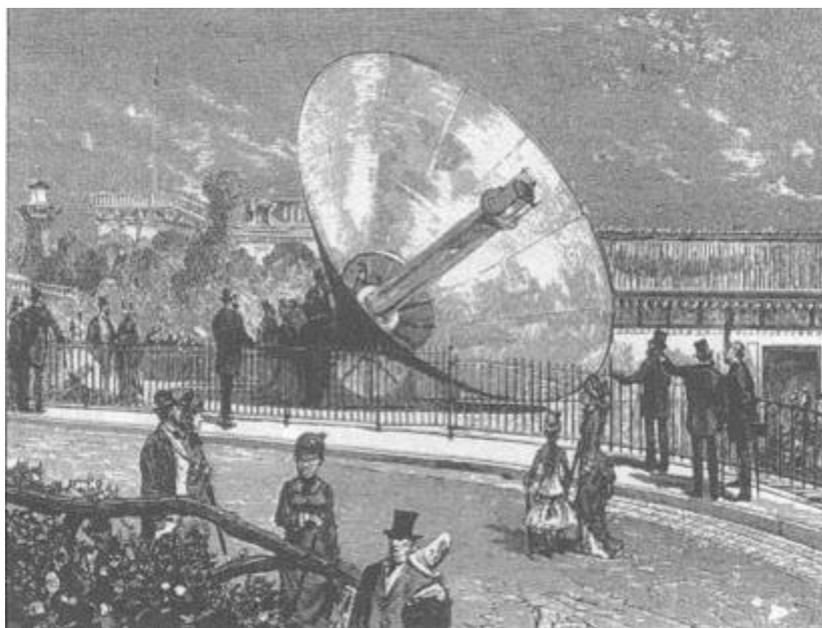


Figura 2.33 - Concentrador Solar de Augustin Mouchot, PERLIN, 2013.

A primeira instalação de equipamentos de energia térmica solar ocorreu entre 1912 e 1913, em uma pequena comunidade agrícola de Maadi, Egito, feita pelo engenheiro e inventor norte americano Frank Shuman (1862 - 1918) quando calhas parabólicas foram usadas para produzir vapor, que acionava grandes bombas d'água, bombeando mais de 20.000 litros de água por minuto para vastas áreas de deserto árido. As instalações foram destruídas durante a Primeira Guerra Mundial, SZABO, 2017.

Durante as décadas de 1920 e 1930, foram desenvolvidos coletores solares mais eficientes.

A energia solar térmica para aquecimento de água se tornou mais comum após a Segunda Guerra Mundial e nos anos 1950 foi amplamente utilizada em residências e edifícios em vários países, principalmente na Europa.

Nas décadas de 1970 e 1980, houve um interesse renovado na energia solar térmica devido à crise do petróleo e às preocupações com o meio ambiente. Muitos países investiram em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias solares térmicas e incentivaram sua adoção.

Ao longo das décadas de 1990 e 2000, ocorreram avanços significativos na tecnologia deste tipo de energia. Novos materiais, como absorvedores de alta eficiência e fluidos térmicos avançados, foram desenvolvidos para melhorar o desempenho dos sistemas térmicos. Houve também uma maior integração com sistemas de armazenamento de energia para permitir o uso da energia solar térmica mesmo quando o Sol estivesse ausente.

Nas últimas décadas, a energia solar térmica se tornou mais popular em todo o mundo, impulsionada por políticas de incentivo e conscientização sobre a necessidade de energia limpa e renovável. Governos e organizações internacionais têm implementado programas para promover o uso deste tipo de energia em residências, edifícios comerciais e industriais.

Os sistemas de energia solar concentrada consistem em uma tecnologia que concentra o calor dos raios solares usando coletores para aquecer um fluido de transferência, por exemplo, gás, óleo ou sal fundido, a uma temperatura alta.

As tecnologias de concentração de energia solar térmica podem ser usadas para gerar eletricidade convertendo energia solar para alimentar uma turbina, mas as mesmas tecnologias básicas também podem ser usadas para fornecer calor a uma variedade de aplicações industriais, como dessalinização de água, processamento de alimentos, produção química e processamento mineral, entre outras.

A forma de geração termelétrica, na qual um fluido é aquecido a partir da energia solar para produzir vapor é chamada de geração heliotérmica. Nas usinas heliotérmicas, a produção de eletricidade acontece em dois passos: primeiro, os raios solares concentrados aquecem um receptor e, depois, este calor (350 °C - 1.000 °C) é usado para produzir vapor na qual se inicia o processo convencional da

geração de energia elétrica por meio de uma turbina térmica.

Os povos antigos reconheceram cedo que as ondas concentradas do Sol podiam ser usadas para acender o fogo. No século VII aC lupas foram usadas para focar os raios solares e no século III aC antigos gregos e romanos usavam espelhos para concentrar os raios solares e acender tochas, SZABO, 2017.

Uma das histórias mais polêmicas relacionada a esse tipo de aproveitamento da energia solar vem da Grécia antiga, onde o matemático, filósofo, físico, engenheiro, inventor e astrônomo grego Arquimedes de Siracusa (287 - 212 aC), como tática defensiva, usou escudos de bronze para concentrar os raios do Sol em navios de madeira romanos invasores que pegaram fogo . Esta história tem sido amplamente discutida se é verdadeira ou não. No entanto, o engenheiro grego Ioannis Sakkas provou em 1973, alinhando 60 marinheiros gregos, segurando espelhos oblongos revestidos de bronze com a ponta para captar os raios do Sol e direcionando-os para um navio a aproximadamente 200 pés de distância, que em poucos minutos pegou fogo, ou seja, a história contém elementos cientificamente sustentáveis (AFRICA, 1975; SZABO, 2017)

O desenvolvimento dos sistemas concentrados de energia solar está intimamente ligado ao sistema térmico, e sua linha do tempo é a mesma já apresentada a esta referência, com alguns destaques vistos a utilização do calor do Sol para outras aplicações.

Existem duas categorias diferentes de plantas térmicas solares concentradas. O primeiro deles corresponde às usinas térmicas de foco de linha, também chamado refletor linear de Fresnel, que concentram o calor da luz solar através do uso de superfícies espelhadas em tubulações que transportam o fluido de transferência de calor para trocadores de calor. A outra categoria corresponde aos sistemas de foco pontual, ou torres de energia, que coletam a luz solar de uma série de espelhos voltados para um coletor em uma torre de energia. O coletor pode utilizar sal fundido que é então usado para aquecer a água para girar as turbinas ou ter água que é diretamente aquecida e transformada em vapor.

No próximo capítulo as quatro tecnologias que envolvem estas duas categorias serão analisadas.

A primeira usina de energia solar concentrada operacional foi construída em

Sant'Ilario, Itália, em 1968, pelo engenheiro e matemático italiano Giovanni Francia (1911 - 1980). Esta planta tem semelhanças arquitetônicas com plantas modernas com seu receptor central cercado por um campo de coletores solares e era um sistema refletor Fresnel de foco pontual. A usina foi capaz de produzir 1 MW com vapor superaquecido a 100 bar e 500 °C, obtido da List of photovoltaic power stations, 2019.

Em 1982, o Departamento de Energia dos EUA, junto com um consórcio industrial, começou a operar o Solar One, um projeto piloto de energia solar térmica construído no deserto de Mojave, Califórnia, EUA. Foi o primeiro teste de uma usina de torre de energia solar térmica em grande escala. O projeto produziu 7 MW de eletricidade usando 1.818 heliostatos de 40 m² de área de superfície reflexiva cada, com uma área total de 72.650 m². O Solar One foi concluído em 1981 e esteve operacional de 1982 a 1986, conforme "The Solar Project", 2022.

Atualmente, agosto de 2023, a maior usina solar concentrada do mundo é o Complexo Noor localizado em Ouarzazate, Marrocos. O Complexo Noor consiste em várias plantas individuais: Noor I (160 MW), Noor II (200 MW) e Noor III (150 MW), totalizando cerca de 510 MW. Ele desempenhou um papel significativo no avanço da adoção de energia renovável e na redução das emissões de carbono no Marrocos, comentado em SANTAMARTA, 2023.

A energia solar fotovoltaica corresponde à conversão da luz do Sol em energia elétrica, chamada popularmente de energia fotovoltaica.

O termo fotovoltaico vem do grego *φῶς* (*phōs*) que significa luz, e de volt, unidade de força eletromotriz, o volt, que por sua vez vem do sobrenome do físico italiano Alessandro Volta, inventor da bateria (célula eletroquímica). O termo fotovoltaico está em uso desde 1849, Photovoltaics, 2023.

No início do século XVIII com o desenvolvimento das pesquisas em eletricidade, os cientistas começaram a procurar fontes alternativas capazes de obter energia na forma de eletricidade, dentre elas a fonte solar.

É difícil atribuir o crédito do início da utilização da energia solar para geração de energia elétrica a uma pessoa ou algum evento, mas têm-se alguns pontos de destaque no desenvolvimento da tecnologia.

Provavelmente, o avanço mais significativo no uso da energia solar

fotovoltaica foi à descoberta do efeito fotovoltaico.

Em 1839, o físico francês Alexandre Edmond Becquerel (1820 - 1891), então com 19 anos, trabalhando com seu pai, o cientista francês, Antoine César Becquerel (1788 - 1878) observou pela primeira vez o efeito fotovoltaico, que consiste na geração de corrente elétrica ou tensão elétrica a partir da exposição de um material semiconductor à luz visível, Edmond Becquerel, 2023.

Em seu experimento, Becquerel colocou cloreto de prata em uma solução ácida e o iluminou enquanto estava conectado a eletrodos de platina. Como resultado, gerou tensão e corrente. Embora ele geralmente usasse eletrodos de platina, ele também observou alguma resposta com eletrodos de prata, Edmond Becquerel, 2023.

A Figura 2.34 ilustra esquematicamente a experiência de Becquerel.

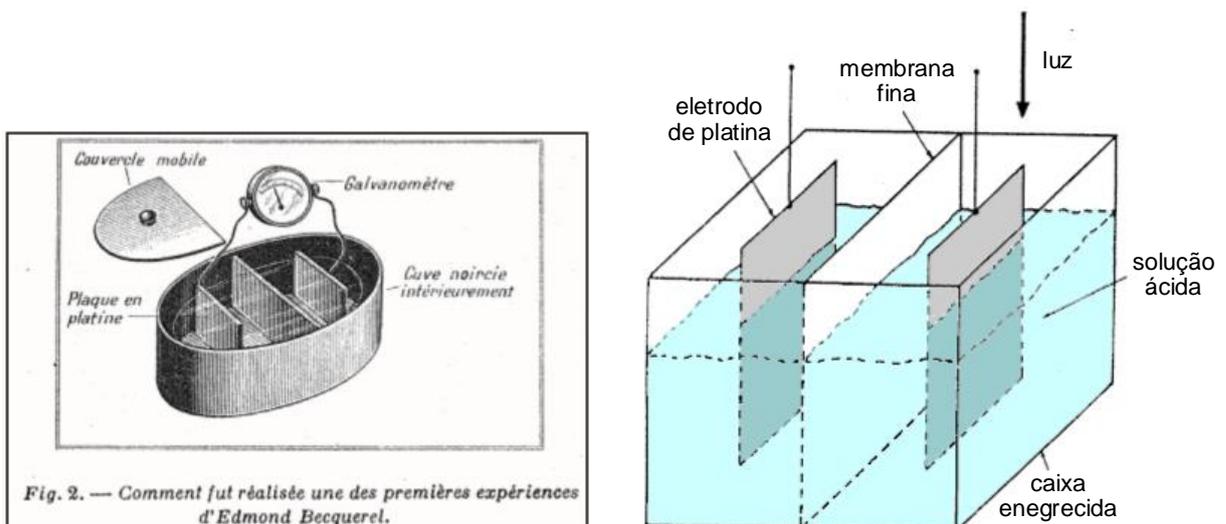


Figura 2.34 - Experiência de Becquerel, adaptado de "First photovoltaic Devices", 2023; BORVON, 2020.

Sua descoberta foi relatada na *publicação Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires* (Memória sobre os efeitos elétricos produzidos sob a influência dos raios solares), publicado no *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*, Vol. 9, 1839, pp. 561 - 567 e *Annalen der Physick und Chemie*, vol. 54, pp. 35 - 42, 184, BECQUEREL, 1839.

Mais tarde, em 1873, o engenheiro inglês Willoughby Smith (1828 - 1891) pesquisando a respeito de um método para testar a continuidade de cabos subaquáticos de telégrafos, que ele mesmo tinha inventado, selecionou hastes de

selênio para seu circuito de teste. Embora o selênio parecesse à solução no laboratório, no uso real ele dava resultados inconsistentes. Após uma investigação mais aprofundada, ele descobriu que a condutividade das hastes de selênio diminuía significativamente quando expostas a luz forte, PINKERTON, 2010. O artigo de Smith, *Effect of Light on Selenium during the passage of an Electric Current* (Efeito da luz no selênio durante a passagem de uma corrente elétrica), foi publicado na edição de 20/02/1873 da Nature. Esta descoberta das propriedades fotoelétricas do selênio levou ao desenvolvimento de células fotoelétricas, incluindo aquelas usadas nos primeiros sistemas de televisão, SMITH, 1873.

A Figura 2.35 mostra as barras de selênio usadas nos experimentos de Willoughby Smith.



Figura 2.35 - Barras de selênio usadas nos experimentos de Willoughby Smith, SZABO, 2017.

Apenas três anos mais tarde, no ano de 1876, professor do King's College em Londres, William Grylls Adams (1836 - 1915), e seu aluno, Richard Evans Day (que não tem fotos ou outras informações possíveis de encontrar) usaram o princípio do efeito fotovoltaico descoberto por Becquerel ao selênio e descobriram que ele pode, na realidade, produzir eletricidade quando exposto à luz. Embora as células solares de selênio não conseguissem converter luz solar suficiente para alimentar equipamentos elétricos, elas provaram que eletricidade poderia ser gerada a partir da luz sem calor ou partes móveis, Solar timeline, 2023.

Um ano depois, eles publicaram um artigo denominado *The action of light on*

selenium (A ação da luz no selênio) (ADAMS, DAY, 1877).

O primeiro módulo solar funcional "real" foi construído em 1883 pelo inventor americano, Charles Edgar Fritts (1850 - 1903), que construiu módulos revestindo uma larga placa de cobre com selênio e, em seguida, cobriu-a com uma camada semitransparente extremamente fina de folha de ouro. Fritts relatou que o módulo produziu uma corrente "contínua, constante e de força considerável". A corrente respondia não apenas à luz do sol, mas também à luz fraca do dia e até à luz de velas. Fritts sugeriu que "podemos ver a placa fotoelétrica competindo com usinas de combustível fóssil (a carvão)", descrito em "Early Solar History", 2019.

Os módulos resultantes de Fritts tiveram uma eficiência de conversão elétrica de apenas 1% devido às propriedades do selênio. Além do custo do selênio, o alto custo do ouro tornou esses primeiros módulos solares inviáveis comercialmente. No entanto, Fritts enviou um de seus painéis solares para o inventor e industrial alemão Werner von Siemens (1816 - 1892). A produção de eletricidade dos painéis quando colocados sob a luz impressionou tanto Siemens que ele apresentou o painel de Fritts à Academia Real da Prússia. A Siemens declarou ao mundo científico que os módulos dos americanos "nos apresentaram pela primeira vez, a conversão direta da energia da luz em energia elétrica", "Early Solar History", 2019.

O primeiro painel solar de telhado do mundo, usando células de selênio de Fritts, foi instalado em 1884 na cidade de Nova York. Ele conectou vários módulos de selênio e colocou a matriz de teste em um telhado e estava muito otimista em relação ao fim das máquinas a vapor e as poluições relacionadas. Mas as aplicações práticas generalizadas dos dispositivos fotovoltaicos tiveram que esperar até a década de 1950, CHU; TARAZANO, 2019.

A Figura 2.36 mostra os primeiros painéis solares no telhado da cidade de Nova York.



Figura 2.36 - Primeiros painéis solares no telhado da cidade de Nova York em 1884, CHU; TARAZANO, 2019.

Em 1913, em uma conversa com Henry Ford e Harvey Firestone, o empresário norte-americano Tomas Alva Edison (1847 - 1931) proferiu a seguinte frase: “Eu colocaria meu dinheiro no Sol e na energia solar. Que fonte de poder! Espero que não tenhamos que esperar até que o petróleo e o carvão acabem antes de resolvermos isso.”, ROGERS, 2007.

Mas foi somente em 1954 três cientistas americanos trabalhando para os Laboratórios Bell, Daryl M. Chapin (1906 - 1995), Calvin S. Fuller (1902 - 1994) e Gerald L. Pearson (1905 - 1987) desenvolveram uma célula solar que poderia converter energia solar suficiente em eletricidade para operar qualquer equipamento elétrico comum. Ao contrário da célula solar de Charles Fritts, o produto da *Bell Labs* era feito de pastilhas de silício em vez de selênio, e produzia uma eficiência muito maior. O jornal *New York Times* elogiou a descoberta "como o início de uma nova era, levando eventualmente à realização de um dos sonhos mais acalentados da humanidade - o aproveitamento - o aproveitamento da energia quase ilimitada do sol

para usos da civilização" ("Early Solar History", 2019). A patente foi emitida em 1957 nos EUA, nº 2.780.765, e é a documentação legal mais próxima da invenção da tecnologia solar, mostrada em CHAPIM, FULLER, PEARSON, 1957.

A Figura 2.37 ilustra os três cientistas citados acima.



Figura 2.37 - Gerald L. Pearson, Daryl M. Chapin e Calvin S. Fuller (esquerda para direita)
"Early Solar History", 2019.

Devido aos altos custos e baixa eficiência, no início da era fotovoltaica, as células solares eram usadas apenas em brinquedos e outras aplicações menores. Suas primeiras aplicações importantes foram na exploração espacial. O Vanguard I, lançado pelos EUA em 1958, foi o primeiro satélite movido à energia solar do mundo. Desde então, grandes painéis solares semelhantes à asas são uma característica típica dos satélites. Na prática, as células solares eram adequadas para esta aplicação, uma vez que sua pequena eficiência e altos custos eram compensados por sua alta relação potência - peso, uma questão muito importante na indústria aeroespacial, Solar panels on spacecraft, 2023.

O sucesso da célula solar na fotovoltaica aeroespacial mudou radicalmente a visão geral sobre suas aplicações também na Terra. Primeiro foram visadas as aplicações terrestres remotas, onde não havia possibilidade de conexão a uma rede elétrica pública.

Em 18/11/1982, a ARCO Solar, Inc. iniciou a operação de uma usina de geração de energia fotovoltaica de 1 MW na propriedade Southern California Edison (SCE) adjacente à subestação Lugo da concessionária em Hesperia, Califórnia. Essa usina foi a primeira usina fotovoltaica comercial construída e um marco significativo na história da energia solar fotovoltaica. Ela contava com aproximadamente 1.000 painéis solares fotovoltaicos instalados em uma área de cerca de 1,8 hectares, ARNETT *et. al.*, 1984.

A energia solar fotovoltaica passou por uma jornada impressionante desde a década de 1980 até os dias atuais. Durante esse período, a tecnologia solar experimentou avanços significativos, transformando-se em uma das fontes de energia renovável mais promissora e amplamente adotada em todo o mundo.

O avanço mais notável ocorreu nas últimas duas décadas, com o crescimento acelerado da capacidade instalada de energia solar em todo o mundo. Incentivos governamentais, políticas de energia renovável e preocupações ambientais impulsionaram o aumento da adoção da energia solar fotovoltaica.

As melhorias tecnológicas permitiram que os painéis solares se tornassem mais eficientes, compactos e acessíveis. Novos materiais têm sido desenvolvidos para aumentar ainda mais a eficiência e reduzir o custo de produção. Além disso, as baterias de armazenamento de energia solar também evoluíram, permitindo a utilização da energia captada durante o dia para suprir a demanda durante a noite ou em períodos nublados.

A energia solar fotovoltaica emergiu como uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e diminuindo a dependência de fontes não renováveis. Grandes usinas solares foram construídas em diferentes partes do mundo, incluindo parques solares em áreas desérticas, onde a incidência solar é intensa.

Atualmente, agosto de 2023, o maior complexo solar fotovoltaico do mundo é o 青海省绿色发电集团, traduzido para Grupo de Geração de Energia Verde de Qinghai ou Usina de Energia Fotovoltaica Qinghai Talatan. O complexo fica localizado no condado de Gonghe, província autônoma tibetana de Hainan, na província de Qinghai, a quase 3.000 metros acima do nível do mar. Tem uma capacidade total instalada de mais de 9.000 MW e uma geração média anual de

energia de cerca de 9.600 GWh, é o maior aglomerado mundial de usinas fotovoltaicas centralizadas. Tem previsão de chegar a 15.730 MW e 11.400 GWh. Graças à sua elevada altitude, a radiação solar em Talatan é intensa. A área recebe em média 1.600 horas de sol por ano, proporcionando uma vantagem única para o desenvolvimento da geração de energia fotovoltaica. Sua construção começou em 2012, tem uma área total de 609,6 km², o que equivale à área terrestre de Cingapura comentado em “How China is leading the world in clean energy”, 2023; “Qinghai Gonghe Talatan (Qinghai Green Power) solar farm”, 2023. O complexo também trouxe benefícios econômicos para os pastores e agricultores locais, pois os contrata para limpar os painéis solares, cortar a grama e trabalhar como seguranças, além de fornecer pasto suficiente para a sobrevivência das ovelhas, abundantes no local. Antes de o projeto ser estabelecido, a região era um deserto frequentemente atormentado por tempestades de areia, e as ovelhas mal conseguiam sobreviver no local devido à falta de comida. Os painéis solares podem reduzir a evaporação da água, mantendo assim o nível de umidade do solo para o crescimento da grama. Com bastante grama para pastar, as ovelhas crescem bem, segundo um pastor local, noticiado em “Photovoltaic park in NW China’s Qinghai boosts development of clean energy”, 2021.

2.8. Vantagens e Desvantagens do Uso da Energia Solar

A energia solar como o próprio nome diz é a energia proveniente do Sol, sendo, literalmente, toda a energia irradiada pelo Sol, seja em sua forma de luz visível ou não.

A energia solar é uma das fontes de energia renováveis mais promissoras do mundo. Ela apresenta várias vantagens em relação às fontes de energia convencionais, mas também tem algumas desvantagens.

As vantagens da energia solar são:

- Fonte de energia renovável: a energia solar pode ser aproveitada em todas as áreas do mundo e está disponível todos os dias. Não se pode ficar sem energia solar, ao contrário de algumas das outras fontes de energia. A energia solar estará acessível enquanto existir o Sol, portanto, a luz solar estará disponível por

pelo menos 5 bilhões de anos, quando, de acordo com as análises feitas, o Sol irá se extinguir.

- Reduz as contas de eletricidade: como serão atendidas algumas necessidades de energia com a eletricidade ou a energia térmica que o sistema solar poderá gerar, as contas de energia se reduzirão. O quanto se economiza dependerá do tamanho do sistema solar e do uso de eletricidade ou calor. Além disso, além de economizar na conta de luz, há a possibilidade de receber pagamentos pelo excedente de energia que é exportado de volta para a rede no caso da geração elétrica.
- Diversas aplicações: a energia solar pode ser utilizada para diversas finalidades, gerar eletricidade ou calor. A energia solar pode ser usada para produzir eletricidade em áreas sem acesso à rede elétrica, para destilar água em regiões com abastecimento limitado de água potável e para alimentar satélites no espaço. A energia solar também pode ser integrada nos materiais usados para edifícios.
- Baixos custos de manutenção: os sistemas de energia solar geralmente não requerem muita manutenção, e necessita-se mantê-los relativamente limpos, portanto, limpá-los algumas vezes por ano. Além disso, como não há partes móveis, não há desgaste.
- Desenvolvimento de tecnologia: a tecnologia na indústria de energia solar está avançando constantemente e as melhorias serão intensificadas no futuro. Inovações em física quântica e nanotecnologia podem potencialmente aumentar a eficácia dos equipamentos de geração elétrica solar.
- Energia limpa: a energia solar não produz poluição do ar ou emissões de gases de efeito estufa, o que significa que é uma fonte de energia limpa.
- Redução de custos: o custo dos coletores, concentradores e painéis solares tem diminuído rapidamente nos últimos anos, tornando a energia solar cada vez mais acessível. Além disso, os governos e empresas muitas vezes oferecem incentivos financeiros para a instalação de painéis solares.
- Geração local de energia: a energia solar pode ser gerada localmente, o que significa que não há necessidade de construir grandes linhas de transmissão de energia para sua distribuição. Isso pode levar a uma maior estabilidade da rede

elétrica e reduzir os riscos de interrupções de energia.

As desvantagens da energia solar são:

- Dependência da luz solar: a energia solar é uma fonte de energia renovável que depende diretamente da luz solar para gerar eletricidade ou calor. A disponibilidade de energia solar varia ao longo do dia e das estações do ano. A geração de eletricidade por meio de painéis solares fotovoltaicos é máxima durante as horas de pico de sol e reduzida ou inexistente à noite. Isso torna a geração de energia solar intermitente, o que significa que não há produção contínua e constante de energia.
- Dependência das condições climáticas: a eficiência da energia solar térmica ou fotovoltaica depende diretamente da radiação solar disponível. Portanto, em dias nublados, chuvosos ou durante a noite, a quantidade de energia produzida é reduzida. Isso pode levar a flutuações na disponibilidade de energia térmica ao longo do tempo. Essas flutuações climáticas podem tornar a energia solar menos confiável e previsível em comparação com outras fontes de energia.
- Custo inicial elevado: os sistemas de energia solar térmica podem exigir um investimento inicial significativo, incluindo os custos de compra e instalação dos coletores solares, tanques de armazenamento e sistemas de distribuição. Embora os custos tenham diminuído ao longo dos anos, ainda pode ser um obstáculo para alguns projetos.
- Limitações em áreas com menor insolação: regiões que recebem menos luz solar ou têm condições climáticas desfavoráveis podem enfrentar desafios em relação à geração de energia solar. Em áreas com alta latitude ou frequentes períodos de tempo nublado, a energia solar pode ser menos eficiente e menos viável como fonte de energia principal.
- Espaço requerido: os concentradores e painéis solares ocupam espaço significativo e precisam ser instalados em áreas que recebem luz solar direta. Isso pode ser um desafio em áreas urbanas densamente povoadas ou em edifícios com espaço limitado. No geral, a produção fotovoltaica em grande escala requer uma quantidade significativa de espaço, especialmente para usinas solares terrestres que são construídas em áreas terrestres, como terrenos vazios, campos ou desertos. A quantidade de espaço requerido depende da capacidade de

geração desejada e da eficiência dos painéis solares. Usinas solares terrestres podem cobrir áreas extensas, com várias dezenas a centenas de hectares. Em média, estima-se que uma usina solar terrestre de 1 MW ocupe aproximadamente 4 a 5 hectares de área. Já as usinas solares flutuantes são instaladas em corpos d'água, como lagos, represas ou reservatórios. Elas usam painéis solares flutuantes para gerar eletricidade e têm a vantagem adicional de utilizar espaço que, de outra forma, não seria utilizado para a geração de energia. A quantidade de espaço requerido varia dependendo do tamanho do corpo d'água e da capacidade de geração desejada. Estima-se que uma usina solar flutuante de 1 MW ocupe aproximadamente 1,5 a 2,5 hectares de área de superfície da água.

- Armazenamento de energia: a energia solar é intermitente e a geração de energia térmica ou fotovoltaica varia ao longo do dia. O armazenamento de energia térmica geralmente requer a instalação de tanques de armazenamento e sistemas de transferência de calor, o que pode adicionar complexidade ao sistema e aumentar os custos de instalação e manutenção. Dependendo da capacidade de armazenamento desejada, o tamanho e a infraestrutura necessários podem ser significativos. Também tem perdas de eficiência: Durante o processo de armazenamento de energia térmica, pode haver perdas de eficiência devido a vazamentos de calor ou dissipação térmica. Quanto maior o tempo de armazenamento, maiores são as perdas e, conseqüentemente, menor é a eficiência geral do sistema. Também existem limitações de capacidade de armazenamento: Os sistemas de armazenamento de energia térmica têm uma capacidade limitada de armazenar calor. A quantidade de energia que pode ser armazenada depende do tamanho do tanque de armazenamento e das características do meio de armazenamento, como temperatura e capacidade de calor específico. Em alguns casos, pode ser necessário complementar a energia térmica armazenada com outras fontes de energia durante períodos de alta demanda. No caso da energia fotovoltaica a demanda de energia nem sempre coincide com a geração solar. Portanto, é necessário ter sistemas de armazenamento de energia, como baterias, para usar a energia solar durante a noite ou em momentos de baixa geração. Além disso os sistemas de armazenamento de energia fotovoltaica, como as baterias, podem ter um custo inicial significativo e durante o processo de armazenamento e recuperação da

energia fotovoltaica, pode haver perdas de eficiência. Vida útil, degradação, necessidade de manutenção e impacto ambiental também são desvantagens do sistema de armazenamento de energia solar fotovoltaica.

- Impacto ambiental dos materiais: a geração de energia fotovoltaica e solar térmica apresentam alguns impactos ambientais, embora sejam geralmente considerados menores em comparação a outras formas de geração de energia convencionais. A produção de painéis solares fotovoltaicos e concentradores solares térmicos requerem o uso de materiais, como silício, vidro, metais e outros componentes. A extração e o processamento desses materiais podem ter impactos ambientais negativos, incluindo a geração de resíduos, emissões de gases de efeito estufa e contaminação de recursos hídricos, se não forem realizados de maneira adequada. Também a fabricação de painéis solares e sistemas solares térmicos requer o consumo de energia. A quantidade de energia necessária varia dependendo do tipo de tecnologia e dos processos de fabricação utilizados. No final da vida útil dos painéis solares e sistemas solares térmicos, é importante garantir uma gestão adequada dos resíduos. Embora muitos componentes possam ser reciclados, ainda há desafios em relação à reciclagem completa e eficiente destes materiais. A disposição inadequada desses resíduos pode levar a impactos ambientais negativos. As usinas solares em grande escala, especialmente as usinas terrestres, requerem grandes áreas de terra para instalação dos painéis solares. Isso pode levar à conversão de terras naturais ou agrícolas em áreas de energia solar, resultando em perda de habitats, fragmentação de ecossistemas e impactos na biodiversidade. É importante destacar que muitos desses impactos ambientais podem ser mitigados por meio de práticas adequadas de gestão ambiental, como a implementação de políticas de reciclagem, a redução do consumo de energia na fabricação e a escolha de locais de instalação adequados.

2.9. Utilização da Energia Solar no Mundo

A energia solar térmica e fotovoltaica tem desempenhado um papel cada vez mais importante no mundo atual, impulsionando a transição para um sistema

energético mais sustentável e de baixo carbono. Essas tecnologias estão sendo amplamente adotadas em todo o mundo devido aos seus benefícios ambientais, econômicos e sociais.

A energia solar térmica é usada para aquecer água e fluidos, sendo amplamente utilizada para fins domésticos e industriais, como aquecimento de água em residências, piscinas, sistemas de aquecimento de ambientes e processos industriais. Essa forma de energia renovável reduz significativamente a dependência de combustíveis fósseis e ajuda a mitigar as emissões de gases de efeito estufa. Em muitos países, programas de incentivo governamentais têm sido implementados para promover a instalação de sistemas solares térmicos, proporcionando benefícios financeiros e ambientais aos usuários.

A energia solar concentrada é uma solução para a transição para uma matriz energética mais sustentável, oferecendo uma gama de benefícios que vão desde a geração de eletricidade em grande escala até o armazenamento de energia e a redução das emissões de gases de efeito estufa. O seu uso tem crescido significativamente em diversas partes do mundo, em áreas que incluem desertos e áreas de alta radiação solar.

A energia solar fotovoltaica com a rápida queda nos custos dos painéis solares fotovoltaicos nos últimos anos tem impulsionado o crescimento exponencial da capacidade instalada em todo o mundo. A energia solar fotovoltaica é uma das fontes de energia renovável de mais rápido crescimento, sendo usada em sistemas residenciais, comerciais e de grande escala, como usinas solares terrestres e usinas solares flutuantes.

Os benefícios da energia elétrica proveniente de fonte solar são inúmeros. Além de ser uma fonte de energia limpa e sustentável, reduz a dependência de combustíveis fósseis, contribui para a segurança energética, cria empregos verdes e promove o desenvolvimento econômico local. Além disso, os avanços tecnológicos e a pesquisa contínua têm levado a melhorias na eficiência dos painéis solares e concentradores e no armazenamento de energia, aumentando ainda mais a viabilidade e a atratividade desta energia.

Em muitos países ao redor do mundo, governos, empresas e indivíduos estão adotando políticas de energia renovável ambiciosas, com metas claras para

augmentar a participação da energia solar térmica e fotovoltaica em sua matriz energética. Investimentos significativos estão sendo feitos em projetos solares de grande escala, impulsionando a geração de empregos e a transição para um futuro energético mais limpo.

O *Solar Heat Worldwide*, traduzido literalmente para Calor Solar em todo Mundo, é um relatório anual publicado pela *International Energy Agency, IEA* (Agência Internacional de Energia) como parte do programa *Solar Heating and Cooling Technology Collaboration Programme* que é um programa de cooperação internacional que visa promover o desenvolvimento, pesquisa e implementação de tecnologias de aquecimento e refrigeração solar sustentáveis em todo o mundo.

Na última edição do *Solar Heat Worldwide*, WEISS; SPÖRK-DÜR, 2023, são apresentados os desenvolvimentos e tendências do mercado global 2022 e números detalhados do mercado de 2021 relativos à energia solar térmica.

De acordo com a revista a capacidade térmica solar global de coletores de água com e sem cobertura de vidro não em operação cresceu de 62 GW_{th} (89 milhões de m² de área coletora) em 2000 para 542 GW_{th} (774 milhões de m²) em 2022. As produções anuais de energia solar térmica totalizaram 51 TWh em 2000 e 442 TWh em 2022.

A Figura 2.38 mostra esta evolução.

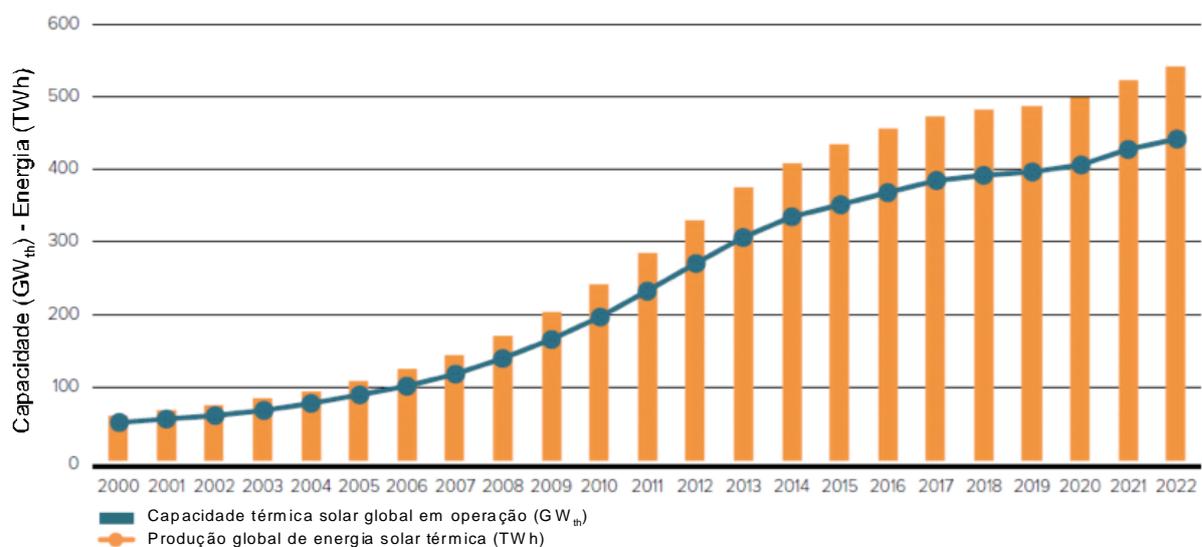


Figura 2.38 - Capacidade térmica solar global em operação e produção anual de energia 2000-2022, adaptado de WEISS; SPÖRK-DÜR, 2023.

A unidade GW_{th} representa "gigawatt-térmico" e é utilizada para medir a

capacidade instalada ou a potência térmica de sistemas que utilizam calor ou energia térmica, sendo uma unidade de medida comumente empregada para descrever a capacidade de usinas e sistemas de aquecimento solar, concentração solar, biomassa, painéis solares térmicos, cogeração e outras tecnologias que geram ou utilizam calor. Um watt térmico é equivalente a um watt (W) de potência, mas se refere especificamente à energia térmica. Quando um sistema ou dispositivo gera ou transfere energia térmica a uma taxa de um watt térmico, isso significa que um joule de energia térmica está sendo transferido ou gerado a cada segundo.

Em 2022 foi instalada uma capacidade total de 19 GW_{th} (27,1 milhões de m²). Após sete anos de quedas anuais na área instalada de coletores entre 2014 e 2019 e leve aumento em 2021, 2022 apresentou queda de 9,3%. Apesar de uma tendência ascendente com números crescentes de vendas na maioria das regiões econômicas desde 2021, essa tendência positiva é ofuscada por dois dos maiores mercados, China e Índia. As quebras nestes dois mercados são justificadas na China pelas duras medidas de bloqueio provocadas pela pandemia de Covid-19 e na Índia pelas alterações nos subsídios e pela forte concorrência dos fotovoltaicos, WEISS; SPÖRK-DÜR, 2023.

A produção global de energia solar térmica de todos os sistemas solares térmicos instalados em 2022 corresponde a uma economia de 47,5 milhões de toneladas de petróleo e 153,3 milhões de toneladas de CO₂, uma redução significativa das emissões globais de gases de efeito estufa, WEISS; SPÖRK-DÜR, 2023.

A capacidade solar térmica acumulada em operação no final de 2022 foi de 540 GW_{th} ficando atrás da capacidade instalada da energia eólica e da fotovoltaica de 906 GW_{el} e 1.153 GW_{el}, respectivamente. A energia geotérmica e a energia solar concentrada (CSP) ficaram atrás dessas três tecnologias em capacidade instalada, com 16 GW_{el} e 6,4 GW_{el}, respectivamente. Em termos de energia, os sistemas solares térmicos forneceram 440 TWh de calor, enquanto as turbinas eólicas forneceram 2.215 TWh e os sistemas fotovoltaicos 1.312 TWh de eletricidade. Esses números foram baseados nos dados de mercado mais recentes de 15 países que representam cerca de 87% da capacidade instalada acumulada em operação em 2022, WEISS; SPÖRK-DÜR, 2023.

A Figura 2.39 mostra a capacidade global em operação e a produção anual

de energia em 2022 envolvendo estas várias formas de geração e energia.

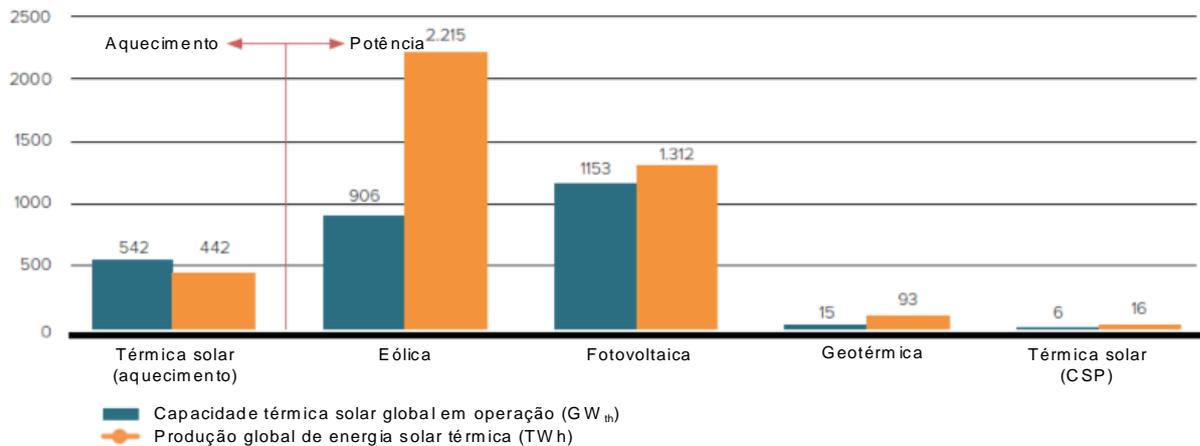


Figura 2.39 - Capacidade global em operação (GW_{el}), (GW_{th}) e produção anual de energia (TWh_{el}), (TWh_{th}) em 2022, adaptado de WEISS; SPÖRK-DÜR, 2023.

O desenvolvimento do mercado mundial de energia térmica solar em 2022 foi muito variado e a queda de 2,3% foi influenciado principalmente pela China e pela Índia. Os desenvolvimentos nesses dois países encobriram os desenvolvimentos relativamente positivos em outras regiões econômicas, como a Europa. A China, de longe o maior mercado do mundo, registrou uma queda de 12,4%, e a Índia, outro mercado significativo e grande, viu uma queda de 16% de crescimento em 2021 para -21% em 2022. O país com maior aumento de mercado em 2022 foi o Líbano, que registrou um aumento de 145% em relação a 2021. Isso foi impulsionado principalmente pela remoção de subsídios à eletricidade, aumento dos preços dos combustíveis e depreciação da moeda local que ocorreu naquele ano, WEISS; SPÖRK-DÜR, 2023.

A Figura 2.40 mostra os países com as maiores taxas de crescimento da energia térmica em 2022.

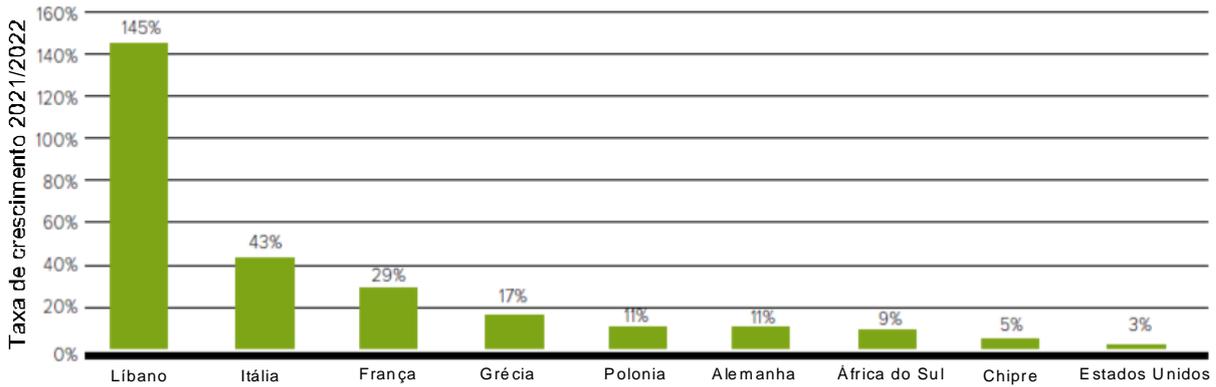


Figura 2.40 - Países com as maiores taxas de crescimento em 2022, adaptado de (WEISS; SPÖRK-DÜR, 2023)..

Ainda de acordo com o IEA, a respeito da geração fotovoltaica especificamente, a mesma aumentou cerca de 15% em 2022, um recorde de 174 TWh, atingindo 1.312 TWh sendo o maior crescimento absoluto de geração de todas as tecnologias renováveis em 2022, superando a eólica pela primeira vez na história. Essa taxa de crescimento da geração corresponde ao nível previsto de 2023 a 2030 no *Net Zero Emissions by 2050 Scenario* (Cenário de Emissões Líquidas Zero até 2050), “Solar PV”, 2023.

A Figura 2.41 mostra o crescimento da capacidade cumulativa de energia por tecnologia, 2010-2027

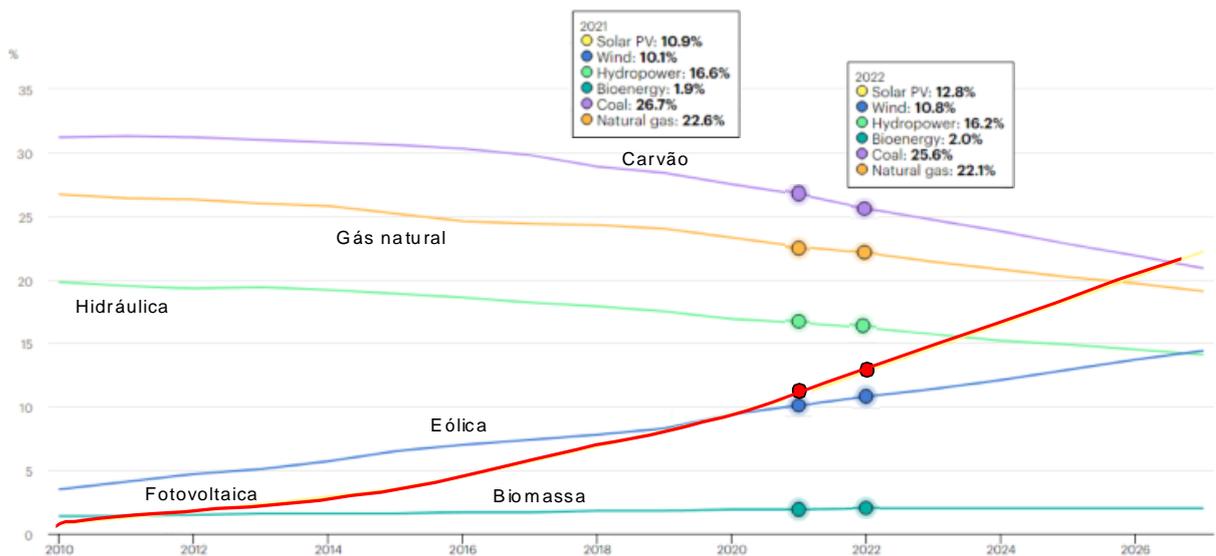


Figura 2.41 - Crescimento da capacidade cumulativa de energia por tecnologia, 2010-2027, adaptado de (“Solar PV”, 2023). .

A energia solar fotovoltaica representou 4,5% da geração total de eletricidade global e continua sendo a terceira maior tecnologia de eletricidade renovável, atrás

da energia hidrelétrica e eólica, “Solar PV”, 2023.

A capacidade instalada de energia solar fotovoltaica está prestes a superar a do carvão até 2027, tornando-se a maior do mundo. A capacidade solar fotovoltaica cumulativa quase triplica na previsão do IEA, crescendo quase 1.500 GW durante o período, superando o gás natural em 2026 e o carvão em 2027. As adições anuais de capacidade solar fotovoltaica aumentam a cada ano nos próximos cinco anos, “Solar PV”, 2023.

Os países e regiões que fazem progressos notáveis no avanço da energia solar fotovoltaica incluem (“Solar PV”, 2023):

- A China continua liderando em termos de adições de capacidade solar fotovoltaica, com 100 GW adicionados em 2022, quase 60% a mais do que em 2021, sendo responsável por cerca de 38% do crescimento da geração solar fotovoltaica em 2022.
- A União Europeia está acelerando a implantação de energia solar fotovoltaica em resposta à crise energética, com 38 GW adicionados em 2022, um aumento de 50% em relação a 2021, sendo o segundo maior crescimento de geração (uma participação de 17% do total).
- Os Estados Unidos incluíram um novo financiamento generoso para energia solar fotovoltaica na Lei de Redução da Inflação (IRA) introduzida em 2022 e teve uma participação com 15% do total.
- A Índia instalou 18 GW de energia solar fotovoltaica em 2022, quase 40% a mais do que em 2021.
- O Brasil adicionou quase 11 GW de capacidade solar fotovoltaica em 2022, dobrando seu crescimento em 2021.

O polissilício cristalino, uma forma de silício com uma estrutura multicristalina, composta por muitos pequenos cristais de silício, continua sendo a tecnologia dominante para módulos fotovoltaicos, com uma participação de mercado de mais de 97%, “Solar PV”, 2023.

Uma das razões pelas quais a energia solar é tão atraente é o seu potencial de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Segundo a IEA a energia solar fotovoltaica pode fornecer quase 20% da eletricidade global até 2050, o que ajudaria

significativamente a mitigar as mudanças climáticas (“Solar PV”, 2023).

Além disso, a energia solar tem um potencial significativo para reduzir a pobreza energética em todo o mundo. Mais de 840 milhões de pessoas ainda vivem sem acesso à eletricidade, e a energia solar pode ajudar a fornecer energia limpa e acessível a essas comunidades, “Solar PV”, 2023.

As figuras 2.42 e 2.43 mostram a geração e a capacidade de energia solar fotovoltaica no Cenário Net Zero, 2010 - 2030.

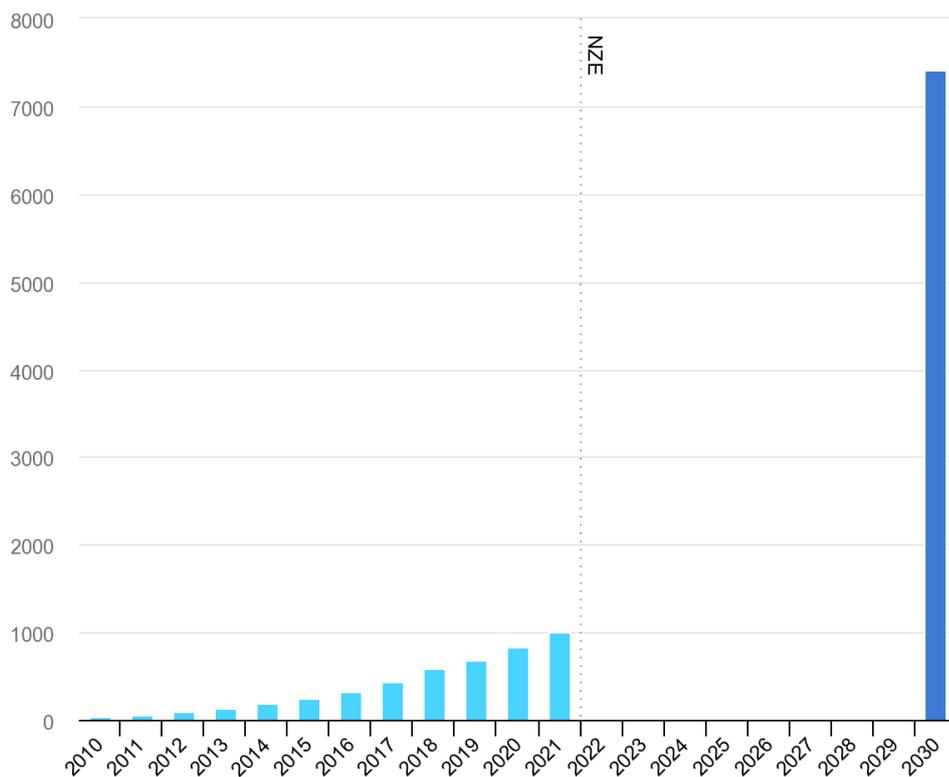


Figura 2.42 - Geração de energia solar fotovoltaica no cenário Net Zero, 2010 – 2030, “Solar PV”, 2023.

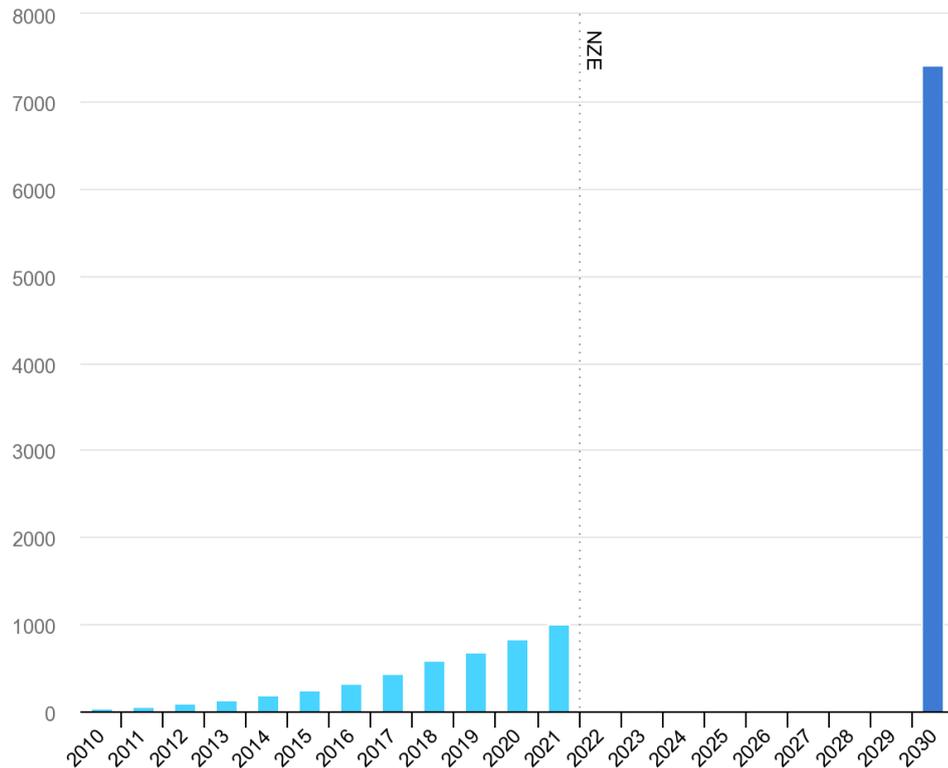


Figura 2.43 - Capacidade de energia solar fotovoltaica no cenário Net Zero, 2010 – 2030, “Solar PV”, 2023

De acordo com um estudo publicado em 2007 pelo *World Energy Council* (Conselho Mundial da Energia), em 2100, o petróleo, o gás, o carvão e a energia nuclear, fornecerão menos de 15% do consumo mundial de energia, enquanto a energia solar térmica e fotovoltaica fornecerá cerca de 70%, publicado em SOLAR, 2013.

2.10. Utilização da Energia Solar no Brasil

As energias solares térmicas e fotovoltaicas têm ganhado cada vez mais destaque no Brasil como fontes de energia renovável promissoras. O país possui um enorme potencial solar devido ao seu vasto território e elevada incidência de radiação solar ao longo do ano. Como resultado, o Brasil tem investido significativamente no desenvolvimento e na expansão dessas tecnologias.

Por ser um país inserido em sua maior parte na Zona Tropical, o Brasil tem níveis de irradiação solar muito altos em praticamente todo o seu território. A Região Sul, mesmo estando na Zona Temperada, possui índices de irradiação comparáveis

à Amazônia equatorial. Os níveis de irradiação de todas as regiões brasileiras são substancialmente superiores à maior parte dos países europeus, onde a energia solar é aproveitada de forma intensiva há anos, conforme descrito na dissertação SANTOS, A.J;L., 2020.

No caso da energia solar térmica, seu uso tem se concentrado principalmente no aquecimento de água em residências, indústrias, hospitais, hotéis e outros setores comerciais.

O governo brasileiro tem implementado programas e políticas de incentivo, como o Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H), que promove a adoção de sistemas de aquecimento solar em edifícios residenciais. O PBQP-H é uma ferramenta que busca garantir dois pontos fundamentais quando se fala de habitação de interesse social: a qualidade, com obras marcadas pela segurança e durabilidade; e a produtividade do setor da construção a partir da sua modernização de acordo com o “Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat”, 2023.

A produção de coletores solares no Brasil vem crescendo ininterruptamente desde 2006, com taxa média anual de 17,6%. Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Térmica (ABRASOL), o volume de produção de coletores solares térmicos somou $1,81 \times 10^6$ m² em 2021, representando aumento de 28% em relação a 2020. No acumulado dos últimos 25 anos, tem-se à marca de 21×10^6 m² conforme “Uso de energia solar térmica no Brasil cresce 28%”, 2022.

No setor fotovoltaico, o Brasil tem experimentado um crescimento significativo nos últimos anos. A matriz energética brasileira vem se diversificando, com uma maior participação da energia solar fotovoltaica. O país possui um regime de incentivos, como leilões de energia renovável, linhas de financiamento específicas e isenções fiscais, que têm impulsionado a instalação de usinas solares em grande escala e sistemas fotovoltaicos de menor porte em residências, comércios e indústrias.

As projeções da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) apontam que, somente em 2023, a fonte solar fotovoltaica deverá gerar mais de 300 mil novos empregos, espalhados por todas as regiões do País. Segundo a avaliação da entidade, os novos investimentos privados no setor poderão

ultrapassar a cifra de R\$ 50 bilhões em 2023, somando as usinas de grande porte e os pequenos sistemas em telhados, fachadas e pequenos terrenos, de acordo com a notícia “Capacidade de energia solar no Brasil deve crescer 42% em 2023, a 34 GW, prevê Absolar”, 2022.

As perspectivas para o setor são de chegar ao final de 2023 com um acumulado de cerca de 1 milhão de empregos no Brasil desde 2012, distribuídos entre todos os elos produtivos do setor. Os investimentos totais devem chegar a R\$ 170,9 bilhões, com mais de R\$ 53,8 bilhões em arrecadação de tributos públicos, de acordo com a notícia “Capacidade de energia solar no Brasil deve crescer 42% em 2023, a 34 GW, prevê Absolar”, 2022.

Em nova notícia da Absolar, em 19/07/2023, é informado que desde 2012 a fonte solar já trouxe ao Brasil cerca de R\$ 155,2 bilhões em novos investimentos, mais de R\$ 45,1 bilhões em arrecadação aos cofres públicos, e gerou mais de 960 mil empregos acumulados. Com isso, também evitou a emissão de 40,6 milhões de toneladas de CO₂ na geração de eletricidade. A tecnologia solar é utilizada atualmente em 98,9% de todas as conexões de geração distribuída no País.

Segundo o presidente da Absolar, Rodrigo Sauaia, “a fonte solar é uma alavanca para o desenvolvimento social, econômico e ambiental do País, em especial com a oportunidade de uso da tecnologia na habitação de interesse social, como casas populares do programa Minha Casa Minha Vida, assim como em escolas, hospitais, postos de saúde, delegacias, bibliotecas, museus, parques, entre outros”, na mesma reportagem acima.

De acordo com o Portal Solar, em notícia mais atual possível, de 07/11/2023, CASARIN, 2023.2, a energia solar fotovoltaica ultrapassou a marca de 35 GW no Brasil, de acordo com os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Este número leva em conta as usinas de grande porte (geração centralizada) e os sistemas de geração própria em telhados, fachadas e pequenos terrenos (geração distribuída).

Com 24,34 GW de capacidade instalada, o mercado de geração solar distribuída (GD) é liderado por instalações residenciais, que somam 11,8 GW. Em seguida, vêm as classes de consumo comercial, rural e industrial, com 6,9 GW, 3,5 GW e 1,7 GW de potência operacional, respectivamente. São Paulo é o estado com

maior capacidade instalada nesse segmento, com 3,28 GW, superando por pouco Minas Gerais, com 3,26 GW de acordo com CASARIN, 2023.2.

Já a geração solar centralizada soma 10,68 GW de capacidade instalada no Brasil, referentes a usinas outorgadas no mercado regulado e mercado livre de energia. Esses empreendimentos se concentram no estado de Minas Gerais e na região Nordeste, publicado por CASARIN, 2023.2

As perspectivas para a energia solar térmica e fotovoltaica no Brasil são bastante promissoras. O país tem o potencial de se tornar uma das principais potências solares do mundo, devido às condições favoráveis de irradiação solar e à crescente conscientização sobre a importância da transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável.

Além disso, as perspectivas econômicas são encorajadoras. Os custos dos painéis solares fotovoltaicos têm diminuído significativamente nos últimos anos, tornando a tecnologia mais acessível e competitiva em comparação com outras fontes de energia. Isso tem impulsionado o investimento no setor e incentivado a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes.

O Brasil também possui um mercado interno em expansão para a energia solar fotovoltaica, tanto em instalações em telhados e pequenos sistemas residenciais quanto em grandes usinas solares. Essa diversificação de aplicações e a crescente demanda por energia limpa e renovável indicam um futuro promissor para a energia solar no país.

Em artigo, HEIN, H., 2023, publicado no site Canal Solar, em 16/10/2023, o Brasil será o quinto maior mercado de energia solar do mundo no começo da próxima década, com uma capacidade instalada acumulada superior à de países como Austrália e Japão, segundo projeção da Wood Mackenzie.

Em seu estudo mais recente, divulgado no dia 12/10/2023, a Wood Mackenzie aponta que o mercado brasileiro fotovoltaico só ficará atrás da China, dos Estados Unidos, da Índia e da Alemanha ao final de 2032, sendo que atualmente, o Brasil é o oitavo país com a maior capacidade instalada em energia solar do mundo, segundo dados da IRENA (Agência Internacional de Energia Renovável).

No artigo ainda é citado que em 2022, o Brasil conseguiu se figurar entre os dez primeiros colocados pela primeira vez na história, ao saltar seis posições no

ranking da entidade.

No artigo, FREIRE, W., 2023, também publicado no site do Canal Solar, em 29/08/2023, de acordo com o presidente do Conselho da ABSOLAR, Ronaldo Koloszuk, a perspectiva é que a fonte solar se torne a maior tecnologia de geração de energia no Brasil até 2040. Nas contas da ABSOLAR, é possível instalar mais 46 GW de energia solar centralizada no país até 2030. A fonte já representa 15% da matriz elétrica brasileira, com 33,5 GW de capacidade instalada, ocupando a segunda posição em tecnologia de geração de energia elétrica do país.

Não foi encontrada na literatura projeção do potencial fotovoltaico a ser instalado no Brasil para a segunda metade do século XXI.

No entanto, ainda existem desafios a serem enfrentados, como a necessidade de aprimorar a infraestrutura e a integração dessas fontes renováveis na rede elétrica, além de questões regulatórias e burocráticas. É fundamental continuar investindo em pesquisa e desenvolvimento, políticas públicas favoráveis e capacitação técnica para garantir o crescimento contínuo e sustentável da energia solar térmica e fotovoltaica no Brasil.

Capítulo 3 - MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS DO CMIP6

“Os modelos climáticos não são bolas de cristal que preveem o futuro com certeza absoluta. Eles são como bússolas que nos mostram a direção que estamos tomando e nos alertam sobre possíveis perigos no caminho.”

Stefan Rahmstorf, oceanógrafo e climatologista (1960 -)

3.1. Introdução

Neste capítulo será feita uma apresentação dos modelos climáticos existentes com destaque as suas características e aplicações e também uma análise detalhada do projeto denominado *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*, abreviado pela sigla CMIP6, pertencente ao grupo World Climate Research Programme (WCRP).

A modelagem climática é uma abordagem científica que utiliza modelos matemáticos e computacionais para simular e entender o sistema climático da Terra. Consiste em representar as interações complexas entre a atmosfera, o oceano, a superfície terrestre e outros componentes relevantes, bem como os processos físicos, biológicos e químicos que ocorrem nesses sistemas.

A modelagem climática desempenha um papel fundamental na compreensão do clima passado, presente e futuro, fornece uma percepção sobre os processos climáticos, ajuda a prever mudanças climáticas, avalia impactos e apoia a tomada de decisões informadas em relação às questões climáticas.

A implementação prática da modelagem climática resulta nos modelos climáticos, que são algoritmos matemáticos sofisticados que utilizam princípios físicos, químicos e biológicos para representar todos os componentes essenciais do sistema climático, projetado para simular a dinâmica do clima em diferentes escalas de tempo e espaço.

Os algoritmos matemáticos usados nos modelos resultam da combinação de equações diferenciais com equações empíricas. As equações diferenciais são baseadas nas leis fundamentais da física, que descrevem como as variáveis climáticas mudam ao longo do tempo e em diferentes locais. Já as equações empíricas são relações matemáticas derivadas a partir de observações e dados

empíricos do sistema climático.

As equações diferenciais são essenciais nos modelos climáticos porque fornecem uma base matemática robusta para representar os processos físicos complexos, simular as mudanças climáticas e entender as interações no sistema climático. Já as equações empíricas são usadas nos modelos climáticos para preencher lacunas nos dados, estimar parâmetros desconhecidos, simplificar fenômenos complexos, incorporar relações não explicitamente modeladas e calibrar o modelo com observações reais e desempenham um papel complementar às equações diferenciais, melhorando a representação e a capacidade de simulação do sistema climático.

Cabe observar que os processos que são muito incertos e que precisam ser aproximados através de equações empíricas, resultam em um desafio complexo devido à imensa quantidade de variáveis e processos envolvidos.

Os algoritmos matemáticos usados nos modelos climáticos são resolvidos por meio de técnicas de modelagem numérica, que discretizam o sistema climático em uma grade tridimensional, dividindo o espaço em células e o tempo em intervalos discretos.

As equações discretas são então resolvidas numericamente, usando esquemas de diferenças finitas, o que permite que as equações sejam escritas em termos de diferenças entre os valores das variáveis climáticas nas células vizinhas, iterando sobre a grade e avançando no tempo para calcular as mudanças das variáveis climáticas. Isso envolve a iteração repetida sobre a grade espacial e o avanço no tempo, atualizando os valores das variáveis climáticas de acordo com as equações discretas. Para calcular as mudanças das variáveis climáticas ao longo do tempo são incorporados nos modelos esquemas de integração numérica, como o método de Euler ou o método de Runge-Kutta.

Com tudo isso, a resolução dos modelos climáticos é uma tarefa computacionalmente intensiva e requer recursos de computação avançados. Os modelos são executados em computadores de grande porte ou supercomputadores, que são capazes de lidar com o grande volume de cálculos necessários para simular o sistema climático em diferentes escalas espaciais e temporais.

Para validar os modelos, são utilizados dados históricos observados, como

temperaturas passadas, padrões de vento e registros de precipitação. Se os modelos conseguirem reproduzir com precisão os padrões climáticos conhecidos, eles podem ser usados para fazer projeções futuras com base em diferentes cenários de interesse.

Devido a toda esta complexidade os modelos climáticos não são desenvolvidos por uma pesquisa isolada, mas sim, por instituições de pesquisa em todo o mundo. Essas instituições incluem agências governamentais, universidades, centros de pesquisa climática e organizações internacionais, que geralmente trabalham em colaboração, compartilhando dados, conhecimentos e metodologias para melhorar a precisão e a capacidade de previsão dos modelos climáticos.

Além disso, existem esforços internacionais de colaboração, como o Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), que reúne instituições de pesquisa de todo o mundo para comparar e avaliar modelos climáticos em uma base comum, que será utilizado neste trabalho.

Embora os modelos climáticos não sejam perfeitos e continuem a evoluir com os avanços científicos, eles fornecem uma ferramenta valiosa para entender o clima passado, presente e futuro e são essenciais para orientar a tomada de decisões informadas em relação às mudanças climáticas, ajudando a compreender os riscos e a desenvolver estratégias para mitigar seus impactos.

3.2. Linha do tempo dos Modelos Climáticos

O conhecimento do clima e a previsão do tempo são fundamentais para a segurança, o bem-estar e o desenvolvimento sustentável da sociedade como um todo.

A previsão do tempo é essencial para atividades como agricultura, turismo, aviação, planejamento urbano e saúde pública. Por sua vez, o conhecimento do clima ajuda a entender os padrões climáticos, as tendências de longo prazo e as mudanças climáticas, que são cruciais para a agricultura, a gestão de recursos hídricos, a conservação da biodiversidade e o planejamento urbano, entre outros setores.

O tempo e o clima estão intimamente relacionados, mas existem diferenças distintas entre os dois conceitos. O tempo é a condição atmosférica no momento presente e o clima é uma descrição das condições atmosféricas médias ao longo de um período de tempo mais longo. A relação entre tempo e clima é estabelecida pela interdependência e influência mútua entre esses dois conceitos.

O interesse no tempo começou muito antes do interesse no clima. Desde os tempos antigos, as pessoas sempre tiveram a necessidade de prever o tempo para fins práticos, como agricultura, navegação e sobrevivência. Os agricultores observavam padrões sazonais, como a ocorrência de chuvas, para determinar os melhores momentos para plantar e colher. Os marinheiros observavam o céu e o comportamento do mar para prever tempestades e evitar perigos.

Já o interesse no clima como uma área de estudo mais abrangente e científica veio posteriormente. À medida que o conhecimento sobre o sistema climático global se expandiu, tornou-se evidente que compreender o clima em uma escala mais ampla era essencial para entender as variações de longo prazo e as mudanças climáticas.

De modo a destacar a importância da previsão do tempo seja a crônica do agrônomo Gilberto Rocca da Cunha, publicada em CUNHA, 1997:

Conta a lenda que, há milhares de anos, ao amanhecer de um dia qualquer, um desajeitado homem das cavernas saiu de sua gruta. Ergueu uma mão peluda sobre os olhos e fitou vagorosamente umas nuvens negras sobre o horizonte. Atentamente observou um bando de estranhos pássaros no céu. Abaixou-se e juntou um punhado de terra para jogar para o alto e ver de que lado soprava o vento. Ficou algum tempo imóvel, fez uma previsão, emitiu um som ininteligível e agitando os braços retornou à sua gruta. Para aquele homem primitivo esse ato não foi um mero passatempo. Pelo contrário, foi um assunto de máxima importância. Ele tinha de saber tudo o que pudesse sobre o tempo, pois isso lhe indicaria qual a direção a seguir, quando fosse caçar. Se tomasse a direção certa, poderia caçar o tigre de dentes-de-sabre ou o mamute. Do contrário, passaria mais um dia com fome na sua caverna. Dessa forma simples, idealizada, o homem das cavernas tornou-se o primeiro "meteorologista".

Já nessa época saber tudo o que pudesse sobre o tempo era mais que uma descoberta, mas uma questão de sobrevivência, pois a partir desses conhecimentos saberiam como e quando caçar.

Pode-se dizer que começou nesta época a previsão do tempo. Já os modelos climáticos são bem mais recentes.

Antes do desenvolvimento da modelagem climática, as previsões climáticas eram feitas com base em observações meteorológicas passadas, padrões climáticos históricos e conhecimento empírico. Os métodos utilizados pelos antigos para fazer previsões climáticas eram menos precisos e baseados em observações de curto prazo, podendo-se citar:

- Observações astronômicas: uma das abordagens utilizadas era observar os padrões do céu, como a posição do Sol, da Lua, das estrelas e dos planetas. Essas observações eram correlacionadas com padrões climáticos conhecidos para fazer previsões aproximadas. Por exemplo, a posição do Sol ao amanhecer ou ao entardecer poderia indicar um tempo mais frio ou quente.
- Observações naturais: outra abordagem era observar o comportamento de animais, como aves migratórias, insetos ou mesmo certas espécies de plantas. Mudanças no comportamento desses organismos poderiam sugerir uma mudança nas condições climáticas. Por exemplo, pássaros voando em direção ao sul poderiam indicar a chegada do inverno.
- Padrões climáticos históricos: as observações de padrões climáticos passados eram usadas como referência para prever condições futuras semelhantes. Eram observadas o comportamento sazonal do clima e esse conhecimento era usado para fazer estimativas aproximadas. Por exemplo, se um inverno anterior foi particularmente frio, poderia-se esperar um inverno semelhante.
- Conhecimento local: as comunidades locais tinham um conhecimento profundo sobre o clima em sua região específica. Eles observavam sinais sutis da natureza, como a aparência das nuvens, a direção do vento, a cor do céu, o cheiro do ar e outros indícios que poderiam indicar mudanças climáticas iminentes.

No entanto, é importante ressaltar que esses métodos eram menos precisos e limitados em sua capacidade de prever o clima em longo prazo ou em áreas geográficas mais amplas.

A história da modelagem climática de fato começa com modelos conceituais, seguidos no século XIX por modelos matemáticos de balanço de energia e

transferência radiativa, bem como modelos analógicos simples. Desde a década de 1950, as principais ferramentas da ciência do clima têm sido modelos de simulação de computador da circulação geral global. Desde a década de 1990 até o presente, uma tendência em direção a modelos acoplados cada vez mais abrangentes de todo o sistema climático dominou o campo. A avaliação e a intercomparação de modelos climáticos estão transformando a modelagem em um processo modular mais padronizado, apresentando o potencial para unificar a pesquisa e os aspectos operacionais da ciência do clima conforme EDWARDS, 2010.

As primeiras tentativas de entender os fenômenos climáticos resultaram em modelos conceituais. Os astrônomos e geógrafos gregos, Eratóstenes de Cirene (276 aC - 194 aC) e Cláudio Ptolomeu (100 - 170) deduziram a forma esférica da Terra e conectaram o clima à inclinação do Sol. Ptolomeu baseou seu sistema de quinze zonas climáticas na duração do dia mais longo (o mesmo número que usou para expressar a latitude), EDWARDS, 2010.

Em 1686, buscando entender a física dos ventos alísios, o astrônomo, matemático e físico inglês Edmond Halley (1656 - 1742) publicou uma das primeiras teorias a ir além da visão ptolomaica do clima em função da latitude, no artigo intitulado *An historical account of the trade winds, and monsoons, observable in the seas between and near the Tropicks, with an attempt to assign the physical cause of the said winds* (Um relato histórico dos ventos alísios e monções observáveis nos mares entre e próximos aos Trópicos, com uma tentativa de atribuir a causa física dos referidos ventos), HALLEY, 1686.

Halley observou que os ventos alísios sopram predominantemente do nordeste no hemisfério norte e do sudeste no hemisfério sul. Ele teorizou que esses ventos são impulsionados pelo movimento de aquecimento do ar perto do Equador, HALLEY, 1686.

De acordo com a teoria de Halley, a luz solar incide mais diretamente sobre o Equador, aquecendo o ar naquela região. Esse ar aquecido se expande e sobe, criando uma área de baixa pressão na superfície. Para preencher essa área de baixa pressão, o ar mais frio e denso dos trópicos é puxado em direção ao Equador, criando os ventos alísios, HALLEY, 1686.

Cinquenta anos depois, no início do século XVIII, o advogado e

meteorologista inglês George Hadley (1686 - 1768) modificou a explicação de Halley para levar em consideração o efeito de rotação da Terra, conhecido como força de Coriolis, que influencia a direção dos ventos. Ele explica que a força de Coriolis desvia os ventos alísios para oeste no hemisfério norte e para leste no hemisfério sul conforme (EDWARDS, 2010, HADLEY, 1735).

A teoria de Hadley, publicada em 1735, no artigo denominado *Concerning the cause of the general trade-winds* (Sobre a causa dos ventos alísios gerais), HADLEY, 1735 permaneceu desconhecida, mas foi redescoberta independentemente várias vezes. Outros filósofos naturais encaminharam independentemente explicações para a distribuição global dos ventos logo após a proposta de Hadley. Em 1746, o filósofo, matemático e físico francês Jean le Rond d'Alembert (1717 - 1783) forneceu uma formulação matemática para os ventos globais, mas desconsiderou o aquecimento solar e atribuiu os ventos aos efeitos gravitacionais do Sol e da Lua. O filósofo alemão Immanuel Kant (1724 - 1804), também insatisfeito com a explicação de Halley para os ventos alísios, publicou uma explicação para os ventos alísios e os ventos do oeste em 1756 com raciocínio semelhante ao de Hadley. No final do século XVIII, o matemático, astrônomo e físico francês, Pierre-Simon, Marquês de Laplace (1749 - 1827) desenvolveu um conjunto de equações estabelecendo uma influência direta da rotação da Terra na direção do vento. O geólogo e meteorologista suíço Jean-André Deluc (1727 - 1827) publicou uma explicação dos ventos alísios em 1787, semelhantes à hipótese de Hadley, conectando o aquecimento diferencial e a rotação da Terra com a direção dos ventos, Hadley cell, 2023.

O químico, meteorologista e físico britânico John Dalton (1766 - 1844) foi o primeiro a creditar claramente a explicação de Hadley sobre os ventos alísios ao próprio, mencionando o trabalho de Hadley em seu livro de 1793, *Meteorological Observations and Essays* (Observações e ensaios meteorológicos), DALTON, 2018.

Em resumo, Hadley propôs que os ventos alísios são causados pelo movimento de aquecimento do ar próximo ao Equador, que cria uma circulação atmosférica global conhecida como Célula de Hadley.

Na década de 1830, o físico e neurologista prussiano Heinrich Wilhelm Dove (1803 - 1879) observou que a circulação atmosférica não poderia ser explicada apenas pela Célula de Hadley, e com base em suas observações e pesquisas, ele

levantou a hipótese de uma segunda célula de circulação atmosférica de alta latitude conforme (EDWARDS, 2010, DOVE, 2018).

Cerca de 20 anos depois, o meteorologista americano William Ferrel (1817 - 1891) observou que as teorias existentes, não explicavam completamente os padrões de vento e a circulação atmosférica em latitudes médias e altas. Com base em suas próprias observações e em pesquisas anteriores, ele propôs a existência de uma terceira célula de circulação atmosférica. A Figura 3.1 ilustra as três células propostas por Ferrel de acordo com (EDWARDS, 2010, FERREL, 2015).

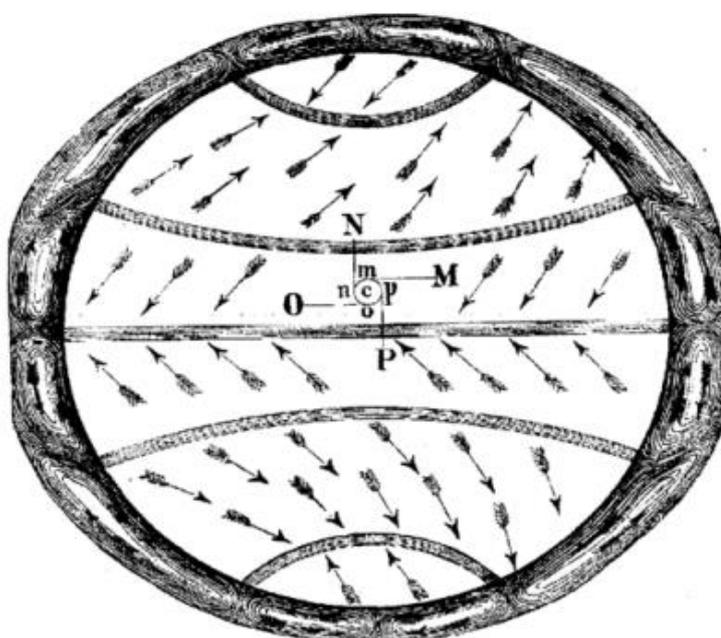


Figura 3.1 - Diagrama de circulação geral de três células de Ferrel, FERREL, 2015.

Cabe observar que embora as pesquisas de Dove e Ferrel tenham abordado aspectos semelhantes, suas propostas de células de circulação atmosférica eram ligeiramente diferentes. Dove propôs uma segunda célula de circulação atmosférica, conhecida como Célula de Ferrel, que ocorreria entre as latitudes médias e as latitudes subtropicais. Já Ferrel desenvolveu uma teoria das três células de circulação atmosférica, que incluía a Célula de Ferrel como uma das três células distintas.

A teoria das três células de circulação atmosférica proposta por Ferrel, que inclui a Célula de Hadley, a Célula de Ferrel e a Célula Polar, é amplamente aceita e considerada uma descrição mais abrangente dos padrões de circulação atmosférica global. Essa teoria fornece uma explicação mais completa dos ventos dominantes,

padrões climáticos e sistemas de alta e baixa pressão que são observados em todo o mundo.

Cabe observar que as células de Hadley e as células polares são células diretas, impulsionadas pela convecção e pela subsidência do ar frio e denso. As células de Ferrel são células indiretas, impulsionadas pelas células diretas ao norte e ao sul delas.

Cabe observar que em altos níveis, a célula de Ferrel não consegue representar os ventos de oeste em latitudes médias. Os ventos de oeste em altos níveis são principalmente causados pela interação entre o gradiente de temperatura e a força de Coriolis. Nas latitudes médias, a superfície é aquecida de forma desigual, criando uma diferença significativa de temperatura entre os trópicos e os polos. Essa diferença de temperatura resulta em um forte gradiente de pressão na atmosfera. Como a atmosfera tenta equalizar as diferenças de pressão, ocorre um movimento de ar do equador em direção aos polos. No entanto, o efeito de Coriolis, causado pela rotação da Terra, desvia o fluxo de ar para a direita no hemisfério norte e para a esquerda no hemisfério sul. Esse desvio cria os ventos de oeste em altos níveis, que fluem de oeste para leste, contrariamente aos ventos de superfície, RITA *et al.*, 2023.

Os modelos físicos, ou seja, modelos analógicos simples, como tigelas ou globos cheios de fluidos turvos e viscosos foram construídos pelo menos a partir do início do século XX. Padrões turbulentos apareciam quando a tigela ou o globo era girado, apresentando uma notável semelhança com os movimentos atmosféricos.

Posteriormente, os chamados modelos *dishpan* usaram um tanque rotativo aquecido na borda e resfriado no centro, simulando assim o aquecimento solar equatorial e o resfriamento polar. Os modelos *dishpan*, são modelos experimentais usados em estudos de dinâmica de fluidos, especialmente na área da meteorologia e da climatologia. Esses modelos são utilizados para simular e investigar o comportamento de fluxos de fluidos em escala reduzida. O termo *dishpan* se refere a uma bandeja ou bacia rasa, geralmente de forma circular, que é preenchida com água ou outro líquido para representar uma superfície de interesse. Essa superfície pode ser a superfície da Terra, oceanos, lagos ou outros corpos de água.

Apesar de suas capacidades muito limitadas, esses modelos analógicos

demonstraram princípios fundamentais de movimento de fluido em globo e inspirou a primeira geração de modelos de circulação geral (EDWARDS, 2010).

Os primeiros modelos matemáticos do clima abordaram o problema calculando o equilíbrio entre a entrada de energia solar e a saída de calor tentando isolar os fatores determinantes. Os ciclos astronômicos claramente desempenharam um papel importante nesta análise podendo-se citar os trabalhos do cientista francês Jean-Baptiste Joseph Adh mar (1797 - 1862), do geólogo e matemático escocês James Croll (1821-1890) e do engenheiro, geofísico e astrofísico sérvio Milutin Milankovitch (1879 -- 1958) comentado em EDWARDS, 2010.

Em 1807, o matemático e físico francês Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768 - 1830), levantou a hipótese de que, ao reter o calor, a atmosfera mant m a temperatura da superfície da Terra muito mais alta do que seria de outra forma. Fourier também descreveu o princípio do equilíbrio radiativo, segundo o qual a Terra mant m um equilíbrio entre a energia que recebe do Sol e a energia que irradia novamente para o espaço. Numerosos teóricos do século XIX exploraram como a Terra recebe e emite radia o e as consequências para a varia o climática no globo, EDWARDS, 2010.

Esses e modelos posteriores de balanço de energia usaram valores medidos ou calculados para fatores como radia o solar, albedo e absor o e radia o atmosférica para calcular a temperatura radiativa global.

Os modelos de balanço de energia de dimensão zero mais simples tratam a Terra como se fosse uma massa pontual, mas o balanço de energia também pode ser calculado unidimensionalmente, por faixas de latitude ou zonas. EBMs também podem ser bidimensionais, com fluxos de energia zonal e longitudinal ou "meridional". Um segundo tipo de modelo climático matemático, o modelo radiativo-convectivo, concentra-se nas transferências verticais de energia na atmosfera. Esses modelos normalmente simulam o perfil de temperatura da atmosfera em uma dimensão (vertical) ou em duas (vertical e meridional). Um terceiro tipo é o modelo estatístico-dinâmico bidimensional, empregado principalmente para estudar as células circulatórias; nestes modelos as dimensões são vertical e meridional, EDWARDS, 2010.

Essas três categorias de modelos desempenham papéis fundamentais na

ciência do clima. O mais simples deles pode ser elaborado à mão. À medida que sua complexidade aumenta, no entanto, torna-se cada vez mais difícil resolver os sistemas de equações envolvidos sem a utilização de um computador, EDWARDS, 2010.

Em 01/1904, o físico e meteorologista norueguês Vilhelm Friman Koren Bjerknes (1862 - 1951) publica o artigo *Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet von Standpunkt der Mechanik und Physik* (O problema da previsão do tempo considerado do ponto de vista da mecânica e da física) onde mostra como calcular a dinâmica do clima em grande escala usando o que agora é conhecido como equações primitivas de movimento e estado, que são equações que descrevem o movimento e termodinâmica de um fluido não homogêneo. Essas equações incluem as leis de movimento de Newton, a equação da conservação do momento linear em um fluido em movimento, a conservação de massa e a equação da energia termodinâmica. O modelo matemático de Bjerknes descrevia como massa, momento, energia e umidade são conservados nas interações entre parcelas individuais de ar. No entanto, as equações de Bjerknes não tinham soluções de forma fechada e ainda não existiam técnicas numéricas capazes de aproximar soluções, (EDWARDS, 2010, BJERKNES, 2009).

Visto a importância de suas equações, Bjerknes argumenta que uma descrição física da atmosfera poderia ser usada para previsão (MCGUFFIE, 2007): “Esperamos que logo chegue o tempo, quando uma declaração completa das condições atmosféricas poderá ser feita diariamente ou em datas específicas. Nesse ponto, a primeira condição para a previsão científica do tempo será atendida”.

Durante a Primeira Guerra Mundial, o matemático, físico, meteorologista, psicólogo e pacifista inglês Lewis Fry Richardson (1881 - 1953) desenvolveu um método de previsão numérica baseado nas equações de Bjerknes, usando uma grade de diferenças finitas.

Os cálculos, que Richardson realizou em 1917, foram baseados em dados observacionais de 12 perfis verticais de pressão e temperatura em diferentes estações da Europa, que, aliás, foram estabelecidos por Bjerknes. Esses dados serviram como condições iniciais para o cálculo. Richardson definiu uma grade de cálculo com resolução de $3^{\circ} \times 1,8^{\circ}$ e cinco camadas verticais em toda a Europa. Consistia em 150 pontos de grade, nos quais as tendências de pressão foram

calculadas. Richardson fez uso das equações primitivas: as equações de conservação do momento horizontal, a equação da continuidade (prescrevendo a conservação da massa) e a equação ideal do gás. A carga de trabalho para o cálculo de uma previsão de 24 horas era enorme e demorou três meses. Os primeiros cálculos de Richardson foram uma conquista significativa do valor do princípio, mas não forneceram previsões confiáveis. A previsão da mudança na pressão de superfície ao longo de seis horas rendeu um valor de 145 hPa. Nem mesmo no centro de um sistema de baixa pressão uma queda tão rápida na pressão pode ser observada conforme STOCKER, 2016.

O problema era que as condições iniciais, neste caso os dados de pressão de superfície, continham pequenos erros que se multiplicavam durante o procedimento numérico e levavam a fortes tendências de pressão. Um cálculo baseado nos mesmos dados, mas filtrado no início ajustando gradientes de pressão anormalmente fortes, levou a uma previsão plausível com os algoritmos de Richardson (3,2 hPa/6 h), STOCKER, 2016.

Como seu experimento não produziu um resultado realista, Richardson concluiu que “o esquema é complicado porque a própria atmosfera é complicada”. Como o teste levou várias semanas de trabalho a lápis, Richardson chegou a perguntar se em um futuro sombrio será possível avançar nos cálculos mais rápido do que o avanço do tempo. Além disso, seus métodos não eram sofisticados o suficiente para evitar que as instabilidades numéricas aumentassem à medida que ele repetia os cálculos, de acordo com (EDWARDS, 2010, MCGUFFIE, 2007).

Apesar de tudo isso Richardson pode ser considerado o pai do que hoje é conhecido como previsão numérica do tempo. Sua técnica de previsão do tempo foi publicada em seu livro de 1922, *Weather Prediction by Numerical Process*, RICHARDSON, 2016 (Previsão do Tempo por Processo Numérico) que estava surpreendentemente à frente de seu tempo. O método que ele criou é o pilar da previsão do tempo moderna. O que Richardson propôs foi dividir a superfície da Terra em uma grade, com cada célula da grade sendo a base de uma coluna vertical de atmosfera, como mostrado nas figuras 3.2 e 3.3. Cada coluna foi então dividida em várias camadas, formando uma grade tridimensional de caixas atmosféricas. A ideia básica era que, se conhecesse os valores de certas variáveis ambientais no centro de cada caixa da grade, poderia usar as equações físicas para calcular seus

valores pouco tempo depois conforme (RICHARDSON, 2016, “Weather Forecasting by Computer”, 2023).

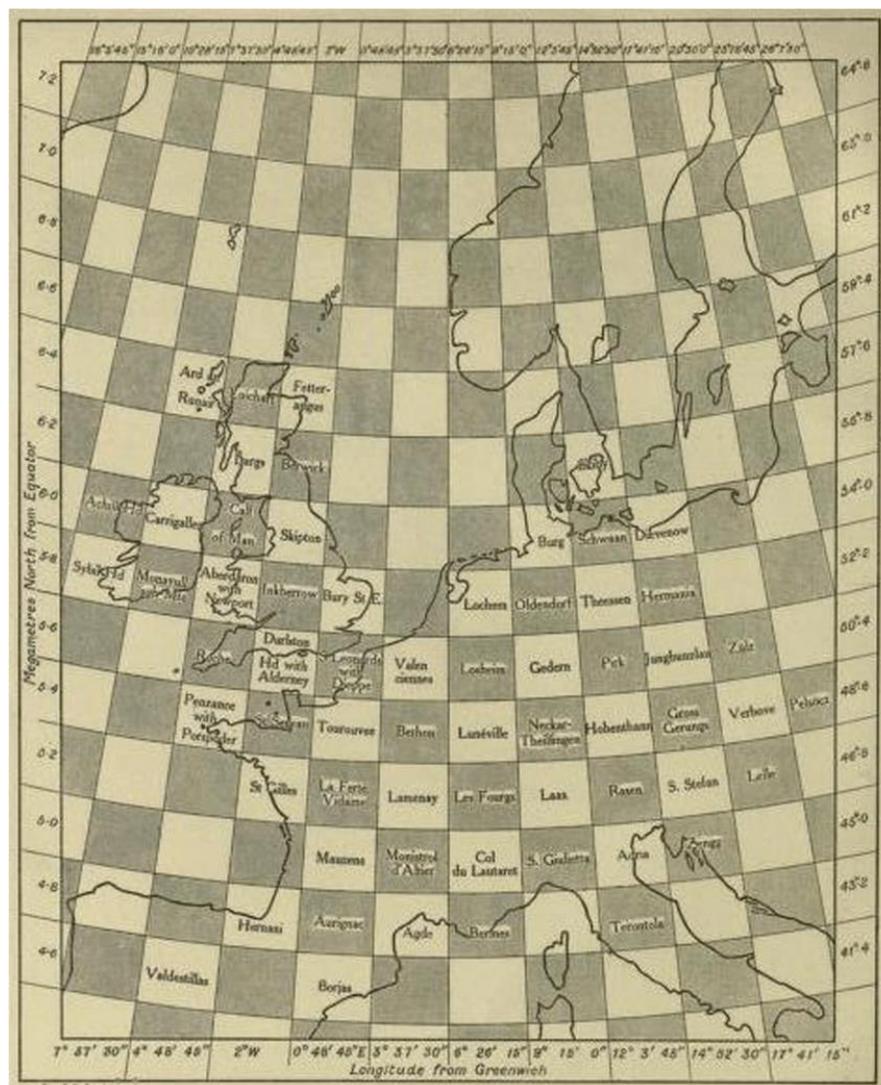


Figura 3.2 - Uma representação da grade na qual Lewis Fry Richardson realizou sua aproximação numérica de uma previsão do tempo para 20/05/1910, HEYMANN, 2018.

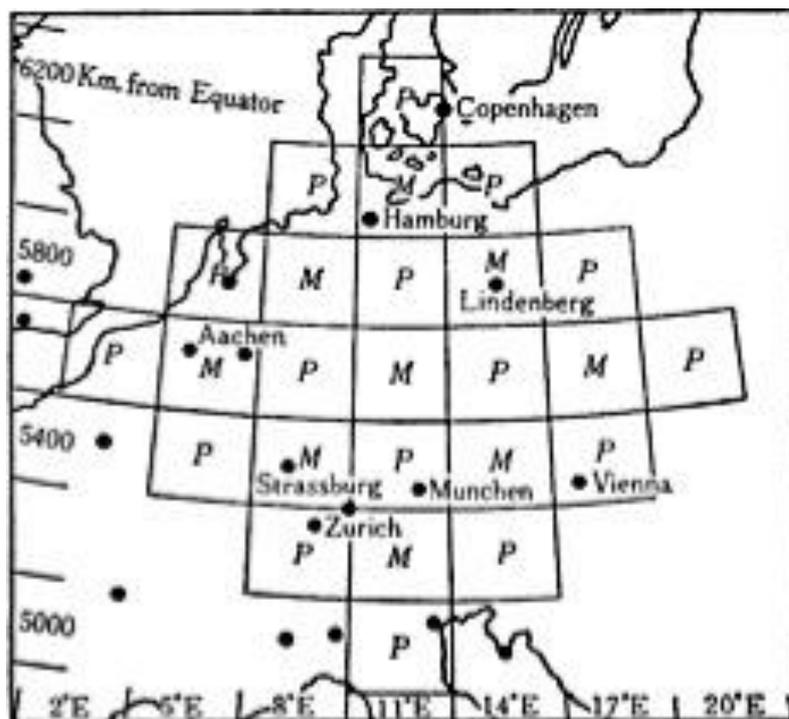


Figura 3.3 - Grade numérica de previsão do tempo de Richardson sobre parte da Europa, “Weather Forecasting by Computer”, 2023.

Como as limitações tecnológicas da época impediram a implementação prática do modelo desenvolvido por Richardson os meteorologistas abandonaram a modelagem numérica nas duas décadas seguintes.

Durante a Segunda Guerra Mundial o engenheiro elétrico John Adam Presper Eckert Jr (1919 - 1995) e o físico John William Mauchly (1907 - 1980), ambos norte-americanos, junto com engenheiros da Universidade da Pensilvânia, em parceria com o Governo Federal dos Estados Unidos, construíram o primeiro computador eletrônico digital de grande escala, conhecido como ENIAC (*Electronic Numerical Integrator and Computer*). O ENIAC foi projetado para fins militares e utilizado para calcular trajetórias de artilharia, realizar simulações e outras tarefas relacionadas à guerra. Composto por milhares de válvulas eletrônicas e milhares de metros de fios, o ENIAC era um enorme sistema que ocupava um grande espaço. Embora fosse muito grande e consumisse muita energia, o ENIAC foi uma conquista pioneira na história da computação, demonstrando o potencial dos computadores eletrônicos digitais para resolver problemas complexos rapidamente. O ENIAC abriu caminho para o desenvolvimento de computadores mais avançados e menores no futuro, impulsionando a evolução da computação e mudando o curso da tecnologia. A

Figura 3.4 ilustra o ENIAC.

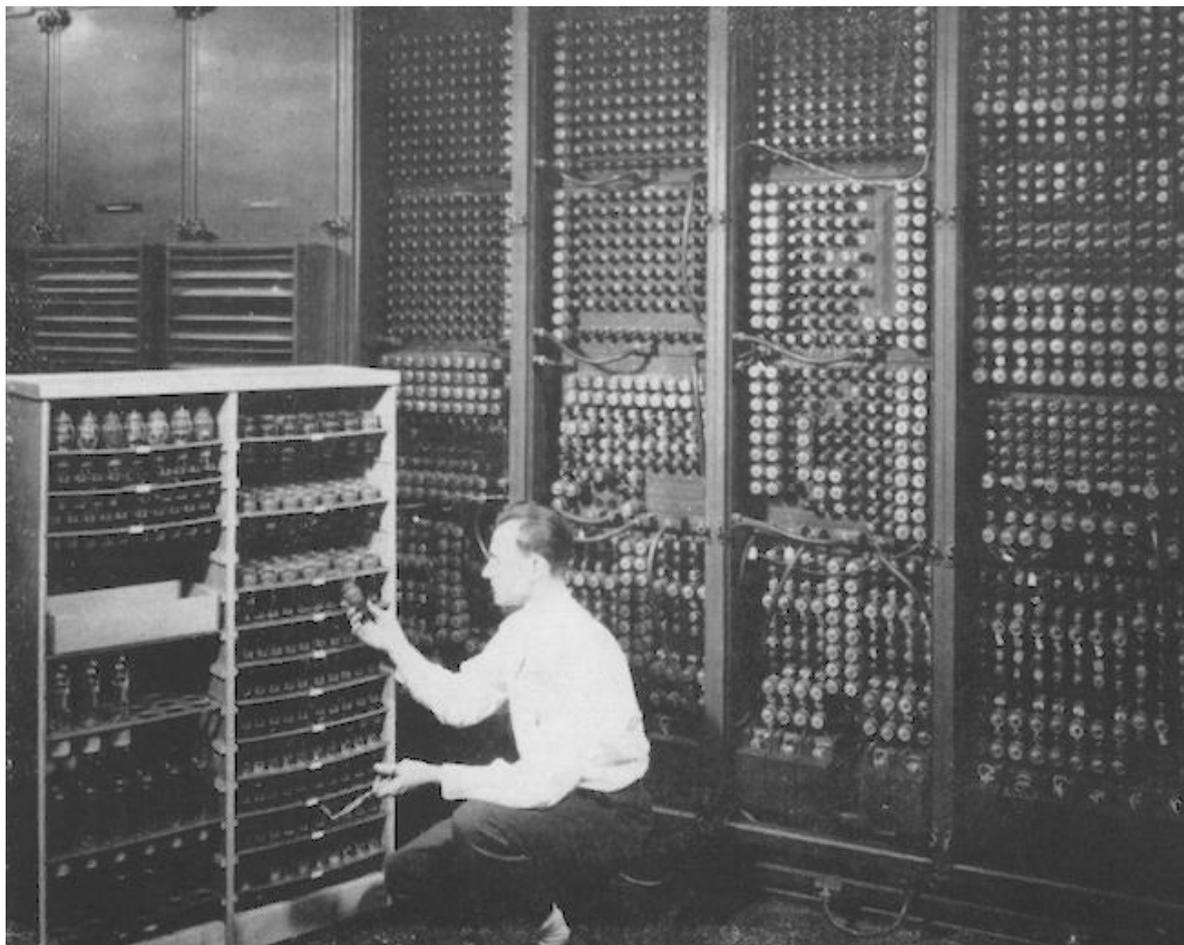


Figura 3.4 - ENIAC, a primeira computação de uso geral sistema desenvolvido para modelagem de armas nucleares, posteriormente usado para modelagem meteorológica numérica, obtido em "Timeline of Climate Models", 2023.

Em 1946, o matemático húngaro, naturalizado americano, John von Neumann (1903 - 1957), nascido Margittai Neumann János Lajos, implementou o primeiro modelo meteorológico numérico verdadeiro aplicando as equações dinâmicas de fluidos não lineares usando o ENIAC.

Finalmente, a era da simulação climática por computador começou. O primeiro modelo climático preciso da equipe de Neumann utilizou um espaço bidimensional com resolução de 700 km em 250 pontos ao longo de uma grade simples. Com esta tecnologia, o tempo estava ocorrendo na mesma taxa que eles eram capazes de computar. Mais ou menos na mesma época, o Serviço Meteorológico da Força Aérea Real Sueca, da Universidade de Estocolmo, foi capaz de prever o tempo três dias à frente. Embora a modelagem sueca fosse

temporalmente avançada, ela carecia de precisão. Infelizmente, em ambos os casos, muitos processos meteorológicos rudimentares foram incorretos, presumidos por falta de conhecimento observacional de acordo com HEYMANN, 2018.

A partir da década de 1950, com o surgimento dos primeiros computadores, os pesquisadores começaram a desenvolver modelos numéricos simplificados para simular a dinâmica atmosférica. Esses modelos iniciais levavam em consideração apenas a atmosfera e a radiação solar, mas já proporcionavam uma visão rudimentar do clima global.

O meteorologista americano Norman Alan Phillips (1923 - 2019) avançou o modelo climático global desenvolvendo um modelo numérico atmosférico de duas camadas na Universidade de Princeton. Ele usou unidades de forma cilíndrica com 16 circunferências de grade e 17 alturas de grade, resultando em uma verdadeira previsão de corrente de jato. Em seu artigo *The general circulation of the atmosphere: a numerical experiment* (A circulação geral da atmosfera: um experimento numérico) é considerado um trabalho clássico publicado em 1956. No artigo, ele apresenta os fundamentos teóricos e as equações utilizadas no modelo numérico, descreve a discretização dessas equações e como elas foram resolvidas numericamente para simular o comportamento da atmosfera em escala global, PHILLIPS, 1956.

Ao longo das décadas seguintes, os modelos climáticos foram aprimorados e se tornaram cada vez mais sofisticados.

Na década de 1960, os modelos climáticos começaram a considerar a influência dos gases de efeito estufa, como dióxido de carbono e metano, na regulação do clima. Os modelos climáticos começaram a incluir a interação entre a radiação solar, a atmosfera e a superfície terrestre, permitindo uma análise mais precisa do balanço de energia e do aquecimento global.

No início da década de 1970, climatologista norte-americano James Edward Hansen (1941 -) implementou a física das nuvens e albedos na estrutura do modelo existente e os modelos começaram a interpretar a Terra com base em suas esferas latitudinais, de acordo com “Timeline of Climate Models”, 2023.

Os primeiros modelos climáticos, desenvolvidos nas décadas de 1960 e 1970, as correntes oceânicas eram frequentemente simplificadas ou ignoradas, pois o foco

principal estava nas interações atmosféricas. No entanto, à medida que os pesquisadores foram reconhecendo a importância dos oceanos na redistribuição de calor e energia, os modelos climáticos foram aprimorados para incorporar as correntes oceânicas.

Na década de 1980, os primeiros modelos climáticos globais acoplados, que combinam a atmosfera, os oceanos e a criosfera, foram criados. Esses modelos representavam melhor os processos físicos envolvidos no clima e permitiam simulações mais precisas do sistema climático em sua totalidade, EDWARDS, 2010.

Em 1988 o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), mais conhecido como IPCC, foi estabelecido pela *World Meteorological Organization* (Organização Meteorológica Mundial), cuja sigla é WMO (OMM) e pelo *United Nations Environment Programme* (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente), cuja sigla é UNEP (PNUMA). O IPCC desempenha um papel fundamental na promoção da modelagem climática e na avaliação dos impactos das mudanças climáticas. Seu objetivo é fornecer aos formuladores de políticas governamentais informações imparciais e atualizadas sobre as mudanças climáticas, seus impactos potenciais e opções de mitigação, de acordo com a publicação do Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.

O papel fundamental do IPCC na modelagem climática é compilar e avaliar o conhecimento científico existente sobre as mudanças climáticas, incluindo a análise de dados e estudos científicos relevantes. Os especialistas do IPCC revisam a literatura científica disponível e sintetizam as informações em relatórios de avaliação periódicos. Esses relatórios revisados por pares são considerados referências-chave para entender a ciência das mudanças climáticas, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.

Os relatórios do IPCC fornecem projeções sobre o clima futuro com base em modelos climáticos sofisticados. Esses modelos são construídos com base em princípios científicos fundamentais e utilizam dados observacionais, conhecimentos físicos e matemáticos para simular as interações complexas entre a atmosfera, os oceanos, a criosfera, a biosfera e outros componentes do sistema climático. As simulações por modelos climáticos ajudam a entender como os fatores naturais e humanos afetam o clima e a prever as mudanças futuras, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.

As conclusões e projeções do IPCC são amplamente utilizadas por governos, formuladores de políticas, instituições acadêmicas, organizações não governamentais e outros atores envolvidos na tomada de decisões relacionadas ao clima. As informações fornecidas pelo IPCC são cruciais para orientar ações de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, influenciar políticas públicas e promover a conscientização global sobre os desafios climáticos a serem enfrentados, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.

Portanto, a importância do IPCC na modelagem climática reside na sua função de sintetizar o conhecimento científico, estabelecer consensos, fornecer informações confiáveis e embasar decisões políticas relacionadas às mudanças climáticas. Ele desempenha um papel fundamental na compreensão das implicações do aquecimento global e no desenvolvimento de estratégias para enfrentar esse desafio global.

Na década de 1990, os modelos climáticos começaram a incorporar os efeitos dos gases de efeito estufa, como dióxido de carbono e metano, na atmosfera. Esses modelos demonstraram a importância desses gases na regulação do clima e permitiram projeções do aquecimento global futuro.

Em 1994, houve melhorias na resolução espacial dos modelos climáticos, permitindo uma representação mais detalhada dos processos climáticos em diferentes regiões do mundo. Isso resultou em uma melhor simulação de fenômenos climáticos regionais e eventos extremos.

Em 1995, foi lançado pelo IPCC, o *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP), que em português pode ser traduzido como Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados, um projeto de comparação de modelos acoplados que foi estabelecido para avaliar e comparar modelos climáticos em todo o mundo, e é um esforço colaborativo entre a comunidade científica global. O CMIP padroniza os experimentos e as metodologias de avaliação dos modelos climáticos. Essa colaboração internacional permite a comparação e aprimoramento dos modelos desenvolvidos em diferentes instituições.

Na década de 2000, os modelos climáticos globais passam a incorporar uma gama mais ampla de processos, como a química atmosférica, a interação oceano-atmosfera, a dinâmica do gelo marinho e a interação com a biosfera.

Na década de 2000, os modelos climáticos começaram a levar em consideração os feedbacks das nuvens, que desempenham um papel crucial no balanço de energia da Terra. A compreensão e a representação desses feedbacks foram aprimoradas, contribuindo para uma melhor simulação do clima, “Introduction to climate dynamics and climate modelling - Cloud feedback”, 2023.

Em 2005, os modelos climáticos começaram a incluir ciclos de carbono terrestres e oceânicos para melhorar a representação dos processos de absorção e liberação de dióxido de carbono. Essa inclusão permitiu uma análise mais precisa da dinâmica do carbono na atmosfera e seu impacto no clima.

A partir de 2010, os modelos climáticos acoplados, que incorporam interações entre a atmosfera, o oceano, a criosfera e a biosfera, se tornaram mais comuns, o que permitiu uma simulação mais realista dos processos climáticos e uma melhor compreensão das interações complexas entre os diferentes componentes do sistema climático.

Também houve um avanço significativo na capacidade de modelagem climática devido ao aumento do poder computacional, o que permitiu a utilização de modelos climáticos de alta resolução, que incorporam detalhes mais finos na representação dos processos climáticos. Esses modelos têm sido capazes de simular de forma mais precisa fenômenos climáticos regionais e eventos extremos.

Em 2011, os modelos climáticos começaram a levar em consideração feedbacks amplificadores, como o derretimento do gelo polar e a liberação de metano a partir de depósitos de hidratos de metano. Esses feedbacks podem acelerar as mudanças climáticas e têm sido alvo de estudos mais detalhados na modelagem climática, “Introduction to climate dynamics and climate modelling - Cloud feedback”, 2023.

Dois anos depois, houve avanços na modelagem dos oceanos, com modelos climáticos mais sofisticados incorporando uma representação tridimensional mais precisa da circulação oceânica. Isso inclui a simulação de correntes oceânicas de grande escala, como as correntes do Golfo e das correntes de retorno, que desempenham um papel importante no transporte de calor e na distribuição de nutrientes, “NOAA Launches First National Rip Current Forecast Model”, 2023.

Em 2015, os modelos climáticos começaram a incorporar de forma mais

precisa os efeitos do declínio do gelo marinho no Ártico, incluindo a simulação das interações entre a atmosfera, o oceano e o gelo marinho, bem como os impactos no clima regional e global, VIHMA, 2014.

Em 2017, além dos modelos climáticos globais, houve um aumento no desenvolvimento e utilização de modelos climáticos de escala regional. Esses modelos permitem uma simulação mais detalhada do clima em regiões específicas, fornecendo informações valiosas para estudos de impactos climáticas regionais e tomada de decisões locais.

A partir de 2020, com a disponibilidade de um grande volume de dados climáticos observacionais, houve uma ênfase maior na integração desses dados nos modelos climáticos. A assimilação de observações atmosféricas e oceânicas em tempo real, melhora a precisão e a confiabilidade das previsões e projeções climáticas.

Essa é uma linha do tempo geral e não inclui todos os avanços e desenvolvimentos específicos que ocorreram na modelagem climática desde 2010 até o presente. A modelagem climática continua sendo uma área de pesquisa ativa, e novas técnicas e aprimoramentos são constantemente implementados para melhorar nossa compreensão e capacidade de prever as mudanças climáticas.

A linha do tempo referente à modelagem climática começou citando um simples e indefinido homem das cavernas e termina citando o meteorologista e climatologista nipo-estadunidense Syukuro "Suki" Manabe (1931 -) da Universidade de Princeton, Nova Jersey, nos Estados Unidos e o oceanógrafo e modelador climático alemão Klaus Hasselmann (1931 -) do Instituto Max Planck de Meteorologia, Hamburgo, Alemanha.

Em 5/10/2021, a Real Academia Sueca de Ciências decidiu conceder o Prêmio Nobel de Física 2021 “por contribuições inovadoras para nossa compreensão de sistemas físicos complexos”, sendo metade em conjunto para Syukuro Manabe e Klaus Hasselmann “para a modelagem física do clima da Terra, quantificando a variabilidade e prevendo de forma confiável o aquecimento global” e a outra metade a Giorgio Parisi “pela descoberta da interação de desordem e flutuações em sistemas físicos de escalas atômicas a planetárias” de acordo com o “The Nobel Prize in Physics 2021”, 2023.

Um sistema complexo de importância vital para a humanidade é o clima da Terra. Manabe demonstrou como o aumento dos níveis de dióxido de carbono na atmosfera leva ao aumento das temperaturas na superfície da Terra. Na década de 1960, ele liderou o desenvolvimento de modelos físicos do clima da Terra e foi a primeira pessoa a explorar a interação entre o balanço de radiação e o transporte vertical de massas de ar. Seu trabalho lançou as bases para o desenvolvimento dos modelos climáticos atuais, “The Nobel Prize in Physics 2021”, 2023.

Cerca de dez anos depois, Hasselmann criou um modelo que liga tempo e clima, respondendo assim à questão de por que os modelos climáticos podem ser confiáveis, apesar do clima ser mutável e caótico. Ele também desenvolveu métodos para identificar sinais específicos, impressões digitais, que tanto os fenômenos naturais quanto as atividades humanas imprimem no clima. Seus métodos foram usados para provar que o aumento da temperatura na atmosfera é devido às emissões humanas de dióxido de carbono, “The Nobel Prize in Physics 2021”, 2023.

A Figura 3.5 ilustra estas duas personalidades.



Figura 3.5 - Syukuro Manabe e Klaus Hasselmann que receberam metade do prêmio Nobel de Física 2021, Nobel Prize in Physics 2021, 2021.

Como comentado, das previsões meteorológicas analógicas no início do século XX a modelos digitais complexos no século XXI, os modelos climáticos passaram por avanços juntamente com o rápido desenvolvimento tecnológico no

poder do computador.

Isto possibilitou que o modelo de circulação geral atmosférica, usado até meados da década de 1980, fosse aprimorado chegando aos modelos de circulação geral atmosfera - oceano, além de possibilitar que outros componentes do sistema terrestre, como gelo marinho, superfície terrestre e oceanos, pudessem ser introduzidos.

Com os avanços dos recursos computacionais foi possível a investigação de processos de escala sub-grade, bem como resoluções de modelo mais finas e técnicas de avaliação de modelo mais completas. A capacidade de acoplar totalmente componentes climáticos complexos de grande escala e seus processos internos permitiu o desenvolvimento de simulações multimodelos de décadas e séculos, VENNI, 2019.

Cabe observar que estes rápidos avanços não exclui erros de modelo. Como os modelos acoplados usados em simulações multimodelos tendem a ter uma estrutura semelhante e às vezes incluem partes do mesmo código de computador, eles não são estatisticamente independentes, indicando que erros sistemáticos ainda podem estar presentes, VENNI, 2019.

Além disso, a medida de sensibilidade de colocar confiança nos resultados do modelo que concordam com os dados observacionais do século XX precisa ser vista criticamente por causa do curto período de tempo das observações, PACHAURI, 2014

Uma descrição simples dos modelos climáticos é a pirâmide de modelagem climática, mostrado na Figura 3.6. Os modelos simples estão na base e mais complexos na parte superior. Maior significa mais complexo, mas não necessariamente "melhor", MCGUFFIE, 2007.

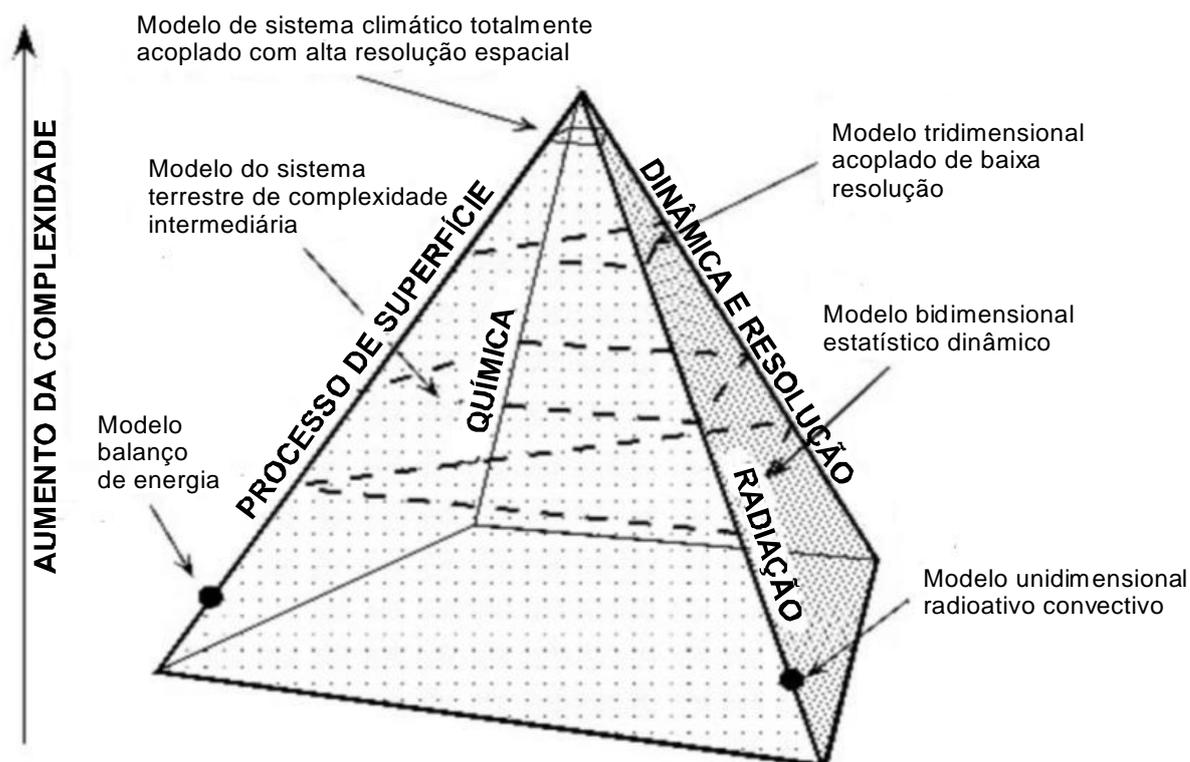


Figura 3.6 - Uma pirâmide de modelo climático mostrando complexidade crescente do modelo global no eixo vertical e os processos primários que interagem uns com os outros ao longo dos contornos: radiação, dinâmica, resolução, química e processos de superfície, adaptado de MCGUFFIE, 2007.

Cabe observar os mais sofisticados com complexidade avançada, mais componentes e maior resolução são esperados, mas o aumento da complexidade não é necessariamente a melhor forma de estudar o clima, o que pode deixar espaço para o desenvolvimento de modelos mais simples.

É importante ressaltar que a evolução dos modelos climáticos é contínua, com aprimoramentos constantes para refletir melhor as complexidades do sistema climático. A colaboração entre instituições e o acesso a tecnologias avançadas são essenciais para a evolução contínua desses modelos e para fornecer informações valiosas sobre as mudanças climáticas.

Concluindo, McGuffie, 2007, destaca 6 marcos no desenvolvimento computacional dos modelos climáticos, que são:

- Marco 1 -- 1947: o transistor, o que tornou o computador confiável possível.
- Marco 2 -- 1956: o primeiro manual FORTRAN. A sociedade secreta de programação de computador é aberta.

- Marco 3 -- 1976: nasce o supercomputador, sendo o primeiro Cray 1 instalado.
- Marco 4 -- 1980: resposta em subsegundos e o surgimento de interatividade. Expansão rápida na análise de resultados.
- Marco 5 -- 1990: intercâmbio de documentação html e www e resultados do modelo. Melhor documentação e compartilhamento de dados.
- Marco 6 -- 2000: magnetorresistência gigante, GMR. Fenômeno físico que descreve a mudança na resistência elétrica de materiais em camadas finas quando expostos a um campo magnético externo. Essencial para avanços tecnológicos em áreas como armazenamento de dados e sensores magnéticos. Descoberto independentemente pelos físicos francês Albert Fert (1938 -) e alemão Peter Grünberg (1939 - 2018).

3.3. Classificação dos Modelos Climáticos

Os modelos climáticos desempenham um papel crucial ao fornecer visões sobre as interações entre os diferentes componentes do sistema climático e ao estimar possíveis mudanças futuras.

Como já comentado, com o intuito de representar com precisão o sistema climático, os pesquisadores desenvolvem modelos que consideram uma variedade de fatores, como a escala temporal, a resolução espacial, a representação dos processos físicos e a complexidade dos componentes modelados.

A classificação dos modelos climáticos busca agrupar essas características e abordagens em categorias distintas, permitindo uma melhor compreensão e aplicação dos modelos para fins específicos.

Ao classificar os modelos climáticos, é possível identificar os diferentes enfoques adotados na modelagem do clima, bem como as limitações e as capacidades de cada modelo.

Essa categorização auxilia na seleção do modelo mais apropriado para determinados estudos ou projeções climáticas, levando em consideração o nível de detalhamento desejado, a escala espacial de interesse e a natureza dos processos

físicos que se pretende simular.

Além disso, a classificação dos modelos climáticos também permite uma comparação mais precisa entre diferentes abordagens e o estabelecimento de padrões de referência para avaliar a confiabilidade e a acurácia dos resultados obtidos.

O entendimento da classificação dos modelos climáticos é essencial para aprimorar a capacidade de prever e adaptar-se às mudanças climáticas, bem como para embasar políticas e decisões relacionadas ao clima.

Existem vários tipos de classificações para os modelos climáticos, que inclusive se entrelaçam, sendo descritos a seguir o de interesse no presente trabalho.

Uma das classificações para os modelos climáticos é baseada na escala espacial que leva em consideração a resolução e a abrangência geográfica dos modelos, ou seja:

- Modelos globais
- Modelos regionais
- Modelos de mesoscala
- Modelos de microescala

Os modelos globais, também conhecidos como modelos de circulação geral (GCM ou MCG), são os modelos climáticos mais abrangentes e representam o sistema climático globalmente. Eles dividem a Terra em grades tridimensionais e simulam processos atmosféricos e oceânicos em todo o planeta. Os modelos globais são usados para prever mudanças climáticas globais, analisar a circulação atmosférica em grande escala e estudar interações entre diferentes regiões climáticas.

Alguns exemplos de modelos climáticos globais:

- Modelo climático *ModelE*, desenvolvido pelo *Goddard Institute for Space Studies*, GISS, da NASA, sendo um componente essencial do *GISS ModelE2-R*, que é usado para realizar simulações climáticas de longo prazo e estudar as mudanças climáticas conforme “GISS GCM ModelE”, 2023.

- Modelo climático *HadGEM*, desenvolvido pelo *Met Office Hadley Centre*, Reino Unido, usado para uma variedade de aplicações, incluindo estudos sobre as mudanças climáticas passadas, presentes e futuras, análises de cenários climáticos futuros e previsões de curto e longo prazo. Ele também contribui para a avaliação dos impactos das mudanças climáticas em diversos setores, como agricultura, recursos hídricos e ecossistemas, conforme “HadGEM3 family: Met Office climate prediction model”, 2023.
- Modelo *Community Earth System Model*, *CESM*, desenvolvido por uma colaboração entre várias instituições de pesquisa científica, lideradas pelo *National Center for Atmospheric Research (NCAR)*, nos Estados Unidos. Sua natureza colaborativa e aberta permite que pesquisadores de diferentes instituições contribuam com melhorias e desenvolvimentos contínuos no modelo. Isso promove a troca de conhecimentos e aprimoramento das simulações climáticas globais, auxiliando na compreensão do sistema climático e fornecendo informações valiosas para a tomada de decisões relacionadas às mudanças climáticas, conforme *Community Earth System Model*, 2023.
- Modelo *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Coupled Model version 3*, *GFDL CM3*, desenvolvido pelo *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)*, que é uma instituição de pesquisa localizada nos Estados Unidos e contribui para o avanço do conhecimento científico relacionado às mudanças climáticas e ajuda a fornecer informações valiosas para a tomada de decisões relacionadas ao clima em escala global, conforme *Global Climate Model*, 2023.

Os modelos regionais apresentam uma resolução espacial mais alta em comparação aos modelos globais se concentrando em uma região geográfica específica, como uma área metropolitana, um país ou um continente. Os modelos regionais utilizam dados de entrada dos modelos globais como condições iniciais e forçantes e refinam a simulação para uma área específica. Estes modelos são úteis para previsões climáticas de curto prazo, estudos de impacto localizado e análise de mudanças regionais no clima.

Alguns exemplos de modelos climáticos regionais:

- Modelo climático *Regional Climate Model*, *RegCM*, desenvolvido pelo *Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP)*, com contribuições de

várias instituições e pesquisadores ao longo dos anos. O ICTP que está sediado em Trieste, Itália, é uma organização internacional que visa promover a pesquisa científica em países em desenvolvimento. Este modelo foi desenvolvido como uma ferramenta para simular e estudar o clima com foco em áreas específicas ao redor do mundo. Ele continua a ser aprimorado e atualizado por uma comunidade global de pesquisadores que trabalham nessa área, conforme “Home ICTP”, 2023.

- Modelo *Weather Research and Forecasting Model, WRF*, desenvolvido em uma colaboração entre o *National Center for Atmospheric Research (NCAR)*, a *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, a *Air Force Weather Agency (AFWA)* e várias outras instituições de pesquisa e universidades, sendo mantido e atualizado por uma equipe internacional de especialistas e amplamente utilizado para previsões meteorológicas e estudos climáticos em escalas regionais e locais, conforme *Community Earth System Model*, 2023.
- Modelo *Consortium for Small-scale Modeling - Climate Limited-area Modelling, COSMO-CLM*, desenvolvido por um consórcio de instituições de pesquisa e meteorologia, conhecido como *Consortium for Small-scale Modeling (COSMO)*. O COSMO é composto por várias organizações e agências nacionais de meteorologia da Europa, como o Instituto Meteorológico Alemão (*Deutscher Wetterdienst, DWD*), o Instituto Federal Suíço de Meteorologia e Climatologia (*MeteoSwiss*) e outros participantes de países europeus, conforme “Consortium for Small-scale Modeling”, 2023.

Os modelos de mesoscala apresentam uma resolução maior do que os modelos regionais e se concentram em fenômenos climáticos em escalas menores, como sistemas de tempestades, frentes atmosféricas e circulação local. Eles geralmente cobrem uma área geográfica de algumas centenas de quilômetros. Estes modelos são úteis para previsões meteorológicas de curto prazo, estudos de microclima e análise de eventos climáticos extremos em escalas regionais.

Alguns exemplos de modelos climáticos de mesoscala:

- Modelo climático *The Fifth-Generation Pennsylvania State University/ National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model, MM5*, desenvolvido como uma colaboração entre a *Pennsylvania State University (PSU)* e o NCAR. O MM5

foi descontinuado e substituído por um modelo sucessor WRF e não há mais um site oficial dedicado exclusivamente ao MM5, conforme “Decode urban nature”, 2019.

- Modelo climático *Application of Research to Operations at Mesoscale, AROME*, desenvolvido pelo *Météo-France*, o serviço meteorológico nacional da França que é o órgão oficial responsável por fornecer previsões meteorológicas e serviços relacionados na França, conforme “Meteociel - Modèle Numérique AROME Meteo-France pour la France”, 2023.
- Modelo climático *Regional Atmospheric Modeling System, RAMS*, desenvolvido pelo professor William R. Cotton e seus colaboradores na *Colorado State University* nos Estados Unidos, que trabalharam ao longo de várias décadas, aprimorando-o para simular os processos atmosféricos em escalas regionais com alta resolução. O RAMS é amplamente reconhecido e utilizado na comunidade científica e meteorológica para estudos climáticos e previsões regionais, conforme “A Description of RAMS”, 2023.

Os modelos de microescala são os modelos que têm a menor resolução espacial e são usados para simular processos climáticos em escala muito localizada. Estes modelos são usados em estudos de fenômenos climáticos em pequenas áreas, como fluxo de ar em torno de edifícios ou alterações no uso do solo em áreas urbanas. Os modelos de microescala são úteis para estudos de planejamento urbano, impacto de alterações no ambiente construído e avaliação de microclimas.

Alguns exemplos de modelos climáticos de microescala:

- Modelo climático *Environmental-Visualisation System for Meteorology, ENVI-Met*, desenvolvido pelo grupo de pesquisa *ENVI-Met GmbH*, Alemanha, liderado pelo Dr. Michael Bruse. O modelo, de simulação ambiental, considera a interação entre o ambiente urbano e o clima, fornecendo uma representação detalhada das condições climáticas em áreas urbanas, levando em conta características urbanas e permitindo a visualização intuitiva dos resultados. O modelo é usado para avaliar e planejar estratégias sustentáveis de planejamento urbano, conforto térmico, riscos climáticos e qualidade do ar em ambientes urbanos, conforme “Decode urban nature”, 2019.
- Modelo climático *Large-Eddy Simulation Model, PALM*, desenvolvido por uma

equipe de pesquisadores do *Leibniz Universität Hannover* e do *Forschungszentrum Jülich*, ambos localizados na Alemanha, liderados pelos professores Siegfried Raasch e Björn Maronga. O modelo é uma ferramenta importante para estudar a turbulência atmosférica em áreas urbanas e tem sido aprimorado e atualizado por meio de colaborações e contribuições da comunidade científica, conforme “The PALM Model System”, 2023.

Além das classificações mencionadas anteriormente, existem outras abordagens para classificar os modelos climáticos, que não apresentam interesse neste trabalho, podendo-se citar:

- Classificação baseada na natureza e abordagem
- Classificação baseada na finalidade ou aplicação
- Classificação baseada na complexidade
- Classificação baseada no acoplamento de componentes
- Classificação baseada na resolução vertical
- Classificação baseada nos processos físicos representados
- Outros.

É importante destacar que essas classificações não são mutuamente exclusivas e podem ser combinadas para fornecer uma descrição mais completa dos modelos climáticos. Além disso, as classificações podem variar dependendo da finalidade do estudo ou das necessidades específicas da pesquisa climática.

Ao classificar os modelos climáticos, é possível identificar os diferentes enfoques adotados na modelagem do clima, bem como as limitações e as capacidades de cada modelo. Essa categorização auxilia na seleção do modelo mais apropriado para determinados estudos ou projeções climáticas, levando em consideração o nível de detalhamento desejado, a escala espacial de interesse e a natureza dos processos físicos que se pretende simular.

Além disso, a classificação dos modelos climáticos também permite uma comparação mais precisa entre diferentes abordagens e o estabelecimento de padrões de referência para avaliar a confiabilidade e a acurácia dos resultados obtidos. Essa compreensão aprofundada da classificação dos modelos climáticos é

essencial para aprimorar nossa capacidade de prever e adaptar-se às mudanças climáticas, bem como para embasar políticas e decisões relacionadas ao clima.

Dessa forma, a classificação dos modelos climáticos desempenha um papel fundamental no avanço do conhecimento climático e no desenvolvimento de estratégias eficazes para lidar com os desafios decorrentes das mudanças climáticas. Ao agrupar e distinguir as características e abordagens dos modelos, essa classificação permite explorar o funcionamento do sistema climático em diferentes escalas e aprimorar nossa compreensão dos processos que o regem.

3.4. Sexto Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP6)

Os projetos de intercomparação usados na ciência do clima são baseados em uma ideia simples: executar um conjunto de modelos climáticos numéricos nas mesmas condições e comparar seus resultados.

O projeto *Atmospheric Model Intercomparison Project*, sigla AMIP, que pode ser traduzido como Projeto de Intercomparação de Modelos Atmosféricos, proposto e lançado em 1990 pelo *World Climate Research Program*, WCRP, e pela OMM foi a primeira tentativa de coordenar tal atividade, conforme TOUZÉ-PEIFFER; BARBEROUSSE; LE TREUT, 2020.

O AMIP foi projetado para comparar a resposta dos modelos GCMs, que simulam o comportamento da atmosfera em escala global, em escalas de tempo sazonais e interanuais. Todos os GCMs atmosféricos poderiam participar. A década de 1979 - 1988 foi escolhida como o período de simulação e o protocolo impôs a todos os modelos condições de contorno específicas, valores padronizados mais precisamente para a constante solar e concentrações atmosféricas de CO₂, bem como a temperatura média da superfície do mar observada e distribuições de gelo marinho e uma saída de resultados padronizada, TOUZÉ-PEIFFER; BARBEROUSSE; LE TREUT, 2020. .

O artigo denominado *Global change - AMIP: The atmospheric model intercomparison Project*, de autoria de William L. Gates, publicado em 1992 no *Bulletin of the American Meteorological Society*, GATES, 1992, apresenta uma visão detalhada do AMIP e sua importância para o estudo das mudanças climáticas

globais. O autor destaca o design experimental, a comparação de modelos, a participação internacional e a busca por modelos mais precisos e confiáveis como os principais aspectos do projeto.

O AMIP foi um passo importante para a modelagem climática, graças a ele, os modeladores climáticos tiveram pela primeira vez acesso a uma estrutura institucional para comparar e avaliar o desempenho de seu modelo em condições semelhantes.

Diferentes projetos de intercomparação se seguiram, podendo-se citar em particular o *Coupled Model Intercomparison Project*, sigla CMIP, que pode ser traduzido como Projeto de Intercomparação de Modelo Acoplado considerado como “um dos elementos fundamentais da ciência do clima”, GATES, 1992.

Desde a sua criação em meados da década de 1990, evoluiu em seis fases, envolvendo todos os principais grupos de modelagem climática do mundo. Além de seu papel na pesquisa do clima, essas fases ocuparam um lugar central nos relatórios do IPCC.

Os dados obtidos com estes modelos serão utilizados nas análises dos próximos capítulos.

3.4.1. Descrição

O CMIP é um projeto internacional que visa avaliar e comparar os resultados de modelos climáticos globais, constituindo uma colaboração entre várias instituições de pesquisa climática em todo o mundo, coordenada pelo *World Climate Research Programme* (WCRP) e pelo IPCC.

O WCRP, que pode ser traduzido como Programa Mundial de Pesquisa sobre o Clima, é uma organização internacional que coordena e promove a pesquisa científica relacionada ao clima global e suas interações com a biosfera, hidrosfera, criosfera e geosfera (“World Climate Research Programme”, 2023). Por meio de seus projetos e iniciativas, busca-se melhorar a compreensão do sistema climático e fornecer informações científicas relevantes para a sociedade e os formuladores de políticas públicas.

O IPCC já foi comentado anteriormente.

O CMIP tem como objetivo melhorar a compreensão das mudanças climáticas e fornecer projeções mais confiáveis do clima futuro. Para isso, os modelos climáticos participantes são executados com um conjunto padronizado de experimentos, nos quais diferentes cenários de emissões de gases de efeito estufa e outras forçantes climáticas são consideradas.

Os modelos climáticos do CMIP são conhecidos como modelos climáticos acoplados, pois simulam a interação entre a atmosfera, o oceano, a criosfera (camada de gelo e neve) e a superfície terrestre. Essa interação é crucial para entender os processos climáticos em escala global.

Os modelos do CMIP são altamente complexos e incorporam uma variedade de equações físicas, químicas e biológicas para simular o comportamento dos diferentes componentes do sistema terrestre. Eles são executados em supercomputadores poderosos, dividindo a Terra em uma grade tridimensional e calculando as mudanças em cada ponto da grade ao longo do tempo.

Os resultados do CMIP são usados para informar pesquisas científicas, políticas públicas e tomadas de decisão relacionadas às mudanças climáticas. Eles fornecem uma base importante para entender os impactos das emissões de gases de efeito estufa na temperatura global, nos padrões de precipitação, nos eventos extremos, no nível do mar e em outros aspectos do clima.

3.4.2. Desenvolvimento

O projeto CMIP nasceu da confluência de duas influências. A primeira, devido ao projeto AMIP, que tinha mostrado o potencial de projetos de intercomparação para coordenar e organizar pesquisas em torno de GCMs atmosféricos. Portanto, seria tentador organizar um projeto semelhante para GCMs acoplados. A segunda, devido à carência de simulações de modelos acoplados necessárias para tornar as declarações sobre mudanças climáticas antropogênicas mais robustas.

O CMIP foi iniciado pela comunidade científica internacional no início da década de 1990. Foi uma iniciativa colaborativa que envolveu instituições de pesquisa de vários países ao redor do mundo.

Embora não haja um único indivíduo ou local específico que possa ser atribuído como o iniciador do projeto CMIP, o esforço foi impulsionado por uma necessidade reconhecida na comunidade científica de melhorar a compreensão das mudanças climáticas e aprimorar as projeções climáticas.

A reunião inicial que deu origem ao CMIP reuniu pesquisadores e especialistas em modelagem climática de diversas instituições e organizações internacionais. O objetivo da reunião era discutir a necessidade de estabelecer um projeto colaborativo para comparar e avaliar modelos climáticos acoplados.

Durante a reunião, os participantes reconheceram a importância de melhorar a capacidade dos modelos climáticos em simular o clima global e entender as mudanças climáticas. Foram discutidas a necessidade de avaliar a habilidade dos modelos em reproduzir características conhecidas do clima e identificar as fontes de incerteza nas projeções climáticas.

Os participantes concordaram em estabelecer o CMIP como parte do WCRP e da OMM e definido que seria uma iniciativa de longo prazo, com várias fases ao longo do tempo, cada uma visando melhorias e avanços na modelagem climática.

Ainda durante a reunião inicial, foram discutidos os principais objetivos do CMIP, como a comparação de modelos climáticos acoplados em relação a observações reais, a avaliação do desempenho dos modelos e a identificação de áreas que necessitavam de aprimoramento. Também foram discutidos aspectos técnicos, como a padronização dos experimentos e dos dados utilizados pelos modelos.

Após a reunião inicial, os pesquisadores continuaram a colaborar e desenvolver as diretrizes do projeto, estabelecendo as fases e os experimentos-chave do CMIP. Ao longo dos anos, ocorreram reuniões regulares, workshops e conferências para revisar e atualizar as diretrizes, além de fornecer uma plataforma para o compartilhamento de resultados e avanços científicos.

O CMIP não possui uma sede física específica, pois é uma iniciativa internacional que envolve a colaboração de várias instituições de pesquisa em todo o mundo.

A coordenação do projeto é realizada pelo WCRP, uma organização internacional dedicada à pesquisa climática e composta por várias agências e

organizações científicas de diferentes países, e sua estrutura de coordenação pode envolver diferentes locais de trabalho e colaboração. A comunidade científica do CMIP é formada por cientistas e instituições de pesquisa em todo o mundo, que contribuem para o projeto a partir de seus respectivos locais de trabalho e instituições.

Portanto, não há um local físico centralizado que possa ser identificado como a sede do CMIP. A colaboração e coordenação entre as instituições participantes ocorrem por meio de reuniões, conferências, workshops e comunicação online, permitindo que cientistas de diferentes países e regiões trabalhem juntos para avançar na compreensão das mudanças climáticas por meio do CMIP.

Ao longo dos anos, o projeto CMIP evoluiu e passou por várias fases, cada uma com seus próprios objetivos e avanços científicos. Essa colaboração contínua e a troca de informações entre os pesquisadores de todo o mundo têm impulsionado significativamente o desenvolvimento da ciência climática e contribuído para compreensão das mudanças climáticas globais.

3.4.3. Fases

O desenvolvimento do CMIP evoluiu ao longo de várias fases, resultando em melhorias significativas na modelagem climática global, que são as seguintes:

- CMIP1 -- 1996: transpôs os principais objetivos do AMIP, medir e compreender a capacidade qualidade de GCMs atmosféricos para simular o clima atual - para modelos acoplados. Lançado como um esforço colaborativo para avaliar os modelos climáticos acoplados disponíveis na época. Ele se concentrou em aspectos básicos da simulação climática, como a resposta ao aumento dos gases de efeito estufa, EYRING *et al.*, 2016.
- CMIP2 -- 1996: expandiu o número de modelos participantes e introduziu experimentos mais avançados, como a simulação do último milênio e cenários de emissões futuras. Comparou as mudanças climáticas simuladas por modelos acoplados sob um aumento de 1% ao ano de CO₂. A partir de 1997, esta segunda fase estava assim diretamente alinhada com a comparação realizada no Relatório Suplementar à Avaliação Científica do IPCC, EYRING *et al.*, 2016.

Devido a limitações no processamento de dados e capacidades de armazenamento de dados na época, CMIP1 e CMIP2 incluíam apenas alguns campos de saída e em uma resolução temporal grosseira: por exemplo, temperatura da superfície, precipitação e pressão ao nível do mar foram calculadas em média durante um mês. Essa amostra grosseira foi uma forte limitação para análises baseadas em experimentos. Conseqüentemente, o Grupo de Trabalho sobre Modelagem Acoplada (WGCM), subgrupo do WCRP desempenhando um papel de liderança no CMIP, lançou uma nova fase, CMIP2+, em 1999 para incluir muitos mais campos de modelo e dados diários se possível. No entanto, esta nova fase representou um trabalho adicional significativo para os grupos de modelagem e, no final, o CMIP2+ foi capaz de coletar apenas 12 conjuntos completos de resultados, EYRING *et al.*, 2016.

- CMIP3 -- 2004/2: nova era na pesquisa sobre mudanças climáticas e representou uma grande evolução, com uma ampla gama de modelos climáticos participantes, melhorias nas resoluções espaciais e temporais e a inclusão de mais componentes do sistema terrestre, como a criosfera e a biosfera. Uma grande novidade do CMIP3, em relação às fases anteriores do CMIP, foi a inclusão de experimentos de cenários de mudanças climáticas, ou seja, projeções de mudanças climáticas futuras sob diferentes cenários de emissão. Tais simulações são de grande interesse para os tomadores de decisão, pois podem ser utilizadas como base para a escolha entre diferentes estratégias de mitigação e adaptação. A principal motivação por trás desses experimentos foi ajudar o Quarto relatório do IPCC (AR4) a fornecer “uma melhor avaliação do estado do conhecimento humano sobre a variabilidade climática e as mudanças climáticas a partir dos modelos”. Fornecer avaliações para os relatórios do IPCC foi, portanto, uma motivação central do CMIP3, enquanto era um objetivo secundário para as fases anteriores do CMIP, EYRING *et al.*, 2016.
- CMIP4 -- 2006/2007: concentrou em aprimorar a representação de processos atmosféricos e oceânicos importantes, além de incorporar projeções climáticas para diferentes cenários de emissões.
- CMIP5 -- 2007/2012: fase crucial, com um conjunto mais amplo de modelos e experimentos, incluindo uma melhor representação de nuvens, ciclos biogeoquímicos e retroalimentações climáticas. O sucesso do CMIP colocou a

comunidade de modelagem climática no centro de interesses contraditórios. Mais e mais pesquisadores fora da comunidade de pesquisa do clima estavam interessados em usar os resultados do CMIP para suas próprias áreas de especialização. Portanto, o CMIP5 foi projetado para satisfazer não apenas as motivações da comunidade de modelagem climática, mas também os de muitos usuários diferentes, EYRING *et al.*, 2016.

- CMIP6 -- 2014/2023: fase atual e mais avançada do projeto. Ela introduziu uma maior diversidade de modelos, resoluções espaciais e temporais aprimoradas e experimentos mais abrangentes, como simulações históricas aprimoradas, cenários de emissões de carbono e forçantes naturais, além de uma representação mais detalhada de processos físicos e biogeoquímicos, além de uma consideração mais completa das incertezas associadas às projeções climáticas.

Uma linha do tempo destacando os principais marcos do modelo CMIP6 está apresentada a seguir:

- ✓ 2009 - 2011: discussões iniciais sobre o planejamento do CMIP6 começam a ocorrer.
- ✓ 2011 - 2013: reuniões e consultas com a comunidade científica para estabelecer os objetivos científicos e as diretrizes para o CMIP6.
- ✓ 2013: o design conceitual do CMIP6 é finalizado, incluindo a definição de experimentos-chave e as metas científicas do projeto.
- ✓ 2014: as primeiras contribuições dos modelos climáticos participantes começam a ser submetidas.
- ✓ 2017: o CMIP6 é oficialmente lançado, com uma ampla gama de modelos climáticos globais sendo executados e os resultados começando a ser analisado.
- ✓ 2019: o conjunto principal de experimentos do CMIP6 é concluído, abrangendo cenários de emissões de gases de efeito estufa, forçantes naturais e simulações históricas.
- ✓ 2021: as análises e avaliações dos resultados do CMIP6 começam a ser publicadas em revistas científicas.
- ✓ 2023: espera-se que a maioria dos modelos climáticos participantes do CMIP6 tenha concluído suas simulações e análises finais.

- ✓ 2025 em diante: as descobertas e os resultados do CMIP6 continuam a serem estudadas e usadas para informar pesquisas, políticas e tomadas de decisão relacionadas às mudanças climáticas.

3.4.4. Estrutura

O CMIP possui uma estrutura hierárquica que envolve diferentes níveis de coordenação, liderança e colaboração. Essa estrutura é projetada para facilitar a organização e execução eficientes do projeto, garantindo a participação de instituições e cientistas de todo o mundo.

Os principais níveis hierárquicos do CMIP são:

- *World Climate Research Programme* -- WCRP: organização responsável pela coordenação geral do CMIP. Ele fornece as diretrizes e orientações estratégicas para o projeto, bem como suporte financeiro e administrativo. O WCRP é composto por agências e organizações científicas de diferentes países e regiões.
- Painel Executivo: formado por pesquisadores e especialistas líderes no campo da modelagem climática. Eles são responsáveis por tomar decisões estratégicas, definir as diretrizes e prioridades do projeto e garantir a integração e colaboração entre as diferentes fases e grupos de trabalho do CMIP.
- Grupos de Trabalho: responsáveis por tarefas específicas dentro do projeto. Eles podem se concentrar em áreas como definição de experimentos, avaliação de modelos, desenvolvimento de métricas e análise de dados. Cada grupo de trabalho é composto por cientistas e especialistas especializados na área correspondente.
- Instituições Participantes: instituições de pesquisa e universidades que contribuem com modelos climáticos e análises são participantes essenciais do CMIP. Essas instituições conduzem as simulações climáticas, compartilham dados, colaboram na interpretação dos resultados e contribuem para a avaliação e comparação dos modelos climáticos.

Dentro dessa estrutura hierárquica, há uma forte ênfase na colaboração, compartilhamento de dados e resultados, e comunicação entre os diferentes níveis e

grupos de trabalho do CMIP. Isso permite uma abordagem integrada e coordenada para o estudo das mudanças climáticas globais e promove a troca de conhecimentos e experiências entre os cientistas envolvidos no projeto.

Ao longo dos anos, o CMIP contou com a liderança de vários pesquisadores renomados que desempenharam o papel de diretores ou coordenadores do projeto. É importante ressaltar que o CMIP é um projeto de longo prazo que passou por várias fases e teve diferentes líderes em cada uma delas.

Alguns dos principais diretores ou coordenadores que contribuíram para o CMIP estão apresentados a seguir:

- Gerald Meehl: um dos primeiros cientistas envolvidos no CMIP e desempenhou um papel fundamental na sua concepção e desenvolvimento. Meehl é um renomado cientista do clima e pesquisador sênior no NCAR nos Estados Unidos. Sua experiência em modelagem climática e sua liderança científica foram cruciais para estabelecer as diretrizes e as metas do projeto, bem como para envolver a comunidade científica global na colaboração e comparação dos modelos climáticos. Meehl tem contribuído significativamente para a compreensão das mudanças climáticas e tem sido uma figura-chave na promoção da pesquisa climática global por meio do CMIP, descrito em “Gerald Meehl”, 2023.
- Karl Taylor: ocupou uma posição de liderança no CMIP3, que ocorreu entre 2004 e 2006. Sua liderança desempenhou um papel crucial no sucesso e na realização dos objetivos do CMIP3. Taylor é conhecido por sua expertise em modelagem climática e sua capacidade de reunir cientistas de todo o mundo para trabalharem em conjunto em um projeto de grande escala. Sua abordagem colaborativa e sua habilidade de gerenciar e coordenar equipes multidisciplinares foram fundamentais para o avanço do CMIP3. O projeto permitiu avanços na compreensão do clima global, melhorias nos modelos climáticos acoplados e a avaliação do desempenho desses modelos em relação às condições climáticas passadas e futuras. Além disso, Taylor desempenhou um papel ativo na comunicação dos resultados e na disseminação das descobertas do CMIP3 para a comunidade científica e para os formuladores de políticas. Seu compromisso em promover a transparência, a colaboração e a confiabilidade das projeções climáticas foi fundamental para garantir a relevância e o impacto do CMIP3,

descrito em "Karl E. Taylor", 2023.

- Detelina Ivanova: coordenou o CMIP5, que ocorreu entre 2007 e 2012, e ajudou a implementar várias melhorias e avanços no projeto. Ivanova, em sua função dentro do CMIP5, desempenhou um papel de liderança e contribuiu para coordenar os esforços de pesquisa e colaboração entre instituições e pesquisadores participantes. Sua experiência e conhecimento em modelagem climática foram cruciais para o sucesso do projeto. Ivanova é reconhecida por seu profundo entendimento dos processos climáticos e sua habilidade em analisar e interpretar os resultados dos modelos climáticos. Sua contribuição para o CMIP5 incluiu a definição de experimentos específicos, o desenvolvimento de protocolos de avaliação dos modelos e a análise dos dados gerados pelos modelos climáticos acoplados. Como líder, Ivanova trabalhou em estreita colaboração com outros especialistas, trocando conhecimentos e experiências para melhorar a compreensão das mudanças climáticas e as projeções futuras. Ela desempenhou um papel fundamental na promoção da transparência e da qualidade dos dados produzidos pelo CMIP5. Sua capacidade de comunicar de forma clara e acessível os resultados complexos da modelagem climática contribuiu para uma compreensão mais ampla das mudanças climáticas e suas implicações, descrito em IVANOVA, 2023.
- Venkatramani Balaji: lidera o CMIP6, a fase mais recente do projeto, que começou em 2014, sendo, Balaji também foi responsável por garantir a qualidade e a transparência dos dados gerados pelo CMIP6. Ele desempenhou um papel fundamental na implementação de diretrizes rigorosas para a análise e a avaliação dos modelos, permitindo que os resultados sejam comparáveis e confiáveis.

A lista acima não é exaustiva e pode haver outros indivíduos que também desempenharam papéis importantes na coordenação e liderança do CMIP ao longo dos anos.

3.4.5. Metas

As metas do CMIP podem variar em diferentes fases do projeto, mas

algumas metas são gerais ao projeto e pode-se citar:

- Compreensão das mudanças climáticas: o CMIP foi concebido para melhorar a compreensão das mudanças climáticas globais e seus impactos. Através da colaboração internacional e da comparação dos resultados de diferentes modelos climáticos, o projeto busca identificar as principais incertezas e avançar na compreensão dos processos climáticos complexos.
- Comparação e avaliação de modelos climáticos: outra meta do CMIP é comparar e avaliar diferentes modelos climáticos acoplados em relação a observações e dados climáticos reais. Isso inclui a avaliação do desempenho dos modelos em reproduzir características conhecidas do clima, como padrões climáticos, circulação atmosférica e variabilidade climática.
- Compreensão dos processos climáticos: o CMIP busca melhorar a compreensão dos processos climáticos e seus mecanismos subjacentes. Isso envolve investigar como os modelos climáticos representam os processos físicos, químicos e biológicos do sistema climático, como interações atmosfera-oceano, ciclos de carbono e feedbacks climáticos.
- Projeções climáticas futuras: um das principais metas do CMIP é fornecer projeções climáticas futuras, permitindo uma melhor compreensão das possíveis mudanças climáticas em diferentes cenários de emissões. Isso envolve a execução de simulações dos modelos climáticos acoplados sob diferentes condições, como diferentes concentrações de gases de efeito estufa.
- Avaliação da incerteza nas projeções climáticas: o CMIP também visa avaliar a incerteza associada às projeções climáticas. Isso envolve a análise de diferentes fontes de incerteza nos modelos climáticos, como incertezas nos dados de forçamento, parâmetros do modelo e estrutura do modelo, a fim de fornecer informações mais robustas sobre as projeções climáticas futuras.
- Compartilhamento de dados e resultados: uma meta fundamental do CMIP é promover a transparência e a colaboração na pesquisa climática. Isso é alcançado por meio do compartilhamento de dados e resultados entre os participantes do projeto, permitindo a análise comparativa e o avanço coletivo do conhecimento climático.

- Melhoria da confiabilidade das projeções climáticas: outra meta do CMIP é estabelecer diretrizes e protocolos comuns, permitindo uma avaliação comparativa dos modelos climáticos e o desenvolvimento de projeções mais confiáveis e robustas. Cabe lembrar que antes do CMIP, havia uma falta de padronização e coordenação na modelagem climática, o que resultava em uma ampla variedade de projeções climáticas com resultados inconsistentes.

3.4.6. Acesso aos dados climáticos do projeto CMIP6

O CMIP disponibiliza uma ampla gama de dados climáticos produzidos por diferentes modelos climáticos acoplados.

Como comentado, o CMIP está agora em sua sexta fase, CMIP6. O CMIP6 coordena atividades de intercomparação de modelos um tanto independentes e seus experimentos que adotaram uma infraestrutura comum para coletar, organizar e distribuir resultados de modelos que executam conjuntos comuns de experimentos. Os dados de simulação produzidos por modelos nas fases anteriores do CMIP foram usados em milhares de trabalhos de pesquisa (alguns dos quais estão listados em alguns *sites* da Internet), e os resultados de vários modelos fornecem alguma perspectiva sobre erros e incertezas em simulações de modelos. Esta informação provou ser inestimável na preparação de relatórios de alto perfil avaliando a compreensão do clima e das mudanças climáticas (por exemplo, os Relatórios de Avaliação do IPCC), comentado em “cmip6 - Home | ESGF-CoG”, 2023.

Esses dados climáticos abrangem várias variáveis e aspectos do sistema climático e são produzidos pelos institutos participantes do projeto CMIP6.

Alguns exemplos dos tipos de dados e variáveis climáticas disponíveis no CMIP6 incluem:

- Variáveis atmosféricas: dados como temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, radiação solar incidente e precipitação.
- Variáveis oceânicas: dados sobre temperatura da superfície do mar, salinidade, correntes oceânicas, níveis de oxigênio dissolvido e concentrações de nutrientes.

- Variáveis relativas ao gelo marinho: dados relacionados à extensão e espessura do gelo marinho, concentração de gelo marinho e outros parâmetros relacionados ao gelo no oceano.
- Variáveis de quantidade de carbono: informações sobre concentrações de dióxido de carbono (CO₂), assim como fluxos de carbono entre a atmosfera, a vegetação e o solo.
- Forçantes externas: dados sobre forçantes externas do sistema climático, como concentrações de gases de efeito estufa, emissões antropogênicas, aerossóis atmosféricos e atividade solar.
- Projeções climáticas futuras: também são disponibilizados dados de projeções climáticas futuras, permitindo explorar diferentes cenários de emissões e analisar as mudanças climáticas esperadas em escalas de tempo futuras.

E importante destacar que o conjunto completo de dados pode variar entre os modelos e instituições participantes do projeto.

Os dados estão geralmente disponíveis em formatos padrão, como o *Network Common Data Form*, comumente conhecido como NetCDF, facilitando sua análise e uso em diferentes plataformas e softwares.

O NetCDF é um formato de arquivo de dados projetado para armazenar, acessar e compartilhar dados científicos e ambientais multidimensionais, oferecendo suporte à anotação de metadados e à compressão de dados, sendo amplamente utilizado na comunidade científica para armazenar e compartilhar dados climáticos, atmosféricos, oceânicos e geoespaciais.

O NetCDF foi desenvolvido pelo *Unidata Program Center*, uma divisão da Universidade de Colorado Boulder, nos Estados Unidos e foi projetado para ser independente de plataforma e linguagem de programação, facilitando a leitura e gravação dos dados em diferentes sistemas operacionais.

Uma das principais características do NetCDF é sua capacidade de armazenar dados multidimensionais, como séries temporais, grades espaciais e volumes tridimensionais, suportando variáveis com metadados, permitindo que os dados sejam anotados com informações sobre unidades, escalas e outras características relevantes.

O formato NetCDF também suporta compressão de dados, o que ajuda a reduzir o tamanho dos arquivos e facilita o transporte e o compartilhamento de grandes conjuntos de dados. Além disso, o NetCDF possui bibliotecas e interfaces em várias linguagens de programação, como C, Python e MATLAB, tornando mais fácil para os pesquisadores acessarem e manipularem os dados armazenados em arquivos NetCDF.

Como exemplo, pode-se citar as variáveis principais disponibilizados pelo CMIP6 mostrado em “CMIP6 climate projections”, 2023.

- Temperatura do ar (K): temperatura na atmosfera em unidades de Kelvin (K). A temperatura medida em kelvin pode ser convertida em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) subtraindo 273,15. Este parâmetro está disponível em vários níveis através da atmosfera.
- Capacidade do solo para armazenar água, capacidade de campo (kgm^{-2}): capacidade total de retenção de água de todo o solo na célula da grade dividida pela área de terra da célula da grade.
- Temperatura máxima diária do ar perto da superfície (K): temperatura máxima diária do ar a 2 m acima da superfície da terra, mar ou águas interiores.
- Temperatura mínima diária do ar perto da superfície (K): temperatura mínima diária do ar a 2m acima da superfície da terra, mar ou águas interiores.
- Vento de leste próximo à superfície (m s^{-1}): magnitude do componente de leste da velocidade do ar horizontal bidimensional 10 m acima da superfície.
- Vento de leste (m s^{-1}): magnitude da componente de leste da velocidade do ar horizontal bidimensional.
- Evaporação incluindo sublimação e transpiração ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$): transferência de calor latente (resultante de mudanças de fase da água, como evaporação, condensação, sublimação e transpiração) entre a superfície da Terra e a atmosfera através dos efeitos do movimento turbulento do ar. A evaporação da superfície da Terra representa uma transferência de energia da superfície para a atmosfera. Indica um componente vetorial que é positivo quando direcionado para baixo (negativo para cima).
- Área da célula da grade para variáveis oceânicas (m^2): a área da célula da grade

no oceano. Os dados são independentes do tempo.

- Porcentagem da área de gelo terrestre (%): fração da célula da grade ocupada por gelo "permanente" (por exemplo, geleiras). Os dados são independentes do tempo.
- Umidade na porção superior da coluna do solo (kg m^{-2}): soma vertical por unidade de área desde a superfície até o fundo do solo modelo de água em todas as fases contidas no solo.
- Temperatura do ar perto da superfície (K): temperatura do ar a 2m acima da superfície da terra, mar ou águas interiores. A temperatura de 2m é calculada interpolando entre o nível mais baixo do modelo e a superfície da Terra, levando em conta as condições atmosféricas.
- Umidade relativa perto da superfície (%): quantidade de umidade no ar perto da superfície dividida pela quantidade máxima de umidade que pode existir no ar em uma temperatura e local específicos.
- Umidade específica próxima à superfície (adimensional): quantidade de umidade no ar próximo à superfície dividida pela quantidade de ar mais a umidade naquele local.
- Velocidade do vento perto da superfície (m s^{-1}): magnitude da velocidade do ar horizontal bidimensional perto da superfície.
- Vento norte próximo à superfície (m s^{-1}): magnitude do componente norte da velocidade do ar horizontal bidimensional 10m acima da superfície.
- Porcentagem da célula da grade ocupada por terra, incluindo lagos (%): porcentagem de terra ou superfície do lago em uma célula da grade. Os dados são independentes do tempo.
- Precipitação ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$): soma da água líquida e congelada, compreendendo chuva e neve, que cai na superfície da Terra. É a soma da precipitação em grande escala e da precipitação convectiva. Este parâmetro não inclui o nevoeiro, o orvalho ou a precipitação que evapora na atmosfera antes de atingir a superfície da Terra. Esta variável representa quantidade de água por unidade de área e tempo.

- Umidade relativa (%): quantidade de umidade no ar dividida pela quantidade máxima de umidade que pode existir no ar em uma temperatura e local específicos.
- Porcentagem de área do mar (%): porcentagem da superfície do mar em uma célula de grade. Os dados são independentes do tempo.
- Espessura do gelo marinho (m): extensão vertical do gelo marinho oceânico.
- Pressão ao nível do mar (Pa): pressão (força por unidade de área) da atmosfera na superfície da Terra, ajustada à altura do nível do mar. É uma medida do peso que teria todo o ar em uma coluna verticalmente acima de um ponto na superfície da Terra, se o ponto estivesse localizado ao nível do mar. É calculado sobre todas as superfícies - terra, mar e águas interiores.
- Altura da superfície do mar acima do geóide (m): distância vertical entre a superfície real do mar e uma superfície de geopotencial constante com a qual o nível médio do mar coincidiria se o oceano estivesse em repouso.
- Salinidade da superfície do mar (PSU): concentração de sal próximo à superfície do oceano. O PSU corresponde a Practical Salinity Unit, unidade utilizada para expressar a salinidade da água do mar.
- Temperatura da superfície do mar (K): temperatura da água do mar perto da superfície.
- Porcentagem de área de gelo marinho na grade oceânica (%): área da superfície do mar ocupada por gelo marinho.
- Profundidade da neve (m): espessura média da neve.
- Fluxo de queda de neve ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$): massa de água na forma de neve precipitada por unidade de área.
- Umidade específica (adimensional): quantidade de umidade no ar dividida pela quantidade de ar mais umidade naquele local.
- Pressão do ar na superfície (Pa): pressão do ar no limite inferior da atmosfera. É uma medida do peso que todo o ar em uma coluna verticalmente acima de um ponto na superfície da Terra. É calculado sobre todas as superfícies - terra, mar e águas interiores.

- Altitude de superfície (m): altura acima do geóide (sendo 0,0 sobre o mar). Os dados são independentes do tempo.
- Tensão do vento de leste para baixo na superfície (Pa): componente para leste do arrasto horizontal exercido pela atmosfera na superfície por meio de processos turbulentos.
- Tensão do vento descendente na superfície (Pa): componente norte do arrasto horizontal exercido pela atmosfera na superfície através de processos turbulentos.
- Radiação de onda longa descendente da superfície ($W m^{-2}$): fluxo radiativo de energia de onda longa para baixo na superfície.
- Radiação de onda curta descendente da superfície ($W m^{-2}$): fluxo radiativo de energia de onda curta para baixo na superfície.
- Quantidade de neve na superfície ($kg m^{-2}$): quantidade de neve no solo, excluindo aquela na planta ou no dossel da vegetação, por unidade de área.
- Temperatura da superfície (K): temperatura na interface (não a temperatura geral do meio acima ou abaixo) entre o ar e o mar para regiões de mar aberto.
- Temperatura da superfície do gelo marinho (K): temperatura que existe na interface do gelo marinho e o meio subjacente que pode ser ar ou neve.
- Fluxo de calor latente ascendente da superfície ($W m^{-2}$): fluxo por unidade de área de calor entre a superfície e o ar devido à evaporação incluindo sublimação. Positivo quando direcionado para cima (negativo para baixo).
- Fluxo de calor sensível ascendente da superfície ($W m^{-2}$): fluxo por unidade de área de calor entre a superfície e o ar apenas pelo movimento do ar. Positivo quando direcionado para cima (negativo para baixo).
- Radiação de onda longa ascendente da superfície ($W m^{-2}$): fluxo radiativo de energia de onda longa da superfície por unidade de área.
- Radiação de onda curta de ressurgência da superfície ($W m^{-2}$): fluxo radiativo de energia de onda longa da superfície por unidade de área.
- TOA radiação incidente de onda curta ($W m^{-2}$): radiação solar incidente recebida do Sol, no topo da atmosfera.

- TOA Radiação de onda longa de saída ($W m^{-2}$): radiação de onda longa do topo da atmosfera para o espaço por unidade de área.
- TOA Radiação de onda curta de saída ($W m^{-2}$): radiação de onda curta do topo da atmosfera para o espaço por unidade de área.
- Porcentagem total de cobertura de nuvens (adimensional): fração da área horizontal ocupada por nuvens, vista da superfície até o topo da atmosfera em toda a coluna da atmosfera.
- Escoamento total ($kg m^{-2} s^{-1}$): quantidade por unidade de área de água líquida superficial e subterrânea que escoou da terra.
- Etc.

Os dados são fornecidos em formatos bidimensionais e tridimensionais, juntamente com uma opção para aplicar subconjuntos espaciais e/ou temporais às solicitações de dados.

De modo geral, com relação aos dados têm-se as seguintes descrições (“CMIP6 climate projections”, 2023):

- Tipo de dados: em grade
- Projeção: grade latitude-longitude regular, grade oceânica.
- Cobertura horizontal: global.
- Resolução horizontal: varia entre os modelos.
- Cobertura vertical: níveis individuais, níveis de pressão (1 - 1000 hPa).
- Cobertura temporal:
 - ✓ De 1850 a 2014 para experimentos históricos.
 - ✓ De 2015 a 2100 para experimentos SSP. Os experimentos SSP, *Shared Socioeconomic Pathways*, são um conjunto de cenários de desenvolvimento socioeconômico que são usados em pesquisas de modelagem climática para avaliar e projetar futuros possíveis. Os SSPs descrevem diferentes trajetórias de desenvolvimento socioeconômico com base em fatores como crescimento econômico, tecnologia, políticas energéticas e demografia. Esses cenários são usados para analisar as interações entre mudanças climáticas,

desenvolvimento socioeconômico e políticas de mitigação. Atualmente, existem cinco SSPs principais: SSP1, SSP2, SSP3, SSP4 e SSP5, que representam uma ampla gama de possibilidades, desde cenários de alto desenvolvimento socioeconômico e baixas emissões até cenários de baixo desenvolvimento socioeconômico e altas emissões. Eles são usados como entradas em modelos climáticos e econômicos para projetar e analisar possíveis cenários futuros. No próximo item serão feitos alguns comentários a respeito dos SSPs;

- Resolução temporal: mensal, diária, fixa (sem resolução temporal).
- Convenções Clima e Previsão (CF) Convenção de Metadados CF-1.7. A Convenção CF (*Climate and Forecast Metadata Convention*) é um conjunto de diretrizes e convenções para descrever e compartilhar metadados relacionados a dados climáticos e de previsão. O objetivo do CF é promover a interoperabilidade e a troca de informações entre diferentes conjuntos de dados climáticos, facilitando a compreensão e o uso desses dados por parte da comunidade científica. A versão CF-1.7 refere-se à versão mais recente da Convenção CF, que estabelece padrões e diretrizes para a descrição de metadados em dados climáticos. Essa versão do CF aprimora as versões anteriores, adicionando novas funcionalidades e melhorias. A Convenção CF é frequentemente usada em conjunto com o CMIP para garantir que os metadados dos dados climáticos gerados pelos modelos sejam consistentes e facilitem a comparação e o uso dos resultados do CMIP por pesquisadores em todo o mundo.

A saída do modelo CMIP6 está disponível através de um arquivo de dados distribuído, desenvolvido e operado pela *Earth System Grid Federation, ESGF*, de acordo com TAYLOR, 2023.

A ESGF é uma infraestrutura global para compartilhamento e distribuição de dados climáticos e ambientais em larga escala e foi desenvolvida por um consórcio internacional de organizações e instituições de pesquisa.

A ESGF foi desenvolvida para apoiar a colaboração entre instituições de pesquisa e pesquisadores em todo o mundo, facilitando o acesso a conjuntos de dados climáticos provenientes de uma variedade de fontes e modelos climáticos.

Uma das principais características da ESGF é sua arquitetura distribuída, que permite que os dados sejam armazenados em diferentes servidores em todo o

mundo. Isso garante a redundância e a resiliência do sistema, além de facilitar o acesso aos dados de forma eficiente.

Os dados podem ser acessados por meio de qualquer uma das interfaces da *Web CMIP6 CoG*, que permitem aos usuários pesquisar em todo o arquivo distribuído como se estivesse localizado centralmente (TAYLOR, 2023).

O *Web CMIP6 CoG* é uma plataforma online que fornece acesso e análise interativa de dados do CMIP6.

Por meio desta plataforma, os usuários podem realizar várias tarefas, como selecionar variáveis climáticas específicas, visualizar dados em diferentes formatos (como gráficos e mapas), realizar análises personalizadas e comparar resultados de diferentes modelos climáticos.

Além disso, a plataforma também oferece recursos avançados, como a capacidade de criar e compartilhar painéis interativos personalizados e trabalhar com conjuntos de dados em nuvem, o que facilita o acesso e o processamento de grandes volumes de dados.

Os sites *CMIP6 CoG* atualmente ativos, onde os dados podem ser acessados por qualquer um deles, são os seguintes, comentados em WCRP Coupled Model Intercomparison Project (Phase 6):

- Estados Unidos, PCMDI/LLNL, California: <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>
- Alemanha, DKRZ: <https://esgf-data.dkrz.de/projects/cmip6-dkrz/>
- Reino Unido, CEDA: <https://esgf-index1.ceda.ac.uk/projects/cmip6-ceda/>
- França, IPSL: <https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl/>

Cabe observar que existem opções adicionais para pesquisa dos dados através da interface web.

Em complemento, cabe seguir as seguintes orientações (WCRP Coupled Model Intercomparison Project (Phase 6)):

- O documento de orientação para usuários, e os links nele contidos, devem ser consultado antes de baixar os dados.
- O site do WGCM e as páginas hospedadas pelo PCMDI fornecem informações

básicas.

- O artigo EYRING *et al.*, 2016, apresenta uma visão geral do CMIP6, que também inclui descrições de cada um dos Projetos de Intercomparação de Modelos, MIPs, endossados pelo CMIP6. Uma visão geral do projeto da infraestrutura de apoio à preparação e distribuição do resultado do modelo também é fornecido no artigo BALAJI *et al.*, 2018.
- Os Termos de Uso devem ser seguidos por todos que acessam a saída do modelo CMIP6, portanto, deve ser lido com atenção.
- Devem ser registrados no banco de dados de publicações CMIP6 quaisquer artigos que publicado que façam uso da saída CMIP6.
- Ao acessar os dados climáticos do CMIP6, é importante verificar os requisitos e condições de uso dos dados, como atribuição correta dos dados aos autores ou instituições responsáveis e conformidade com as políticas de uso estabelecidas pelas instituições.
- Deve ser lembrado de que a análise e a interpretação dos dados climáticos do CMIP6 podem exigir conhecimentos específicos em modelagem climática e estatística, sendo recomendável ter familiaridade com as melhores práticas de análise de dados climáticos e, se necessário, consultar especialistas no campo.

3.4.7. Cenários

Como comentado o CMIP6 possui cinco cenários SSP que são utilizados para explorar diferentes trajetórias de desenvolvimento socioeconômico e emissões de gases de efeito estufa.

A seguir estão descritos os cinco SSPs, conforme (“The SSP Scenarios”, 2023, “Shared Socioeconomic Pathways”, 2022):

- SSP1-2.6 – Sustentabilidade (Seguindo a estrada verde): também conhecido como "SSP1-1.9", este cenário representa um futuro onde ações ambiciosas de mitigação são adotadas para limitar o aquecimento global a aproximadamente 1,9 °C acima dos níveis pré-industriais até o final do século. Esse cenário envolve um

rápido desenvolvimento de tecnologias limpas e uma transição para uma economia de baixo carbono.

- SSP2-4.5 (Meio da estrada): neste cenário, são tomadas medidas moderadas de mitigação que resultam em um aquecimento global de cerca de 2,4 °C até o final do século em relação aos níveis pré-industriais. Esse cenário envolve um equilíbrio entre fontes de energia de baixo carbono e o uso contínuo de combustíveis fósseis.
- SSP3-7.0 -- Rivalidade regional (Uma estrada rochosa): representa um futuro onde não há grandes esforços para mitigar as mudanças climáticas, levando a um aquecimento global de aproximadamente 3,7 °C até o final do século em relação aos níveis pré-industriais. Esse cenário é caracterizado por altos níveis de emissões de gases de efeito estufa e uma trajetória de desenvolvimento mais desigual.
- SSP4-3.4 -- Desigualdade (uma estrada dividida): este cenário retrata um mundo onde ocorre uma rápida mudança climática, levando a um aquecimento de aproximadamente 3,4 °C até o final do século em relação aos níveis pré-industriais. Esse cenário é caracterizado por uma população global em declínio, uma maior desigualdade econômica e um foco no desenvolvimento regional.
- SSP5-8.5 -- Desenvolvimento com combustível fóssil (pegando a rodovia): representa um cenário de alto aquecimento, com um aumento de temperatura global de aproximadamente 5,7 °C até o final do século em relação aos níveis pré-industriais. Nesse cenário, as emissões de gases de efeito estufa continuam aumentando sem medidas significativas de mitigação, resultando em um cenário de alto risco climático.

Cada um desses cenários SSP é projetado para explorar diferentes caminhos de desenvolvimento socioeconômico e climático no futuro, permitindo que os modelos climáticos examinem uma ampla gama de possíveis futuros com base em diferentes escolhas políticas e sociais.

Capítulo 4 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA

"A matemática não mente, são as pessoas que mentem."
Jean le Rond d'Alembert, filósofo, matemático e físico (1717- 1783)

Neste capítulo serão desenvolvidas as equações matemáticas necessárias para a avaliação comparativa das mudanças futuras na energia solar no Brasil em dois períodos do presente século, em termos das tecnologias para aproveitar a energia da insolação e as projeções climáticas.

O ponto de partida corresponde ao artigo de referência, *Current and future potential of solar and wind energy over Africa using the RegCM4 CORDEX-CORE ensemble* (SAWADOGO *et al.*, 2020), que faz análises das projeções de energia solar e eólica na África ao longo deste século.

Também serão analisadas publicações citadas no artigo de referência e de outros artigos correlacionados, correspondendo ao estado da arte no assunto.

Serão descritas detalhadamente todas as grandezas utilizadas no artigo de referência e importantes para compreensão do assunto desenvolvido, bem como, demonstrações das equações quando não forem empíricas, descrição das equações empíricas em detalhes e de outras grandezas relacionadas.

4.1. Análise do Artigo de Referência

O artigo de referência (SAWADOGO *et al.*, 2020) foi escrito por um grupo de pesquisadores, em um total de 12 autores, com experiência em meteorologia, climatologia e modelagem climática. Os autores são dos Estados Unidos (2), Alemanha (1), Brasil (2), Nigéria (2), África do Sul (2), Rwanda (1) e Itália (2).

O artigo foi apresentado em 31/12/2019, aceito em 11/07/2020 e publicado em 27/07/2020, na revista científica *Climate Dynamics* especializada em estudos relacionados à dinâmica do clima, tendo a referência <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05377-1>.

O artigo é dividido nos seguintes itens:

- Resumo: fornece um resumo do artigo:
- 1 - Introdução: fornece uma visão geral do estudo, destacando o potencial da energia solar e eólica na África e a importância de avaliar esse potencial.
- 2 - Modelos e Métodos
 - ✓ 2.1 - Descrição do Modelo: são descritos os modelos utilizados no estudo, com destaque para o modelo regional RegCM4 CORDEX-CORE, utilizado para simular as condições climáticas.
 - ✓ 2.2 - Dados: são apresentadas as informações sobre os dados climáticos utilizados na pesquisa.
 - ✓ 2.3 - Metodologia: a metodologia adotada é explicada.
 - 2.3.1 Energia Solar:
 - 2.3.1.1 Energia solar concentrada: a formulação da energia solar concentrada é discutida.
 - 2.3.1.2 Potencial de energia fotovoltaica: o potencial de energia fotovoltaica é discutido.
 - 2.3.2 Densidade de energia eólica (WPD): a densidade de energia eólica é explicada como um indicador do potencial de geração de energia eólica.
- 3 - Resultados e Discussão
 - ✓ 3.1 - Evolução do Modelo: os resultados relacionados à evolução do modelo utilizado são apresentados.
 - ✓ 3.2 - Projeção do Clima
 - 3.2.1 - Mudanças projetadas nas variáveis climáticas: as mudanças projetadas nas variáveis climáticas relevantes para a geração de energia solar e eólica são discutidas.
- 4 - Conclusões: as conclusões do estudo são apresentadas, resumindo os principais resultados e destacando a importância do potencial de energia solar e eólica na África.
- Apêndice: várias figuras adicionais podem ser encontradas neste apêndice.
- Referências: é fornecida a lista de referências bibliográficas citadas no artigo.
- Afiliações: são mencionadas as instituições com as quais os autores estão associados.

O estudo analisou o potencial atual e futuro da energia solar e eólica na África usando o Modelo Climático Regional versão 4, RegCM4, produzido como parte da iniciativa CORDEX-CORE.

O RegCM4 é um modelo amplamente utilizado para simular o clima em escala regional e leva em consideração fatores como radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e outros parâmetros climáticos relevantes

O objetivo principal do artigo foi avaliar o impacto das mudanças climáticas no potencial de energia solar e eólica na África em cenários de emissão de baixo custo (RCP2.6 e alto nível (RCP8.5 usando um conjunto de novos cenários de simulações com o RegCM4.

Para chegar aos seus objetivos, o estudo investigou os impactos potenciais da mudança climática no potencial de energia fotovoltaica (PVP), produção de energia solar concentrada (CSPOUT) e densidade de energia eólica (WPD), sobre a África nos dois cenários citados de modo a obter informações que melhor apontem a vulnerabilidade do potencial de energia solar e eólica às mudanças climáticas na África.

No estudo foi usado um conjunto de alta resolução horizontal, com espaçamento de grade de 25 km, de três projeções RegCM4 do presente século concluídas como parte da iniciativa CORDEX-CORE.

As análises ocorreram tanto para um período de referência atual (1995 - 2014) quanto para dois períodos de tempo futuros, um de curto prazo (2021 - 2040) e outro de meados do século (2041 - 2060), com três GCMs.

As conclusões do estudo apontadas pelos autores são as seguintes:

- Os modelos individuais do RegCM4 e sua média de conjunto simulam razoavelmente bem o padrão espacial de irradiação solar, cobertura de nuvens, temperatura do ar e velocidade do vento a 100 m acima do nível do solo, mas com alguns vieses em diferentes sub-regiões, especialmente para cobertura de nuvens.
- As correlações espaciais com as observações excedem 0,98 para certas variáveis e o conjunto RCM fornece um valor agregado substancial em comparação com os GCMs de direção, especialmente para temperatura do ar na

superfície (TAS):

- Os diferentes modelos de simulação e sua média também reproduzem a distribuição espacial básica observada de PVP, CSPOUT e WPD no continente, mas também com alguns vieses, principalmente para PVP e CSPOUT.
- Projeções sob os cenários de emissão RCP2.6 e RCP8.5 indicam um aumento na irradiância solar (como resultado de uma diminuição na cobertura total de nuvens) e na velocidade do vento para o futuro próximo e médio na maior parte da África. Ocorrem exceções para algumas regiões nas partes nordeste e sudoeste do continente.
- Em geral, as mudanças projetadas para o potencial de energia renovável no futuro próximo e em meados do século são consistentes em ambos os RCPs, mas mais intensas no cenário RCP8.5. Foi observada uma diminuição predominante em PVP, aumento em WPD e resultados mistos em CSPOUT.
- Regiões com forte intensidade de vento no clima atual, como o noroeste da África e o chifre da África, continuarão a apresentar essa característica em meados do século, de fato com potencial aumentado. Assim, com base em nossas simulações, tais regiões seriam apropriadas para investimentos em parques eólicos.

O subitem 2.3.1 do artigo, denominado Energia Solar, é dividido em dois outros identificados como, energia solar concentrada, abreviado por CSP (*concentrated solar power*) e potencial de energia fotovoltaica, abreviado por PVP (*photovoltaic power potential*), termos que se referem ao conceito geral de geração de energia elétrica usando energia solar e que serão avaliados para o Brasil neste estudo.

Cabe observar que os sistemas fotovoltaicos são frequentemente chamados de “PVP” em vez de apenas “PV” para destacar o aspecto de geração de energia elétrica a partir da tecnologia fotovoltaica. A adição do “P” em “PVP” é uma abreviação para "*Power*", referindo à potência. Isso é feito para enfatizar que o objetivo principal desses sistemas é gerar energia elétrica a partir da conversão direta da luz solar em eletricidade por meio de células fotovoltaicas.

O CSP e o PVP são atualmente as duas tecnologias de energia solar mais

amplamente utilizadas, conforme já comentado no capítulo 2, Figura 2.32.

Os sistemas CSP, produzem eletricidade usando a energia térmica da luz solar. A luz solar é primeira concentrada em um receptor através de vários espelhos. A energia focalizada é então utilizada para aquecer o fluido no receptor, produzindo vapor que irá acionar um motor térmico e o gerador de eletricidade. Como o CSP converte primeiro o calor do sol em energia mecânica do motor térmico, ele é considerado um método indireto de geração de eletricidade a partir da energia solar.

Ao contrário do CSP, os painéis fotovoltaicos convertem a luz solar diretamente em eletricidade, através do efeito fotovoltaico. Este efeito é produzido quando a luz do sol incide sobre as células solares, que geram eletricidade em certos semicondutores. Esta eletricidade pode ser armazenada ou enviada para a rede elétrica.

Embora os mecanismos operacionais de CSP e PVP sejam diferentes, suas saídas podem ser estimadas em função de múltiplas variáveis meteorológicas.

Cabe notar que as equações e coeficientes empíricos que são usados para avaliar o potencial de energia solar podem mudar no futuro com os avanços tecnológicos, mas o presente estudo se concentra em avaliar como o potencial de CSP e PVP é influenciado pelas mudanças nas condições meteorológicas em resposta ao aquecimento global, independente do desenvolvimento tecnológico (HA *et al.*, 2023).

Há uma série de termos relacionados à capacidade e produção de CSP e PVP comumente usados com significados substancialmente diferentes, podendo-se citar:

- **Capacidade Nominal**: geralmente se refere à saída nominal da planta ao operar com sua saída máxima, ou seja, a potência máxima que o sistema pode gerar sob condições ideais de forma consistente e confiável. A capacidade nominal é normalmente expressa em termos de quilowatt (kW), megawatt (MW) ou gigawatt (GW). A capacidade nominal também chamada de capacidade de pico, sendo importante observar que esta capacidade é uma medida teórica e representa a capacidade máxima teórica do sistema. Na prática, a geração real de energia pode variar devido a fatores como a disponibilidade de radiação solar, a manutenção do sistema, as perdas de transmissão e outras condições

operacionais. Portanto, a capacidade nominal é um indicador importante, mas a geração real de energia pode ser inferior a essa capacidade, dependendo das circunstâncias. Resumidamente a capacidade nominal é a potência máxima para a qual o sistema foi projetado e otimizado. Também denominada de capacidade instalada.

- Fator de Capacidade: é uma medida de quanta energia é produzida por uma usina em comparação com sua produção máxima. É medido como uma porcentagem, geralmente dividindo a energia total produzida em um ano pela quantidade de energia que teria produzido se funcionasse em plena produção naquele ano. Também pode ser expresso como a razão entre a produção média e a produção máxima ao longo de um ano.
- Potência Elétrica Bruta: é a quantidade de energia elétrica produzida pelo sistema CSP ou PVP antes de qualquer perda ou consumo interno. É a capacidade máxima de geração de eletricidade que o sistema pode alcançar em um determinado momento. Essa potência é expressa em watts (W), kilowatts (kW), megawatts (MW) ou gigawatts (GW) e representa a capacidade total de geração do sistema em condições ótimas.
- Potência Elétrica Líquida: é a quantidade de energia elétrica disponível para uso externo após levar em consideração as perdas e o consumo interno do sistema CSP ou PVP. Essa potência é expressa nas mesmas unidades mencionadas acima (W, kW, MW ou GW) e representa a quantidade real de eletricidade que pode ser fornecida à rede elétrica ou aos consumidores.

4.2. Sistemas de Energia Solar Concentrada

Relembrando, a CSP se refere ao conceito geral de geração de energia elétrica usando energia solar. Estes sistemas operam usando espelhos ou lentes para concentrar uma grande área de luz solar em um receptor.

A ideia básica é utilizar dispositivos chamados concentradores solares (espelhos ou lentes) para captar a luz solar e direcioná-la para um ponto central, onde ela é convertida em energia térmica ou elétrica.

Basicamente podem ser identificados quatro tipos principais de tecnologia de sistemas CSP, mostrados na Figura 4.1, que são:

- Sistemas de calhas parabólicas, sigla PTC, que usam espelhos na forma de calhas para concentrar a energia em um tubo receptor de transporte de fluido localizado no ponto focal do espelho. Basicamente o sistema é composto por uma série de refletores parabólicos, geralmente compostos por espelhos revestidos de alta reflexividade. Os refletores rastreiam o movimento do Sol e refletem a luz solar incidente em direção ao receptor que está localizado no foco da calha parabólica. Essa concentração aumenta a intensidade da radiação solar recebida pelo receptor, que contém um tubo absorvedor. O tubo absorvedor é revestido com um material seletivo que absorve a radiação solar e converte-a em calor. O calor é transferido para um fluido de transferência, normalmente óleo sintético, sal fundido ou água que circula nos tubos absorvedores antes de passar por trocadores de calor para produzir vapor. O vapor aciona turbinas que acionam geradores elétricos de modo a produzir eletricidade. Após passar pela turbina, o vapor é resfriado em um condensador e convertido novamente em líquido. Esse líquido é reciclado para o sistema de transferência de calor, onde é aquecido novamente pelo receptor, reiniciando o ciclo.
- Sistemas de torres de energia, sigla SPT, que usam uma matriz de espelhos individuais chamados helióstatos com a finalidade de rastrear o Sol e refletir sua luz em um receptor montado no topo de uma torre alta. Os helióstatos são controlados por computador e ajustados continuamente para otimizar o direcionamento da luz solar e refletem a luz solar em direção à torre central, concentrando-a em um ponto específico no topo da torre, chamado receptor ou receptor solar. No topo da torre, o receptor solar é projetado para absorver a luz solar concentrada e convertê-la em energia térmica. O receptor geralmente contém um fluido de trabalho, como água ou óleo, que é aquecido pela radiação solar intensa. O fluido de trabalho aquecido no receptor solar é transportado para um sistema de transferência de calor, onde transfere o calor para um meio de transferência secundário, como óleo térmico. Esse meio de transferência secundário pode então ser usado para gerar vapor. O vapor produzido pela transferência de calor é direcionado para uma turbina, que aciona um gerador para produzir eletricidade. O vapor passa pela turbina, perde energia e é

convertido novamente em água, que pode ser resfriada e retornar ao sistema para repetir o ciclo.

- Sistema de pratos parabólicos, sigla PDS, que usa espelhos em forma de prato para concentrar e focar os raios do Sol em um receptor, montado acima do prato no centro do mesmo e projetado para rastrear o movimento do Sol. O prato parabólico é coberto por espelhos altamente reflexivos que refletem a luz solar incidente em direção ao receptor no foco do prato. No foco do prato parabólico, está localizado o receptor, que contém um motor Stirling. O motor Stirling é um motor térmico que converte energia térmica em trabalho mecânico. Ele opera com base no ciclo Stirling um ciclo termodinâmico fechado e funciona por meio de um fluido de trabalho, geralmente ar ou gás hélio, que passa por um ciclo de compressão e expansão. O ciclo ocorre em um sistema fechado, onde o fluido é alternadamente aquecido e resfriado para gerar movimento mecânico. A luz solar concentrada pelo prato parabólico é absorvida pelo receptor, aquecendo o fluido de trabalho dentro do motor Stirling. O fluido de trabalho é aquecido a uma temperatura muito alta, o que resulta em aumento de pressão e expansão dentro do cilindro do motor. A expansão do fluido de trabalho empurra um pistão ou cilindro, gerando trabalho mecânico que é utilizado para acionar um gerador, que converte o movimento mecânico em eletricidade. O gerador está conectado ao motor Stirling e gera eletricidade conforme o pistão ou cilindro se move devido à expansão e compressão do fluido de trabalho. Após passar pelo motor Stirling, o fluido de trabalho é resfriado e comprimido novamente para retornar ao início do ciclo. O calor residual gerado durante o processo de resfriamento pode ser aproveitado para outras aplicações, como aquecimento de água ou sistemas de refrigeração.
- Sistemas de refletores lineares de Fresnel, sigla LFR, projetado para concentrar a luz solar em um receptor linear sendo uma alternativa ao uso de espelhos parabólicos convencionais ou torres solares. Esta tecnologia utiliza uma série de espelhos planos e lineares dispostos em paralelo ao longo de uma linha focal. Esses espelhos refletem a luz solar incidente em um tubo receptor colocado acima deles. O tubo receptor contém um fluido de transferência de calor, como água ou óleo, que é aquecido pela radiação solar concentrada. O fluido de transferência de calor aquecido pelo receptor linear é bombeado para um sistema

de armazenamento térmico ou diretamente para um ciclo de geração de energia. No caso de um sistema de armazenamento térmico, o fluido aquecido pode ser utilizado posteriormente para gerar vapor, que aciona uma turbina conectada a um gerador elétrico. A principal diferença entre esta tecnologia e as outras apresentadas é que os espelhos têm uma forma linear em vez de curva, o que permite que o sistema colete a luz solar em um plano horizontal, concentrando-a no receptor linear. Essa geometria simplificada ajuda a reduzir os custos de fabricação e instalação em comparação com outras tecnologias CSP permitindo uma alta eficiência de captura de luz solar. Uma vantagem desta tecnologia é que ela pode operar em temperaturas mais baixas em comparação com tecnologias como torres solares, o que pode facilitar o uso de materiais de armazenamento térmico mais simples e econômicos. Além disso, a tecnologia é capaz de rastrear o movimento do sol ao longo do dia, permitindo uma alta eficiência de captura de luz solar. No entanto, em comparação com outras tecnologias CSP, esta tecnologia tem uma menor concentração de luz solar, o que pode resultar em uma menor eficiência geral. Também pode ser necessário um maior número de espelhos para alcançar a mesma capacidade de geração de energia em comparação com sistemas com espelhos parabólicos ou torres solares.

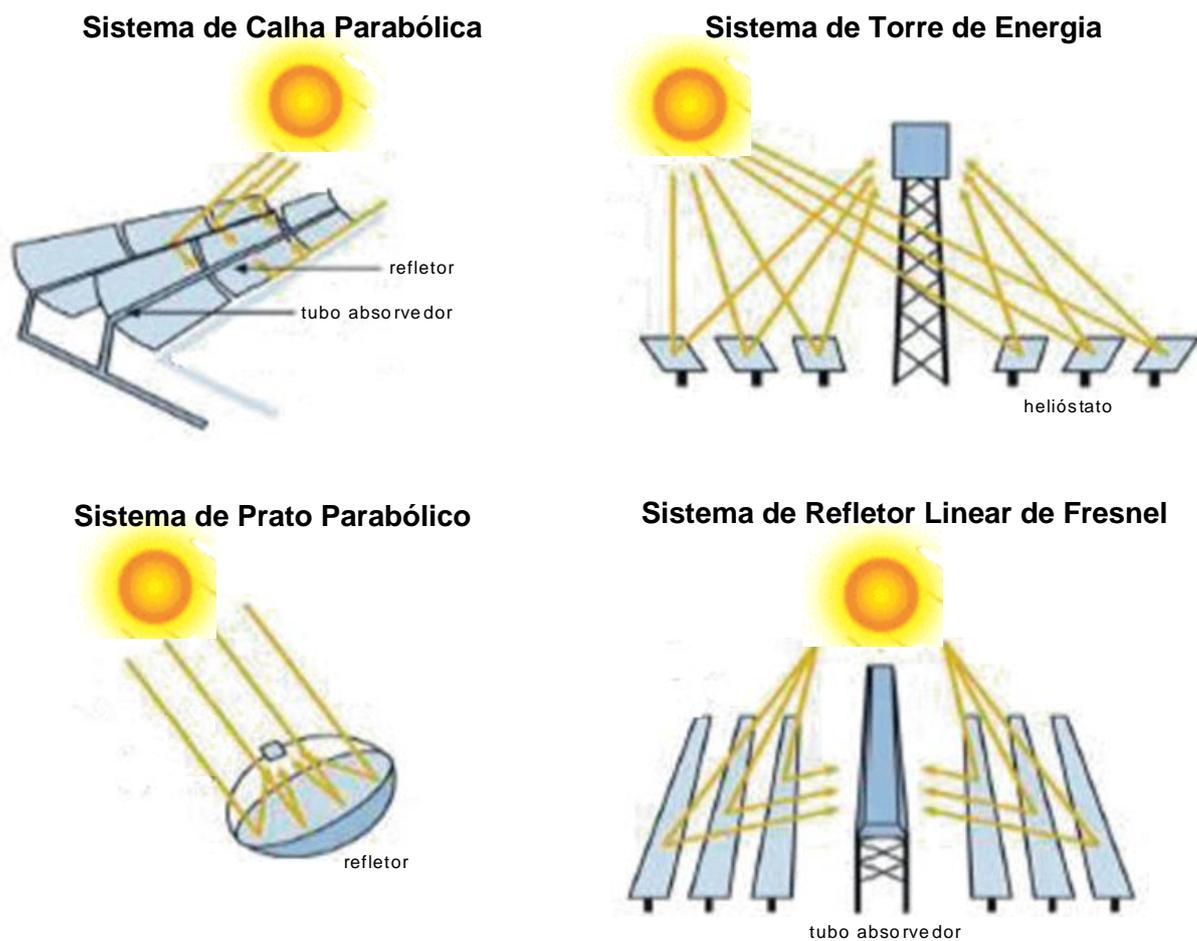


Figura 4.1 - Classificação das tecnologias de sistemas de energia solar concentrada, adaptado de KUMAR; GUPTA, 2021.

A Figura 4.2 mostra as tecnologias descritas mais detalhadamente:

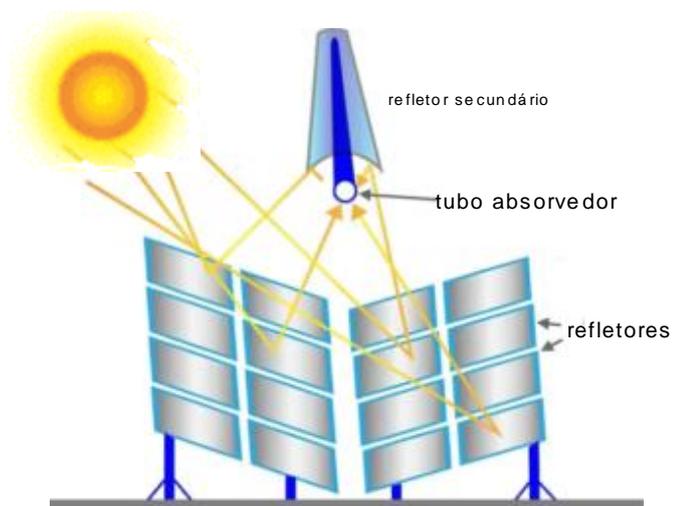
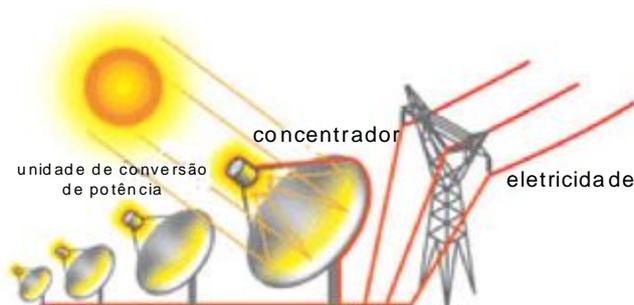
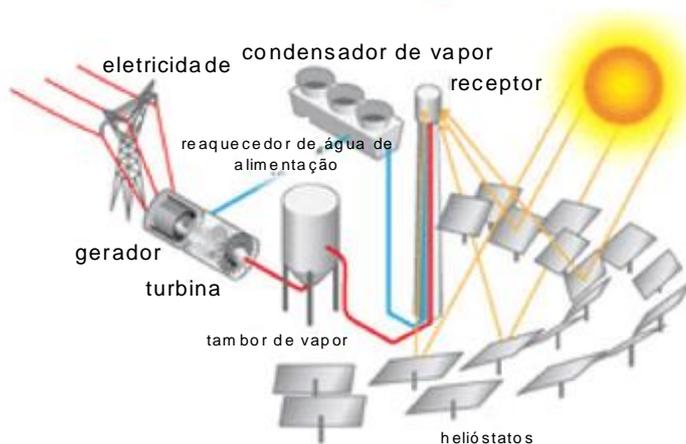
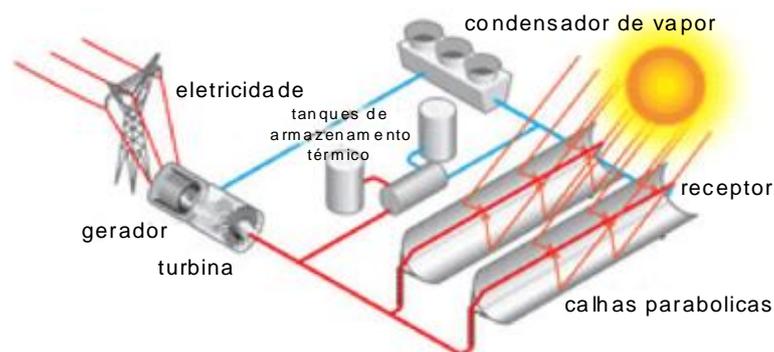


Figura 4.2 - Sistemas CSP: calha parabólica (topo), torre de energia (meio superior), prato parabólico (meio inferior) e linear Fresnel (base), adaptado de RAJAVI, 2023; “Compact Linear Fresnel Reflectors”, 2022.

A CSP tem o potencial de produzir grandes quantidades de energia renovável, aproveitando a abundância da luz solar. No entanto, a implementação de usinas de CSP geralmente requer grandes áreas de terra e condições climáticas favoráveis, com alta irradiação solar. Além disso, os custos iniciais de construção dessas usinas podem ser significativos. No entanto, essa tecnologia tem mostrado avanços significativos nos últimos anos, com redução de custos e aumento da eficiência, tornando-se uma opção cada vez mais viável para a geração de eletricidade limpa e sustentável.

A Tabela 4.1 mostra uma análise das tecnologias CSP. Como o PTC é uma das tecnologias mais desenvolvidas, seu potencial de melhoria é menor do que as outras. No entanto, LFR, SPT e PDC possuem grande potencial de melhoria, o que os torna muito atrativos para projetos de pesquisa, conforme GONZALO; MARUGÁN; MÁRQUEZ, 2019.

Tabela 4.1 - Análise das tecnologias CSP, GONZALO; MARUGÁN; MÁRQUEZ, 2019.

Tecnologia	Custo relativo	Ocupação do solo	Eficiência termodinâmica	Faixa operacional (°C)	Taxa de concentração solar	Potencial de melhoria
PTC	Baixo	Grande	Baixo	20 - 400	15 - 45	Limitado
SPT	Alto	Médio	Alto	300 - 565	150 - 1500	Muito significativa
PDS	Muito alto	Pequeno	Alto	120 - 1500	100 - 1000	Alto potencial
LFS	Muito baixo	Médio	Baixo	50 - 300	10 - 40	Significante

A geração de energia também pode ser feita por meio de usinas híbridas que combinam diferentes fontes de energia para produzir eletricidade. Essas combinações podem ser PVP - CSP que utilizam exclusivamente energia solar e cuja rentabilidade foi comprovada ou com uma usina térmica que aumenta a energia gerada a partir de um combustível e, portanto, a geração de eletricidade da usina, aumentando a temperatura no trocador de calor. Espera-se que os custos de instalação das tecnologias CSP e PVP diminuam no futuro, tornando a hibridização mais lucrativa e atraente para os investidores, GONZALO; MARUGÁN; MÁRQUEZ, 2019.

A estimativa da CSP geralmente envolve considerar vários fatores importantes, considerados a seguir:

- Determinar a área disponível: a área disponível para a instalação da usina CSP, pode ser uma área de terra desocupada ou uma instalação em um telhado ou terreno específico.
- Avaliar a radiação solar incidente: são necessários os dados históricos de radiação solar incidente na área onde a usina CSP será construída. Esses dados podem ser obtidos de estações meteorológicas locais, bancos de dados climáticos ou modelos de radiação solar.
- Selecionar a tecnologia CSP: como já comentado existem diferentes tecnologias CSP disponíveis, cada uma com suas próprias características e eficiências. Deve ser selecionada a tecnologia mais adequada com base nas condições locais e nos requisitos do projeto.
- Determinar a eficiência do coletor: a eficiência do coletor solar é uma medida da quantidade de energia solar que pode ser convertida em energia térmica. A eficiência varia com base na tecnologia e no design do coletor.
- Calcular a potência da usina: com base na área disponível, na radiação solar incidente e na eficiência do coletor, é possível calcular a potência estimada da usina CSP. Além desses fatores devem ser aplicados outros ajustes, como perdas de transmissão, perdas térmicas e perdas de conversão.
- Considerar fatores adicionais: outros fatores também devem ser considerados na estimativa da potência CSP, como a capacidade de armazenamento térmico, a demanda de energia, a disponibilidade de recursos financeiros e as restrições ambientais ou regulatórias.

Cabe ressaltar que a estimativa da potência CSP é um processo complexo e pode variar dependendo das condições locais e dos requisitos específicos do projeto.

4.3. Produção de Energia Solar Concentrada

Como comentado no item anterior a tecnologia CSP pode ser dividida em quatro tipos diferentes com base no tipo de coletor, ou seja, PTC, SPT, PDS e LFS.

Em dezembro de 2019, o PTC representava a maioria (76,63%) da capacidade instalada de CSP (HA *et al.*, 2023).

A primeira experiência prática com PTCs remonta a 1870, quando o engenheiro John Ericsson (1803 - 1889), imigrante sueco nos Estados Unidos, projetou e construiu um coletor de 3,25 m² de abertura que acionava um pequeno motor de 373 W. O vapor era produzido diretamente dentro do coletor solar. De 1872 a 1875, ele construiu sete sistemas semelhantes, mas com o ar como fluido de trabalho. Em 1883, Ericsson construiu um grande “motor solar” que foi exibido em Nova York. Consistia em um PTC de 3,35 m de comprimento e 4,88 m de largura, concentrando a radiação solar em um tubo de caldeira de 15,88 cm de diâmetro. O concentrador consistia em aduelas retas de madeira, sustentadas por nervuras de ferro curvas parabólicas presas às laterais da calha. As placas refletoras, feitas de vidro plano prateado na parte inferior, eram fixadas nessas aduelas. Todo o dispositivo rastreava o Sol manualmente. A velocidade média do motor durante os testes de verão foi de 120 rpm e a pressão absoluta de trabalho do pistão foi de 0,24 MPa. Em 1886, ele experimentou um motor solar de 1,86 kW. Ericsson se recusou a dar detalhes técnicos sobre as caldeiras por motivos de proteção e, infelizmente, morreu em 1889 antes de terminar uma versão comercial de seu “motor solar”, e seu projeto nunca foi continuado, conforme descrito em HA *et al.*, 2023.

A Figura 4.3 ilustra o motor solar de Ericson

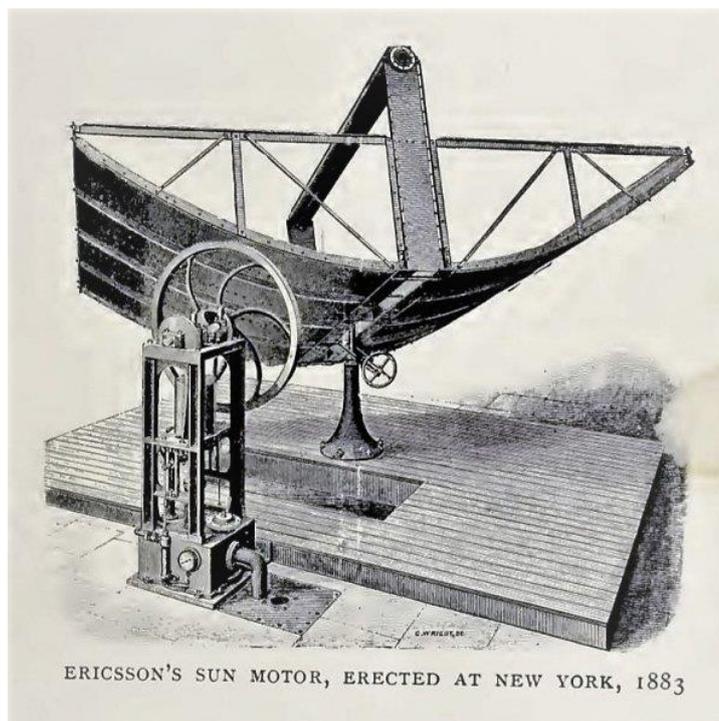


Figura 4.3 - Motor solar de Ericsson, “The Sun Motor”, 2023.

Considerando a ampla utilização da tecnologia PTC, e também a sua utilização no artigo de referência, a geração do CSP neste estudo refere-se a este sistema, e as equações e coeficientes apresentados são aplicáveis apenas ao sistema PTC, não as demais tecnologias.

Como já visto, os coletores de energia solar são tipos especiais de trocadores de calor que transformam a energia da radiação solar em energia interna do meio de transporte, sendo um dispositivo que absorve a radiação solar recebida, converte-a em calor e transfere esse calor para um fluido (geralmente ar, água ou óleo) que flui através do coletor.

Em coletores de concentração a energia solar é concentrada opticamente antes de ser transferida em forma de calor. A concentração pode ser obtida pela reflexão ou refração da radiação solar pelo uso de espelhos ou lentes. A luz refletida ou refratada é concentrada em uma zona focal, aumentando assim o fluxo de energia no receptor. Os coletores concentradores podem ser classificados em não geradores e geradores de imagem, dependendo se a imagem do Sol está focada no receptor ou não. O PTC é um coletor de concentração correspondente ao tipo gerador de imagem como mostrado na Figura 4.4, KALOGIROU, 2004.

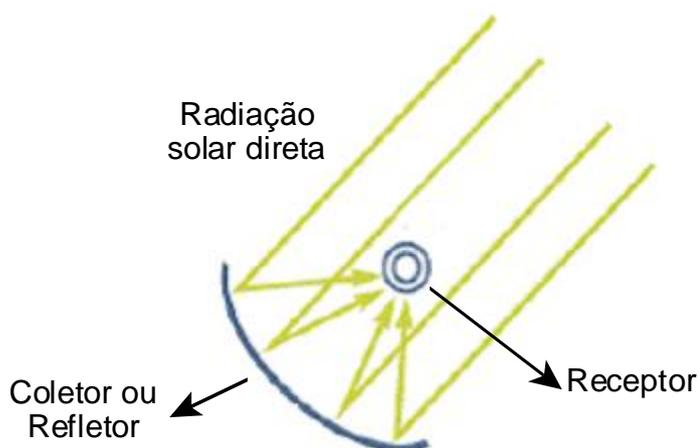


Figura 4.4 - Desenho esquemático da concentração da radiação solar em um PTC, adaptado de LODI, 2009.

A Figura 4.5 ilustra o esquema básico de um PTC.

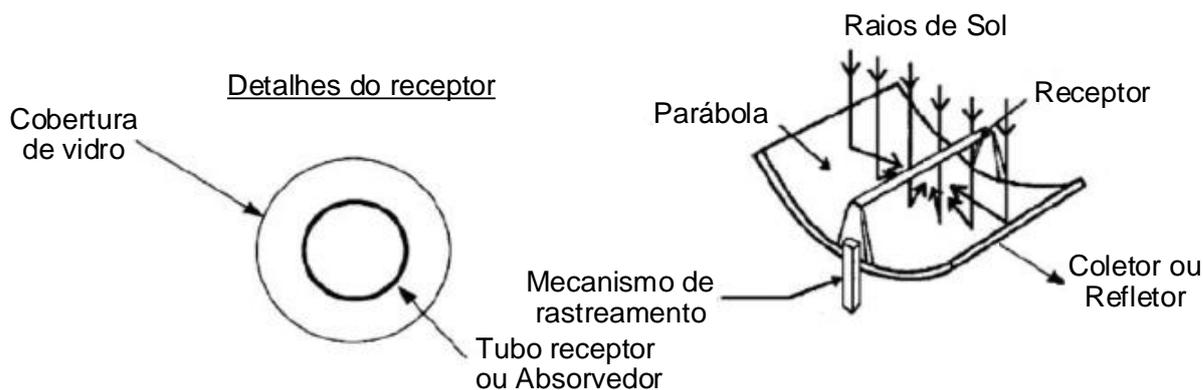


Figura 4.5 - Esquema de um coletor de calha parabólica, adaptado de KALOGIROU, 2004.

.Os PTCs são feitos dobrando uma folha de material refletivo em uma forma parabólica. Um tubo de metal preto, coberto com um tubo de vidro para reduzir as perdas de calor, é colocado ao longo da linha focal do receptor, como mostrado nas figuras 4.4 e 4.5. Quando a parábola é apontada para o Sol, os raios paralelos incidentes no refletor são refletidos no tubo receptor. É suficiente usar um único eixo de rastreamento do Sol e assim são produzidos módulos coletores de grande comprimento.

O receptor de calha parabólica é linear. O termo linear neste contexto se refere à forma alongada da superfície refletora, como visto na Figura 4.5. A calha parabólica tem uma configuração estendida ao longo de um eixo, em oposição à

forma circular ou esférica tradicional. Normalmente, um tubo é colocado ao longo da linha focal para formar um receptor de superfície externa, como também mostrado na Figura 4.5. O tamanho do tubo e, portanto, a taxa de concentração, é determinada pelo tamanho da imagem refletida do Sol e pelas tolerâncias de fabricação da calha. A superfície do receptor é normalmente revestida com um revestimento seletivo que possui alta absorvância para radiação solar, mas baixa emitância para perda de radiação térmica, KALOGIROU, 2004.

Um tubo de cobertura de vidro é geralmente colocado ao redor do tubo receptor para reduzir a perda de calor por convecção do receptor, reduzindo assim ainda mais o coeficiente de perda de calor. Uma desvantagem do tubo de cobertura de vidro é que a luz refletida do concentrador deve passar pelo vidro para chegar ao absorvedor, adicionando uma perda de transmitância de cerca de 0,9, quando o vidro está limpo, KALOGIROU, 2004.

O mecanismo de rastreamento deve ser capaz de seguir o Sol com certo grau de precisão, retornar o coletor à sua posição original no final do dia ou durante a noite e também rastrear durante períodos de nebulosidade intermitente. Adicionalmente, mecanismos de rastreamento são utilizados para a proteção dos coletores, ou seja, desfocam o coletor para protegê-lo de condições ambientais e de trabalho perigosas, como rajadas de vento, superaquecimento e falha do mecanismo de fluxo do fluido térmico, KALOGIROU, 2004.

O coletor pode ser orientado na direção leste - oeste, seguindo o Sol de norte a sul, ou orientado na direção norte - sul e seguindo o Sol de leste a oeste (KALOGIROU, 2004; LODI, 2009):

- Sentido leste - oeste: tem como vantagens o fato de mover-se pouco ao longo de todo o dia e de sempre ficar diretamente voltado para o Sol ao meio-dia. Em contrapartida, tem um desempenho reduzido no início do dia e no fim da tarde, devido aos maiores ângulos de incidência dos raios solares sobre a superfície coletora.
- Sentido norte - sul: tem os maiores ângulos de incidência durante o meio-dia e conseqüentemente as maiores perdas de calor nessa fase do dia, enquanto aponta mais diretamente para o Sol no início do dia e no fim da tarde.

Durante o período de um ano, o coletor direcionado no sentido norte - sul

absorve um pouco mais de energia que um orientado no sentido leste - oeste. Entretanto, o coletor norte - sul coleta mais calor no verão e menos no inverno que um leste - oeste, que possui uma produção de energia mais uniforme ao longo do ano (KALOGIROU, 2004; LODI, 2009).

A Figura 4.6 ilustra o coletor direcionado no sentido norte - sul.

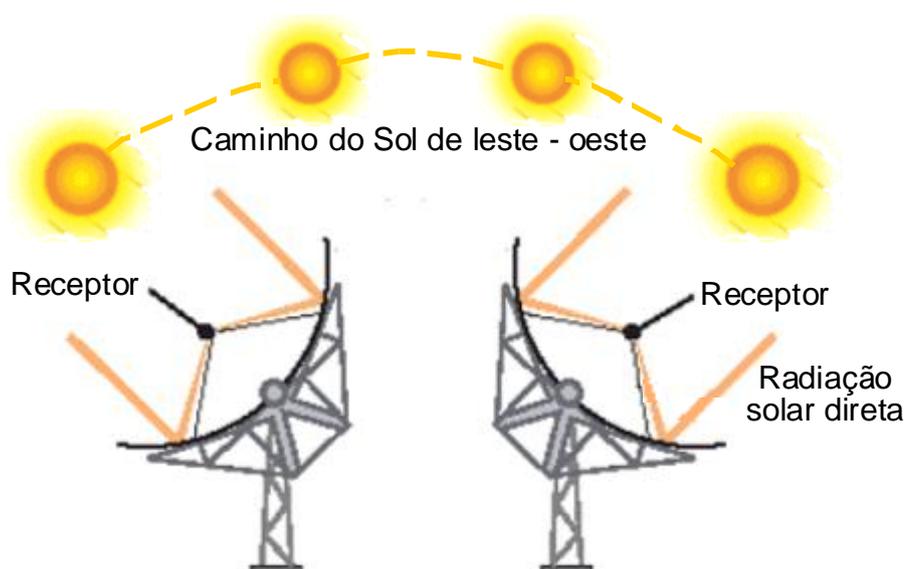


Figura 4.6 - Rastreamento do Sol no sentido leste - oeste, adaptado de LODI, 2009.

A escolha da orientação depende também da aplicação e de quando há mais necessidade de energia, ou seja, se a demanda sofre significativa variação em função da estação do ano, inverno ou verão, ou se varia mais durante as horas do dia (KALOGIROU, 2004; LODI, 2009).

A saída de potência concentrada solar, já definida como CSPOUT, será estimada usando a abordagem proposta nos artigos (SAWADOGO *et al.*, 2020) e (HA *et al.*, 2023), este último um artigo recente de 2023, que citam como referência o artigo *Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output*, CROOK *et al.*, 2011.

Este artigo corresponde a um estudo que analisa os possíveis impactos das mudanças climáticas na produção futura de energia por PVP e CSP.

No artigo são examinados como as mudanças nas variáveis climáticas, como radiação solar, temperatura e umidade, podem afetar a eficiência e a produtividade dos sistemas de energia solar. Ele também considera diferentes cenários de

emissões de gases de efeito estufa para estimar os efeitos das mudanças climáticas na produção de energia solar no futuro.

O estudo utiliza modelos e projeções climáticas para avaliar o impacto potencial nas regiões da Europa, América do Norte e Índia. Os resultados mostram que, dependendo do cenário climático, pode haver variações na produção de energia solar, tanto em termos de geração de eletricidade quanto de eficiência dos sistemas.

Nas referências citadas a obtenção do CSPOUT requer o conhecimento das seguintes grandezas:

- A irradiância direta, denominada R_d (SAWADOGO *et al.*, 2020; HA *et al.*, 2023) e G_{dir} (CROOK *et al.*, 2011), sendo usado no texto a seguir, R_d , se refere à quantidade de energia radiante solar que atinge uma superfície diretamente do Sol, sem sofrer dispersão ou reflexões significativas. Ela é uma medida da intensidade da radiação solar que chega a uma superfície específica em uma determinada direção. Sua unidade é dada em $\frac{\text{Potência}}{\text{Área}}$, normalmente W m^{-2} ou kW m^{-2} .
- A eficiência térmica do CSP, denominado η_{CSP} , que se refere à eficiência com que o CSP converte a energia térmica do Sol em energia elétrica. É uma grandeza adimensional.

A CSPOUT é estimada pelo produto das duas grandezas acima dado na equação 4.1 e sua unidade dependa da unidade de R_d .

$$\text{CSPOUT} = \eta_{\text{CSP}} \times R_d \quad 4.1$$

4.3.1 Obtenção da Irradiância Direta R_d

O valor de R_d não está disponível nos arquivos de saída dos modelos climáticos e por esta razão deve ser derivado de relações empíricas baseada em grandezas meteorológicas.

Numerosos modelos simples de irradiação solar foram produzidos por

diferentes pesquisadores ao longo dos últimos 80 anos. O objetivo desses modelos tem sido fornecer uma estimativa descomplicada da irradiação solar. Esses modelos dão conta da influência de cada constituinte atmosférico na radiação solar, o que por sua vez, leva a confusão e questões de validade por parte de usuários em potencial conforme BIRD; HULSTROM, 1980.

Alguns dos modelos disponíveis na literatura têm validade somente para dias de céu claro, sendo que para dias com nuvens devem ser efetuados ajustes para incluir os seus efeitos.

Como informação, a Tabela 4.2 relacionado 80 modelos diferentes para obtenção de irradiação solar, até a data de 2010, sendo alguns para condições de céu claro e outros para condição de céu nublado, para as mais variadas finalidades, sendo que alguns têm varias atualizações, onde é citado quem propôs a equação e a data da publicação do artigo referente ao modelo, obtidos de (BIRD; HULSTROM, 1980; SOBRINHO, 2011). Para análise do modelo deve-se consultar as referências acima.

Tabela 4.2 – Modelos para obtenção do valor da irradiância solar.

Autor(es)	Ano	Autor(es)	Ano	Autor(es)	Ano	Autor(es)	Ano
Ångström	1918	Bliss	1961	Clark & Allen	1978	Korsgaard <i>et al.</i>	1991
Kimball	1918	Efimova	1961	Machta	1978	Garratt	1992
Ångström & Prescott	1924 1940	Harshunova	1961	Marks & Dozier	1979	König-Langlo & Augstein	1994
Robitsch	1926	Monteith	1961	Satterlund	1979	Konzelmann <i>et al.</i>	1994
Dines & Dines	1927	Swinbank	1963	Bird	1980	Prata	1996
Asklef	1928	Martin & Palmer	1964	Idso	1981	Greuell <i>et al.</i>	1997
Boutario	1932	Sellers	1965	Ohmura	1981	Dilley & O'Ä'Brien	1998
Brunt	1932	Marshunova	1966	Bird & Hulstrom	1981	Crawford & Duchon	1999
Ramanathan & Desai	1932	Idso & Jackson	1969	Andreas & Ackley	1982	NiemelÄä <i>et al.</i>	2001
Eckel	1934	Deacon	1970	Berdhal & Fromberg	1982	Zapadka <i>et al.</i>	2001 2007
Raman	1935	Viswanadham & Ramanadham	1970	Centeno	1982	Klok & Oerlemans	2002
Watt	1940	Hoyt	1971	Sugita & Brutsaert	1983	Sridhar <i>et al.</i>	2002
Elsasser	1942	Zillman	1972	Berdhal & Martin	1984	Iziomon <i>et al.</i>	2003
Lutherstein & Chednovsky	1946	Majumdar	1972	Berger <i>et al.</i>	1984	Golaka & Excell	2004
Chumanova	1947	Maykut & Church	1973	Hargreaves & Samani	1985	Duarte <i>et al.</i>	2006
Berland & Berland	1952	Lacis e Hansen	1974	Perez	1988	Jin <i>et al.</i> e Silva <i>et al.</i>	2006
Anderson	1954	Atwater e Ball	1974	Keding	1989	Lhomme <i>et al.</i>	2007
De Coster & Shuepp	1957	SOLTRAN	1975	FAO	1990	REST	2008
Gross & Brooks	1957	Brutsaert	1975	Kondo <i>et al.</i>	1990	Kruk <i>et al.</i>	2009
Liu & Jordan	1960	ASRRAE	1977	Heitor <i>et al.</i>	1991	Bárbaro <i>et al.</i> .	2010

No presente trabalho R_d será obtido a partir da equação dada nas referências já citadas que é uma relação empírica entre a cobertura de nuvens fracionadas, denominada f_{cld} (SAWADOGO *et al.*, 2020), CLT (HA *et al.*, 2023) e C_f (CROOK *et al.*, 2011), sendo usado no texto a seguir, f_{cld} , e a irradiação solar do céu claro na superfície, denominada R_{sc} (SAWADOGO *et al.*, 2020), $RSDSCS$ (HA *et al.*, 2023) e G_{sc} (CROOK *et al.*, 2011), sendo usado no texto, R_{sc} , que corresponde ao modelo de transferência radiativa de Edwards - Slingo.

O modelo Edwards - Slingo, chamado também de código de radiação (*radiation code*) foi desenvolvido pelos pesquisadores ingleses John M. Edwards e Adrian Slingo, sendo um modelo utilizado para simular a interação da radiação solar com a atmosfera terrestre e descreve matematicamente os processos de absorção, emissão e dispersão da radiação solar pela atmosfera, levando em consideração a composição química, a concentração de gases, a distribuição vertical de temperatura e pressão, entre outros fatores.

O modelo consta no artigo *Studies with a flexible new radiation code. I: Choosing a configuration for a large-scale model*, EDWARDS; SLINGO, 1996, que aborda o desenvolvimento de um novo código flexível de radiação, focado na escolha de uma configuração adequada para um modelo de grande escala.

O objetivo principal foi aprimorar a representação dos processos radiativos na atmosfera terrestre em modelos climáticos e de previsão do tempo.

O estudo se concentrou na seleção de parâmetros e ajustes do modelo de radiação para garantir uma representação precisa da interação entre a radiação solar e a atmosfera em diferentes condições climáticas e geográficas. Isso incluiu a consideração de diversos fatores, como a absorção e espalhamento da radiação pelos gases atmosféricos, a influência das nuvens e dos aerossóis, a refletividade da superfície terrestre, entre outros.

A pesquisa ainda envolveu experimentos e análises utilizando o novo código de radiação, com o objetivo de otimizar a parametrização e configurar corretamente o modelo de grande escala. A partir desses estudos, foram feitas avaliações da eficiência e desempenho do código de radiação proposto, com o intuito de melhorar a precisão das simulações climáticas e previsões do tempo.

Isto posto, o valor de R_d é estimado pela equação 4.2.

$$R_d = 0,75 \times R_{sc} \times (1 - f_{clt}) \quad 4.2$$

onde o fator 0,75 representa as moléculas de ar e o efeito dos aerossóis na dispersão da irradiação, sendo necessário porque a dispersão da luz solar pelas moléculas de ar e aerossóis ocorre mesmo sob condições de céu claro.

Além disso, R_{sc} não está disponível na saída dos modelos climáticos e, portanto, de acordo com (SAWADOGO *et al.*, 2020) e (HA *et al.*, 2023) será utilizado

o método descrito no artigo *Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture, With Inclusion of a Layer of Vegetation* (DEARDORFF, 1978), do pesquisador meteorológico e educador americano James W. Deardorff (1928 - 2014) para vincular f_{c1} , R_{sc} e a irradiância total, R_s (SAWADOGO *et al.*, 2020) , R_{SDS} (HA *et al.*, 2023), sendo usado no texto R_s .

Neste artigo Deardorff aborda a previsão eficiente da temperatura e umidade da superfície do solo, levando em consideração a presença de uma camada de vegetação. O estudo explora a importância da vegetação na modelagem da temperatura e umidade do solo e propõe um método eficiente para prever essas variáveis considerando a influência da vegetação, que pode afetar a transferência de calor e a disponibilidade de água no solo.

No artigo é apresentada a equação (6), página 1891, mostrada a seguir na equação 4.3.

$$RL \downarrow = \left[\sigma_c + (1 - \sigma_c) 0,67(1670q_a)^{0,08} \right] \sigma T_a^4 \quad 4.3$$

onde $RL \downarrow$ é o fluxo radiativo de onda longa direcionado para baixo e o fator entre colchetes é a parametrização para a emissividade efetiva do ar proposta no artigo *Effective atmospheric emissivity under clear skies*, STALEY; JURICA, 1972, para céu claro ($\sigma_c = 0$) e σ_c é a fração de nuvens. Este artigo dos pesquisadores americanos Dean O. Staley e Gerald Michael Jurica analisa a determinação da emissividade atmosférica efetiva em condições de céu claro e apresenta uma análise teórica e experimental para determinar a emissividade atmosférica efetiva em diferentes situações atmosféricas. Também na equação q_a se refere à umidade relativa do ar no nível de referência, σ a constante de Stefan - Boltzman e T_a a temperatura absoluta no nível de referência. O autor denomina este nível de referência, como "*anemometer level height*", ou seja, a altura em relação ao solo em que o anemômetro está posicionado, altura na qual a velocidade do vento está sendo medida.

Para a condição de céu claro, $\sigma_c = 0$, pode-se obter o valor de R_{sc} utilizando a equação (3) do artigo, mostrada a seguir na equação 4.4.

$$R_{sc} = RL \downarrow = \left[0 + (1 - 0) 0,67(1670q_a)^{0,08} \right] \sigma T_a^4 = 0,67(1670q_a)^{0,08} \sigma T_a^4 \quad 4.4$$

Para a condição de uma cobertura de nuvens qualquer, ou seja, $\sigma_c = \text{fclt}$, pode-se obter o valor de R_s utilizando também a equação (3) do artigo, mostrada a seguir na equação 4.5.

$$R_s = R_L \downarrow = \left[\text{fclt} + (1 - \text{fclt})0,67(1670q_a)^{0,08} \right] \sigma T_a^4 \quad 4.5$$

Dividindo a equação 4.5 pela equação 4.4 resulta a equação 4.6.

$$\begin{aligned} \frac{R_s}{R_{sc}} &= \frac{\left[\text{fclt} + (1 - \text{fclt})0,67(1670q_a)^{0,08} \right] \sigma T_a^4}{0,67(1670q_a)^{0,08} \sigma T_a^4} = \\ &= \frac{\text{fclt} + (1 - \text{fclt})0,67(1670q_a)^{0,08}}{0,67(1670q_a)^{0,08}} = \\ &= \left[\frac{\text{fclt}}{0,67(1670q_a)^{0,08}} \approx 0 \right] + (1 - \text{fclt}) = \\ &= 1 - \text{fclt} \end{aligned} \quad 4.6$$

Substituindo a equação 4.6 na equação 4.2 resulta a equação 4.7.

$$R_d = 0,75 \times R_{sc} \times (1 - \text{fclt}) = 0,75 \times R_{sc} \times \left(\frac{R_s}{R_{sc}} \right) = 0,75 \times R_s \quad 4.7$$

4.3.2 Obtenção da Eficiência Térmica η_{CSP}

A eficiência térmica do coletor é definida como a razão entre a energia útil fornecida e a energia incidente (fluxo solar) na abertura do mesmo. O fluxo solar incidente consiste em radiação direta e difusa.

A equação para obtenção da eficiência térmica do coletor no sistema PTC, η_{CSP} , é apresentado nos artigos (SAWADOGO *et al.*, 2020), (HA *et al.*, 2023) e (CROOK *et al.*, 2011) que são derivadas do artigo *Solar thermal collectors and applications*, KALOGIROU, 2004, do professor e engenheiro mecânico cipriota Soteris A. Kalogirou.

O artigo apresenta um levantamento dos vários tipos de coletores solares térmicos e suas aplicações. É feita uma introdução histórica aos usos da energia solar seguida por uma descrição dos vários tipos de coletores, incluindo placa plana,

parabólica composta, tubo evacuado, calha parabólica, refletor de Fresnel, prato parabólico e coletor de campo (helióstato). Segue-se uma análise ótica, térmica e termodinâmica dos coletores e uma descrição dos métodos utilizados para avaliar o seu desempenho. Aplicações típicas dos vários tipos de coletores são apresentadas no artigo, podendo-se citar, aquecimento solar de água, que compreende termossifão, armazenamento integrado de coletores, sistemas diretos e indiretos e sistemas de ar, aquecimento e resfriamento de ambientes, que compreendem aquecimento de ambientes e água quente de serviço, sistemas de ar e água e bombas de calor, refrigeração, calor de processo industrial, que compreendem sistemas de ar e água e sistemas de geração de vapor, dessalinização, sistemas de energia térmica, que compreendem a calha parabólica, torre de energia e sistemas de prato, fornos solares e aplicações químicas. O artigo apresenta cerca de 2.655 citações até 08/2023, o que mostra a importância deste artigo (KALOGIROU, 2023).

Nas análises e expressões a seguir, a menos de grandezas já definidas, será mantida a nomenclatura usada na referência (KALOGIROU, 2004). Cabe observar que, em algumas citações no artigo, o autor ao se referir a uma grandeza de característica potência, se refere à mesma como energia. No contexto do artigo está troca não tem influência nenhuma nas expressões e resultados obtidos.

A chamada razão de concentração em um sistema solar concentrado é uma medida da quantidade pela qual a luz solar é aglomerado pelo sistema em relação à intensidade da luz solar incidente e é calculada dividindo a intensidade da luz solar no ponto focal pelo valor da intensidade da luz solar incidente no sistema. Por exemplo, se a intensidade da luz solar incidente é de 1.000 W m^{-2} e a intensidade no ponto focal é de 5.000 W m^{-2} , a relação de concentração resulta em 5, o que indica que a energia solar foi concentrada em cinco vezes a intensidade original.

Os coletores de concentração só podem utilizar radiação direta se a razão de concentração for maior que 10, sendo que o PTC tem esta razão entre 15 e 45 (KALOGIROU, 2004; LODI, 2009).

O valor de η_{CSP} é dado pela equação 4.8

$$\eta_{\text{CSP}} = \frac{q_u}{A_a R_d} \quad 4.8$$

onde:

- q_u é a potência útil entregue pelo coletor $W m^{-2}$
- A_a é a área total de abertura do coletor (m^2)

Em condições de regime permanente, o calor útil fornecido por um coletor solar é igual à energia absorvida pelo fluido de transferência de calor menos as perdas diretas ou indiretas de calor da superfície para o ambiente.

Tem-se que q_u pode ser dada pela equação 4.9, que agrega as duas condições acima e corresponde ao balanço de energia (potência) no receptor.

$$q_u = Rd\eta_0 A_a - A_r U_L (T_r - T_{AS}) \quad 4.9$$

onde:

- η_0 é a eficiência ótica do coletor (adimensional)
- A_r é a área do absorvedor (m^2), vide Figura 4.5
- U_L é o coeficiente de perda de transferência de calor do coletor solar $W m^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- T_r é a temperatura do absorvedor ($^\circ\text{C}$)

A potência q_u , corresponde também à quantidade de calor sensível transferido para o fluido do absorvedor por unidade de tempo e pode ser obtida ainda pela equação 4.10, dada pela equação fundamental da calorimetria.

$$q_u = m c_p (T_o - T_i) \quad 4.10$$

onde:

- m é o fluxo de massa de fluido no absorvedor $kg s^{-1}$
- c_p é o calor específico a pressão constante $J kg^{-1} K^{-1}$
- T_i é a temperatura do fluido entrando no absorvedor ($^\circ\text{C}$)
- T_o é a temperatura do fluido saindo do absorvedor ($^\circ\text{C}$)

De acordo com KALOGIROU, 2004, a equação 4.9 pode ser modificada substituindo a temperatura do absorvedor, T_r , pela temperatura do fluido que entra no coletor, T_i , se um fator de correção adequado for incluído, que corresponde a equação 4.11.

$$q_u = F_R [Rd\eta_0 A_a - A_r U_L (T_i - T_{AS})] \quad 4.11$$

onde F_R é o fator de correção ou fator de remoção de calor do coletor, que pode ser considerado como a razão entre o calor realmente fornecido e o fornecido se o coletor estivesse em uma temperatura uniforme igual à do fluido que entra no receptor.

Na equação 4.11) a temperatura T_i do fluido de entrada depende das características do sistema de aquecimento solar completo e da demanda do fluido e independe de TAS e Rd (CROOK *et al.*, 2011).

O coeficiente U_L não é constante, mas é uma função do coletor e da temperatura ambiente, sendo dado pela equação 4.12 de acordo com KALOGIROU, 2004.

$$F_R U_L = c_1 + c_2 (T_i - TAS) \quad 4.12$$

onde c_1 o coeficiente de primeira ordem da eficiência do coletor $W m^{-2} ^\circ C^{-1}$ e c_2 é o coeficiente de segunda ordem da eficiência do coletor $W m^{-2} ^\circ C^{-2}$.

Substituindo a equação 4.12) na equação 4.11) resulta a equação 4.13).

$$q_u = F_R Rd \eta_0 A_a - A_r c_1 (T_i - TAS) - A_r c_2 (T_i - TAS)^2 \quad 4.13$$

Substituindo a equação 4.13 na equação 4.8 resulta η_{CSP} dada pela equação 4.14

$$\begin{aligned} \eta_{CSP} &= \frac{F_R Rd \eta_0 A_a - A_r c_1 (T_i - TAS) - A_r c_2 (T_i - TAS)^2}{A_a Rd} = \\ &= F_R \eta_0 - \frac{c_1 (T_i - TAS)}{\left(\frac{A_a}{A_r}\right) Rd} - \frac{c_2 (T_i - TAS)^2}{\left(\frac{A_a}{A_r}\right) Rd} = \\ &= F_R \eta_0 - \frac{c_1 (T_i - TAS)}{CRd} - \frac{c_2 (T_i - TAS)^2}{CRd} = \\ &= k_0 - k_1 \frac{T_i - TAS}{Rd} - k_2 \frac{(T_i - TAS)^2}{Rd} \end{aligned} \quad 4.14$$

onde:

- C é o fator de concentração solar dado por $\left(\frac{A_a}{A_r}\right)$
- k_0 é a eficiência da intercepção = $F_R \eta_0$

– k_1 é também chamado de coeficiente de primeira ordem da eficiência do coletor

$$W \text{ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} = \left(\frac{c_1}{C} \right)$$

– k_2 é também chamado de coeficiente de segunda ordem da eficiência do coletor

$$W \text{ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} = \left(\frac{c_2}{C} \right)$$

Normalmente, os termos de segunda ordem são negligenciados, caso em que $c_2 = 0$ e $k_2 = 0$, resultando na equação 4.15.

$$\eta_{\text{CSP}} = k_0 - k_1 \frac{T_i - \text{TAS}}{R_d} \quad 4.15$$

Portanto, a equação 4.15 representa uma linha reta em um gráfico de η_{CSP} em função do parâmetro de perda de calor $\left(\frac{T_i - \text{TAS}}{R_d} \right)$.

A interceptação (interseção da reta com o eixo vertical de η_{CSP}) é igual a $F_R \eta_0$.

A inclinação da reta, ou seja, a diferença de η_{CSP} dividida pela diferença de escala horizontal correspondente é igual a $\left(-\frac{F_R U_L}{C} \right)$.

A interseção da reta com o eixo vertical é onde a temperatura do fluido que entra no coletor é igual à temperatura ambiente e η_{CSP} é máxima.

Na interseção da reta com o eixo horizontal, η_{CSP} é zero. Essa condição corresponde a um nível de radiação tão baixo, ou a uma temperatura tão alta do fluido no coletor, que as perdas de calor são iguais à absorção solar e o coletor não fornece calor útil. Essa condição, normalmente chamada de estagnação, geralmente ocorre quando nenhum fluido flui no coletor, KALOGIROU, 2004.

Observe que η_{CSP} aumenta quando a temperatura ambiente ou a irradiância direta aumenta.

Assumindo que a temperatura do fluido deixando o absorvedor é mantida constante pelo controle da vazão do fluido, a eficiência de toda a planta será aproximadamente proporcional a η_{CSP} , CROOK *et al.*, 2011.

Uma comparação da eficiência de vários coletores em níveis de irradiação de 500 e 1.000 $W \text{ m}^{-2}$ é mostrada na Figura 4.7, onde cinco tipos de coletores são

considerados: coletor plano (FPC), coletor avançado de placa plana (AFP), coletor estacionário orientado com seu longo eixo na direção leste - oeste (CPC), coletor de tubos a vácuo (ETC) e coletor de calha parabólica com rastreamento leste - oeste (PTC).

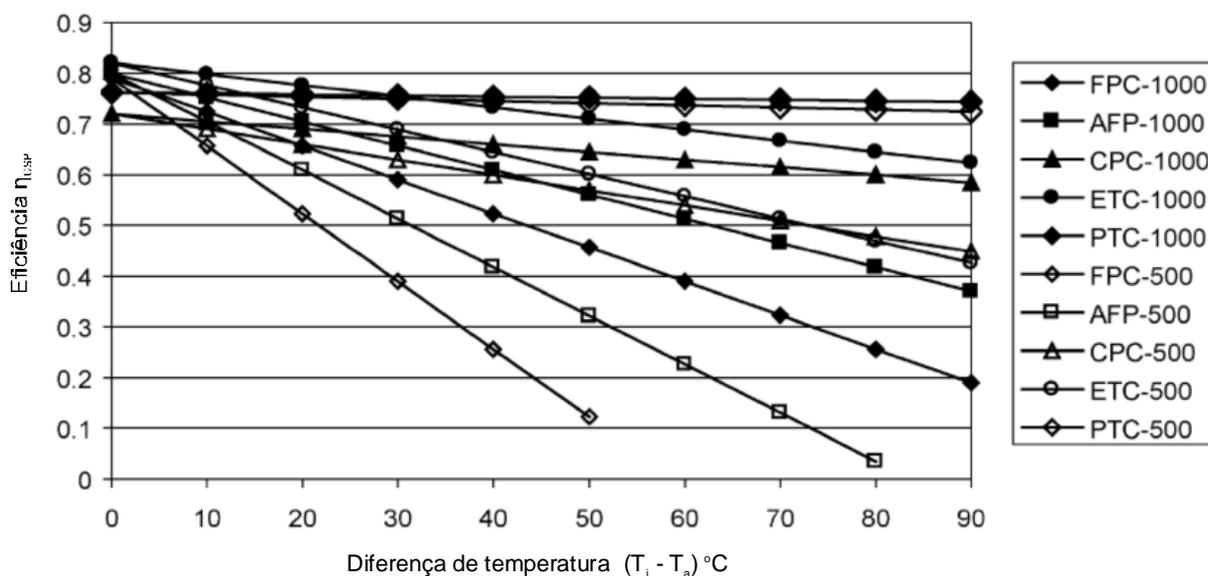


Figura 4.7 - Comparação da eficiência de vários coletores em dois níveis de irradiância, adaptado de KALOGIROU, 2004.

Conforme pode-se observar na Figura 4.7 quanto maior o nível de irradiação, melhor a eficiência e PTC mantêm a mais alta eficiência mesmo no rastreamento leste - oeste

Após um período de pesquisa e desenvolvimento comercial do PTC na década de 1980 várias empresas entraram no ramo produzindo este tipo de coletor, para faixa de temperatura entre 50 e 300°C, com rastreamento de um eixo.

Um exemplo foi o coletor solar produzido pela *Industrial Solar Technology (IST) Corporation*, conhecido como coletor IST A IST e a *Sandia National Laboratories* compartilharam os custos de uma série de desenvolvimentos de componentes, testes e modelos analíticos para caracterizar o desempenho do coletor solar de calha parabólica IST em toda a faixa de temperaturas operacionais e ângulos de incidência.

O IST é uma corporação americana que construiu várias instalações de aquecimento de processo nos Estados Unidos com até 2.700 m² de área de abertura do coletor.

Os *Sandia National Laboratories*, fundados em 1949, são um conjunto de instalações de pesquisa e desenvolvimento científico e tecnológico localizados nos Estados Unidos. Eles são administrados pelo *National Technology and Engineering Solutions of Sandia* (NTESS), uma subsidiária da *Honeywell International*.

A Tabela 4.3 apresenta dados de um modelo de concentrador parabólico construído pela IST. O coletor parabólico IST foi testado e avaliado no *Sandia National Laboratory* e no *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*, DLR) para eficiência e durabilidade (KALOGIROU, 2004; LODI, 2009). O DLR é a agência espacial nacional da Alemanha e uma importante instituição de pesquisa e desenvolvimento em ciência aeroespacial e tecnologia relacionada, sendo fundada em 1969, tendo sede em Colônia, Alemanha.

Tabela 4.3 - Características do sistema IST PTC, KALOGIROU, 2004; LODI, 2009.

Parâmetro	Valor/tipo
Ângulo de abertura do coletor	70°
Superfície refletiva	Acrílica prateada
Material do receptor	Aço
Abertura do coletor	2,3 m
Tratamento da superfície do receptor	Níquel escurecido altamente seletivo
Absorbância	0,97
Emitância (80°C)	0,18
Transmitância do vidro de revestimento	0,96
Diâmetro externo do absorvedor	50,8 mm
Precisão do mecanismo de rastreamento	0,05°
Orientação do coletor	Eixo norte - sul
Modo de rastreamento	Horizontal leste - oeste

A Tabela 4.4 mostra, para o coletor IST acima, os coeficientes apresentados em KALOGIROU, 2004 e referenciados em (SAWADOGO *et al.*, 2020), (HA *et al.*, 2023) e (CROOK *et al.*, 2011) e que serão utilizados neste trabalho. O valor de T_i

não consta em KALOGIROU, 2004, mas é encontrado nas demais referências.

Tabela 4.4 - Coeficientes do sistema IST PTC, KALOGIROU, 2004.

Coeficiente	Valor
$k_0 \left(\frac{W}{m^2} \right)$	0,762
$k_1 \left(\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \right)$	0,2125
$k_2 \left(\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}^2} \right)$	0,001672
$T_i \text{ (} ^\circ\text{C)}$	115

4.3.3 Equação para o cálculo de CSPOUT

Utilizando as equações 4.1, 4.7 e 4.15 e a Tabela 4.4 pode-se obter a equação para cálculo da CSPOUT que está apresentada na equação 4.16.

$$\begin{aligned}
 \text{CSPOUT} &= \eta_{\text{CSP}} \times \text{Rd} = \\
 &= \left[k_0 - k_1 \frac{T_i - \text{TAS}}{\text{Rd}} \right] \times \text{Rd} = \\
 &= k_0 \times \text{Rd} - k_1 (T_i - \text{TAS}) = \\
 &= k_0 \times 0,75 \times \text{Rs} - k_1 (T_i - \text{TAS}) = \\
 &= 0,762 \times 0,75 \times \text{Rs} - 0,2125 (115 - \text{TAS}) = \\
 &= 0,572 \times \text{Rs} - 0,2125 (115 - \text{TAS})
 \end{aligned}
 \tag{4.16}$$

Os valores de Rs e TAS serão obtidos dos modelos do CMIP6.

4.4. Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica

Um sistema de geração fotovoltaica, já definido como PVP, consiste de um sistema composto pelo arranjo de vários componentes para absorver e converter luz solar em eletricidade.

Como já comentado, a conversão da energia solar em energia elétrica é

baseada no efeito fotovoltaico, descoberto pelo físico francês Becquerel em 1839.

O efeito fotovoltaico é o processo pelo qual certos materiais semicondutores, como o silício, são capazes de gerar uma diferença de potencial elétrico quando expostos à luz solar. Esses materiais possuem elétrons que, quando atingidos por fótons da luz solar, ganham energia suficiente para se moverem de suas posições normais em um átomo para níveis de energia mais elevados. Isso cria um desequilíbrio de carga elétrica, onde há uma maior concentração de elétrons em uma região do material em comparação com outra.

Uma célula fotovoltaica é um dispositivo eletrônico que converte diretamente a energia da luz solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico e são compostas principalmente de materiais semicondutores, e funcionam de acordo com os princípios da física quântica e do efeito fotoelétrico.

O funcionamento básico de uma célula fotovoltaica, também chamada célula solar, é baseado no princípio de que, quando a luz solar incide sobre o material semicondutor, fótons da luz transferem sua energia aos elétrons presentes no material. Essa transferência de energia permite que os elétrons se movam de suas posições normais em um átomo para níveis de energia mais elevados, criando assim uma diferença de potencial elétrico entre as camadas do material semicondutor.

Uma célula fotovoltaica é composta por várias camadas de materiais semicondutores dopados (ou seja, modificados com a adição de impurezas) para criar regiões com excesso ou falta de elétrons. As duas camadas principais são chamadas de camada "P" (positiva) e camada "N" (negativa). A camada "N" tem excesso de elétrons, enquanto a camada "P" tem falta de elétrons (lacunas).

Quando a luz solar incide sobre a célula fotovoltaica, fótons com energia suficiente para superar a barreira de potencial são absorvidos pela camada "P" do material, liberando elétrons para a camada "N". Esse fluxo de elétrons cria uma corrente elétrica, e é esse fluxo contínuo de elétrons que é coletado e canalizado através dos contatos elétricos na célula fotovoltaica, gerando assim eletricidade.

A Figura 4.8 mostra a estrutura de uma célula fotovoltaica

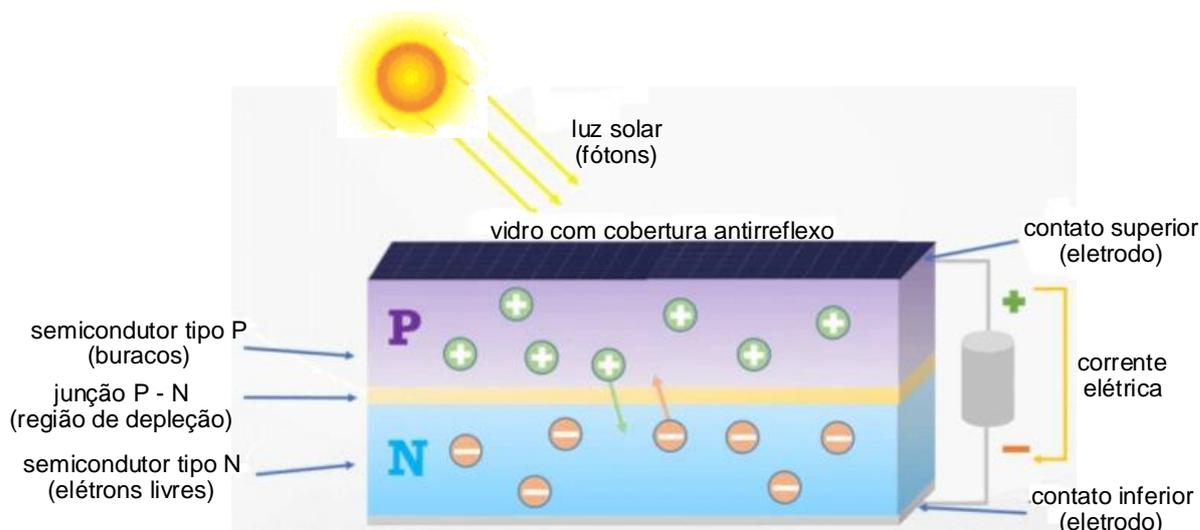


Figura 4.8 - Estrutura de uma célula fotovoltaica, adaptado de OSMANBASIC, 2023.

A capacidade energética de célula fotovoltaica é relativamente pequena, mas pode ser conectada a outras para se obter quantidades maiores de energia. Portanto, as células fotovoltaicas são agrupadas, todas orientadas em um plano, formando os módulos solares. Os módulos fotovoltaicos geralmente têm uma folha de vidro no lado voltado para o Sol, permitindo a passagem da luz enquanto protege as pastilhas semicondutoras. As células solares são geralmente conectadas em série, criando tensão aditiva, sendo que conectar células em paralelo produz uma corrente mais alta. A junção de vários módulos constitui o painel solar e o conjunto de todos os painéis solares, conectados em paralelo, resulta no arranjo solar, que é a base de geração para o sistema PVP.

A Figura 4.9 mostra a configuração dos sistemas PVP.

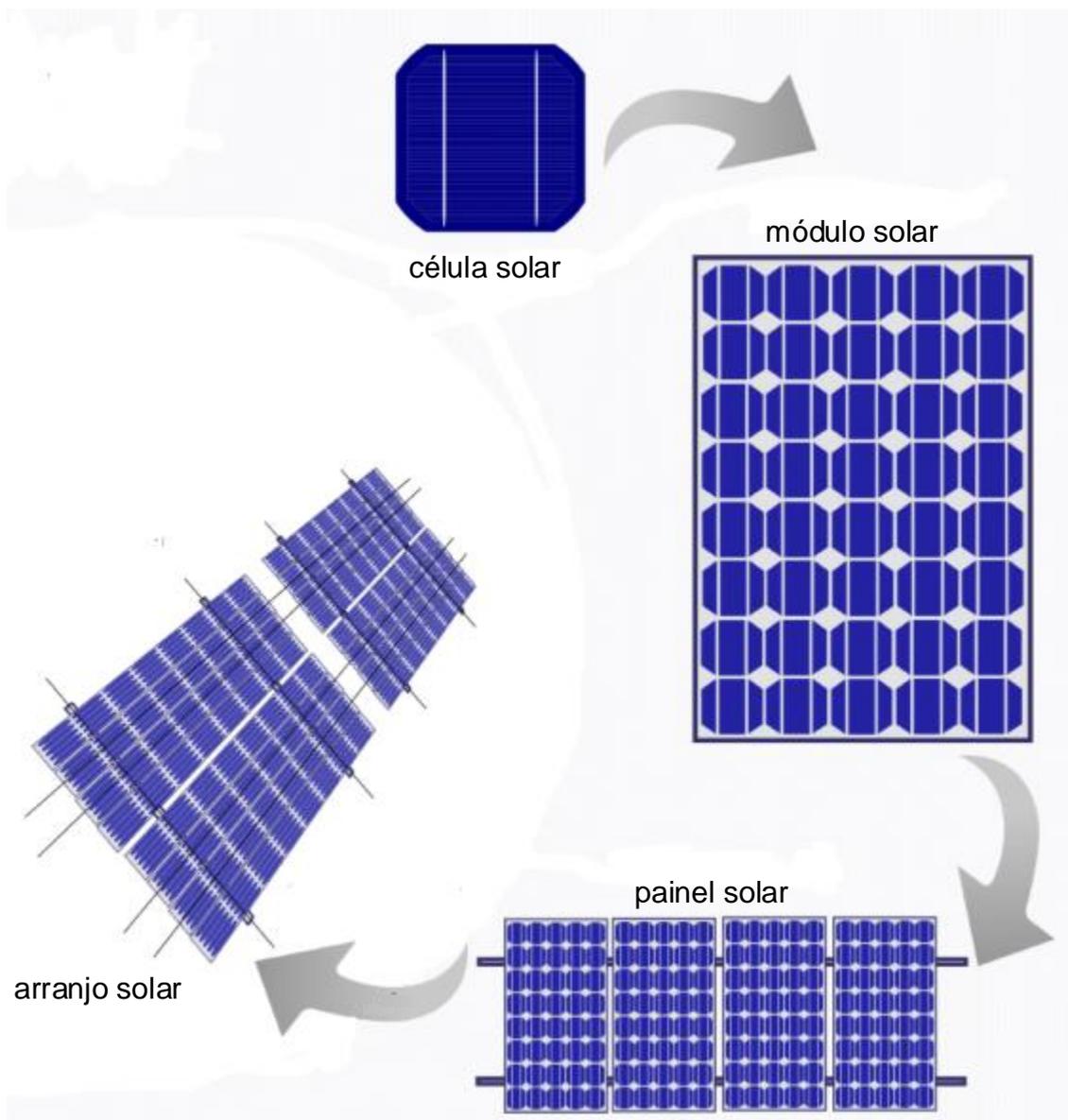


Figura 4.9 - Diagrama dos possíveis componentes de um sistema fotovoltaico, adaptado de Solar cell 2023.

Os PVP fotovoltaicos podem variar muito em tamanho, desde pequenos, instalados em telhados e os sistemas portáteis até grandes usinas de geração em grande escala.

As células fotoelétricas geram eletricidade de forma contínua, mas essa eletricidade é produzida em corrente contínua (CC). A eletricidade gerada em corrente contínua não é diretamente utilizada nas residências e na maioria das indústrias, que operam em corrente alternada (CA), embora muitos dispositivos usem eletricidade na forma contínua.

Por esta razão nos sistemas PVP, a conversão CC/CA desempenha um papel

essencial ao permitir que a eletricidade gerada a partir da luz solar seja compatível com a infraestrutura elétrica convencional, tornando-a mais acessível e útil para residências, indústrias e outras aplicações.

O componente fundamental para realizar a conversão CC/CA é o inversor. Existem vários tipos de inversores, todos com a função de converter a saída CC variável de um painel solar fotovoltaico em uma CA de frequência de serviço público. O inversor também é responsável por sincronizar a eletricidade gerada pelos painéis solares com a frequência e a fase da rede elétrica. Isso é importante para garantir que a energia solar possa ser integrada de forma eficiente à rede elétrica, permitindo que a eletricidade gerada seja usada em qualquer momento, independentemente da quantidade de luz solar disponível.

Os inversores também são equipados com sistemas avançados de controle, monitoramento, comunicação e proteção, além de filtros, baterias, dissipadores de calor, entre outros.

A Figura 4.10 mostra simplificada um sistema PVP.

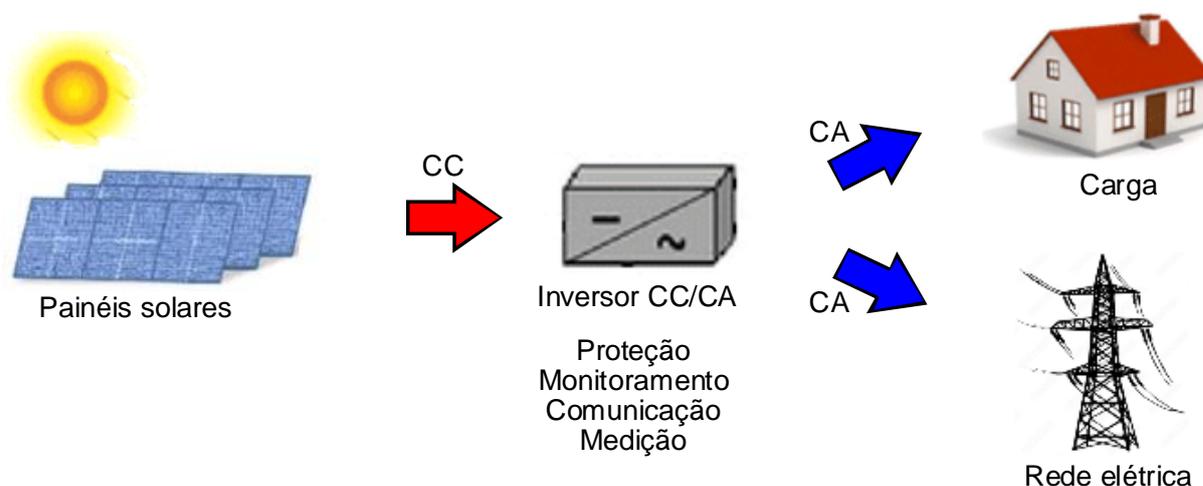


Figura 4.10 - Diagrama simplificado de um sistema PVP.

4.5. Estimativa do Potencial de Energia Fotovoltaica

A geração de energia fotovoltaica é definida como a quantidade de energia recebida da luz solar na superfície da Terra e convertida em eletricidade por meio de células fotovoltaicas, módulos, painéis e arranjos.

O artigo de referência (SAWADOGO *et al.*, 2020) cita dois métodos para estimar o PVP:

- O método *power rating*, que traduzido para o português significa classificação de potência, que faz a integração da geração instantânea de potência fotovoltaica ao longo do tempo.
- O método *energy rating*, que traduzido para o português significa classificação de energia, que estima o PVP multiplicando a irradiância solar total durante um período de tempo específico por uma taxa de desempenho.

No artigo de referência (SAWADOGO *et al.*, 2020) para obtenção do PVP é usado o segundo método, ou seja, o método *energy rating*, citando ainda os artigos, *The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe* (JEREZ *et al.*, 2015), *Impact of global warming on photovoltaic power generation over West Africa*, de SAWADOGO; ABIODUN; OKOGBUE, 2020, *Potential impact of climate change on solar resource in Africa for photovoltaic energy: analyses from CORDEXAFRICA climate experiments* de BICHET *et al.*, 2019, que utilizam o mesmo método.

Todos os artigos indicados acima se referem ao artigo *Modeling the photovoltaic potential of a site* de MAVROMATAKIS *et al.*, 2010.

Este artigo tem como objetivo apresentar um modelo para estimar o potencial fotovoltaico de um determinado local e utiliza dados de irradiação solar e parâmetros técnicos de painéis solares para calcular o potencial de geração de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos no local escolhido.

A energia produzida por um sistema fotovoltaico é modelada por meio de sua potência nominal, da irradiância de entrada e dos principais mecanismos de perda de energia. Esses mecanismos envolvem a temperatura das células, a resposta de uma célula à luz de baixa intensidade, o espectro e a polarização da luz, o desvio do rastreamento do ponto de potência máxima, incompatibilidade do módulo e perdas ôhmicas.

No artigo os autores apresentam parte dos resultados dos cálculos teóricos e sua comparação com medições experimentais reais de Nicósia, Chipre e Heraklion, Creta, Grécia.

O modelo apresentado para estimar a potência produzida por um PVP é baseado na potência nominal do arranjo em estudo, no coeficiente de temperatura dos módulos, na irradiância solar no plano do arranjo, na temperatura do ar e na velocidade do vento. Esses dados permitem o cálculo analítico dos fatores que causam a redução da potência das *Standard Test Conditions*, STC, ou seja, das Condições Padrão de Teste.

A PVP é estimada pela equação 4.17, usando a nomenclatura dada no artigo.

$$P_m = P_p \times \eta_t \times \frac{G}{G_{STC}} \quad 4.17$$

onde:

- P_m corresponde a PVP do arranjo em análise
- P_p é a potência nominal do arranjo fotovoltaico, dada pelo fabricante nas condições STC
- η_t é um coeficiente que incorpora os fatores distribuídos que representam o desvio das condições reais de operação do arranjo fotovoltaico daquelas das condições padrão
- G é a irradiância solar no plano do arranjo fotovoltaico
- G_{STC} é a irradiância solar de 1.000 W m^{-2}

Observe que o fator $\eta_t \times \frac{G}{G_{STC}}$ é uma magnitude adimensional, visto que P_m e

P_p tem característica de potência.

A Figura 4.11 mostra uma representação gráfica entre os valores modelados e experimentais da potência produzida por um módulo existente na Universidade de Nicósia, Chipre. Na mesma figura é mostrado o rendimento energético para os dados de Heraklion, Creta, Grécia. O rendimento energético, Y , é dado pela divisão da energia elétrica total produzida pelo arranjo fotovoltaico em um período de tempo designado (dia, mês ou ano) pela potência nominal do módulo ou arranjo, dado em unidades de tempo, sendo um dos parâmetros mais importantes que caracterizam um sistema fotovoltaico e de grande interesse para o usuário final, seja um proprietário residencial ou um investidor. Observa-se uma concordância dos valores sendo que a maioria dos dados está localizada muito perto da linha 1:1 (45°) com

uma dispersão de 5%, o que mostra a adequação da equação 4.17, conforme MAVROMATAKIS *et al.*, 2010.

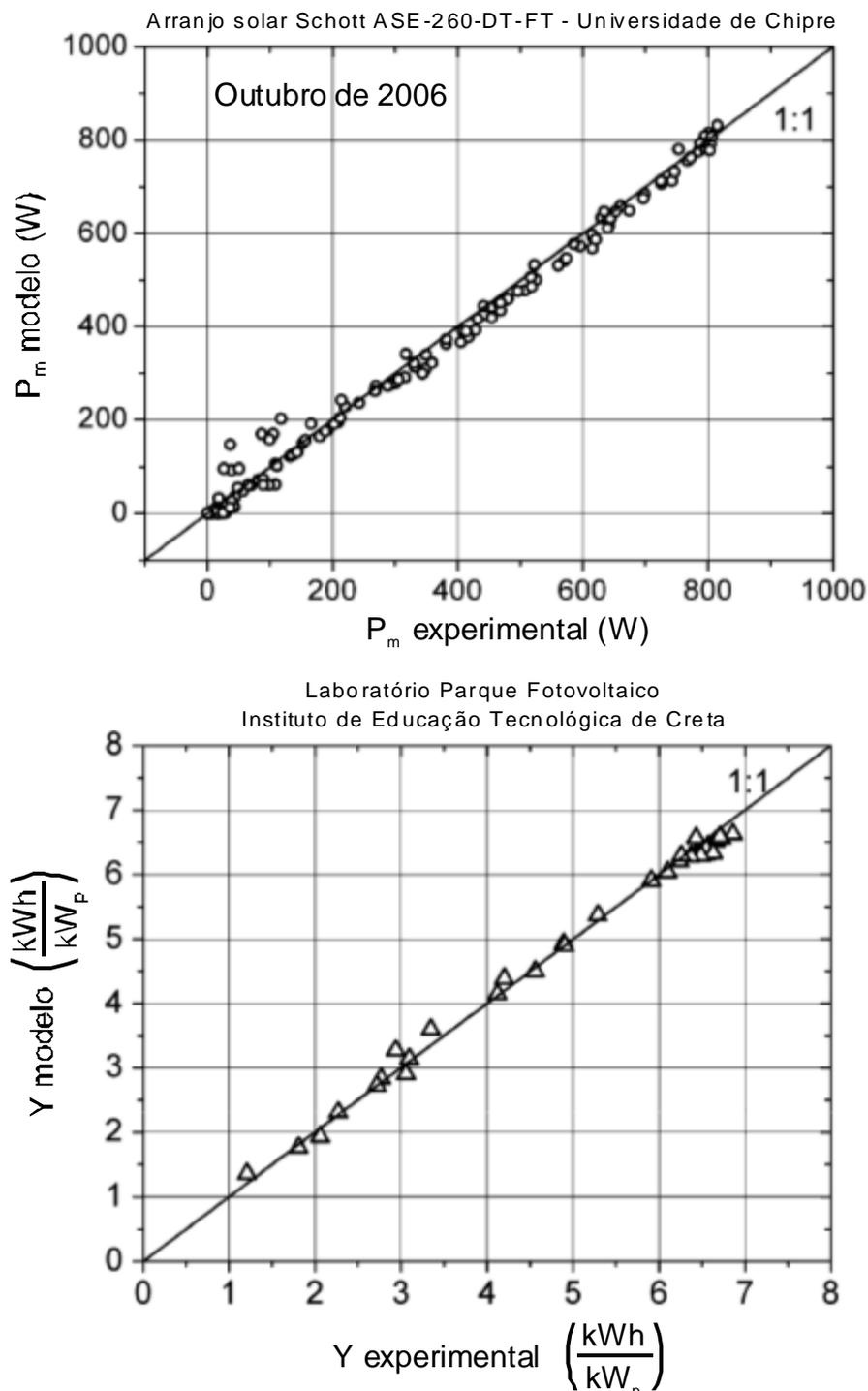


Figura 4.11 - Potência elétrica máxima calculada versus a medida para um painel fotovoltaico situado em Nicósia, Chipre (superior) e rendimento de energia calculado versus medido para um módulo fotovoltaico situado em Heraklion, Creta, Grécia (inferior), adaptado de MAVROMATAKIS *et al.*, 2010.

Nos artigos citados e neste trabalho não se tem interesse pelo valor de P_m , pela própria definição do mesmo, visto que corresponde a uma potência referida a

um determinado arranjo.

O interesse se reside no fator $\eta_t \times \frac{G}{G_{STC}}$, chamado de potencial de geração de energia fotovoltaica, representado por PVP(t) em (SAWADOGO *et al.*, 2020) e (SAWADOGO; ABIODUN; OKOGBUE, 2020) e $PV_{pot}(t)$ em (JEREZ *et al.*, 2015) e (BICHET *et al.*, 2019).

De acordo com a nomenclatura das grandezas já adotadas neste trabalho, o PVP(t) passa a ser dado pela equação 4.18 onde todas as variáveis já foram definidas.

$$PVP(t) = P_r(t) \times \frac{R_s}{R_{STC}} \quad 4.18$$

O fator PVP(t) representa o desempenho das células fotovoltaicas em relação à sua capacidade de potência nominal de acordo com as condições ambientais reais, sendo portanto um fator adimensional.

Como já comentado, PVP(t) multiplicado pela potência nominal instalada da capacidade de geração fotovoltaica, P_p , fornece a produção instantânea de potência fotovoltaica.

4.5.1 Obtenção do Fator de Desempenho $P_r(t)$

O fator $P_r(t)$ é um coeficiente que inclui todos os fatores que levam à energia real produzida por um painel, módulo ou arranjo em relação à energia que seria produzido se estivesse operando em condições STC.

Este coeficiente deve incorporar os fatores distribuídos que representam o desvio das condições reais de operação do arranjo fotovoltaico daquelas das condições padrão. Esses fatores são a diferença da temperatura do módulo operacional (célula) em relação ao padrão STC, o envelhecimento do material fotovoltaico, a limpeza da superfície do módulo fotovoltaico, o desvio da irradiância solar de um caminho ideal para produzir um fotoelétron na célula (desvio do caminho óptico), o desvio do ponto de potência máxima, as perdas ôhmicas dos condutores, entre outros, MAVROMATAKIS *et al.*, 2010.

No modelo proposto em MAVROMATAKIS *et al.*, 2010, nem todos os fatores citados acima são incorporados e os autores citam que o próprio modelo pode ser melhorado se forem usadas fórmulas específicas para o arranjo em análise, o que pretendem fazer em trabalhos futuros.

Também as referências (SAWADOGO *et al.*, 2020), (JEREZ *et al.*, 2015) e (BICHET *et al.*, 2019) utilizadas no presente trabalho, não incorporam todos os fatores já citados.

O sistema térmico fotovoltaico (PVP) foi introduzido pela primeira vez por Kern e Russell (1978) para gerar energia elétrica e também térmica. Posteriormente vários autores como Florchuetz (1979), Hendrie (1980), Zondag e outros (2003), etc. desenvolveram o sistema térmico fotovoltaico para aumentar sua eficiência elétrica e térmica, conforme TIWARI *et al.*, 2018.

A primeira referência encontrada que cita o fator $Pr(t)$, evidentemente com outro nomenclatura, e o artigo *Extension of the Hottel—Whillier Model to the analysis of combined photovoltaic/theram flat plate collectors*, FLORSCHUETZ, 1979, de autoria do professor e engenheiro mecânico L. W. Florschuetz.

No artigo, o conhecido modelo de Hottel-Whillier para análise térmica de coletores de placas planas é estendido para a análise de coletores fotovoltaico-térmicos combinados de maneira que, com uma simples modificação dos parâmetros convencionais do modelo original, todas as relações existentes e informações de suporte disponíveis na literatura ainda se aplicam. Além das suposições básicas do modelo original, foi necessário apenas assumir que a eficiência de conversão elétrica local do arranjo de células solares (absorvedor) é uma função linear decrescente da temperatura do absorvedor local ao longo de sua faixa de temperatura operacional. Com base no modelo estendido, foram apresentados e discutidos exemplos de desempenho térmico e elétrico de um coletor combinado em função dos parâmetros de projeto do coletor.

O modelo ou equação de Hottel-Whillier é um conceito usado na transferência de calor por radiação solar, que remonta à década de 1940. Foi desenvolvida por Hoyt Clarke Hottel (1903 - 1998) e Austin Whillier (1927 -) professores do Departamento de Engenharia Química do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). A equação é usada na engenharia para estimar a taxa de transferência de

calor em um sistema coletor de energia solar. Ela foi uma das primeiras tentativas de modelar a transferência de calor a partir da radiação solar incidente em um coletor solar. O prêmio *Hoyt Clarke Hottel Award* é concedido anualmente pelo Comitê de Prêmios da *American Solar Energy Society*. O principal requisito é que o destinatário tenha feito uma contribuição significativa para a tecnologia em qualquer área do campo de energia.

Este método não será apresentado neste trabalho, pois além de ser muito extensa sua descrição não apresenta interesse direto no tema a ser analisado. Em: DUFFIE; BECKMAN, 2013 as suposições básicas e desenvolvimentos do modelo convencional de Hottel-Chillier são completamente revistos.

A referência FLORSCHUETZ, 1979 assume que a eficiência da célula diminui linearmente com a temperatura do absorvedor, dado na equação 4.19.

$$\eta = \eta_r [1 + \beta_r (T_{AS} - T_r)] \quad 4.19$$

onde:

- η é a eficiência da matriz de células avaliada na temperatura ambiente
- η_r é a eficiência da matriz de células avaliada nas condições STC
- β_r é a eficiência da célula avaliada na temperatura de referência, T_r , sendo a diminuição fracional da eficiência da célula por unidade de aumento de temperatura ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
- T_r é a temperatura de referência ($^{\circ}\text{C}$)

De acordo com o autor a eficiência de energia de pico de uma única célula diminuir aproximadamente linearmente com a temperatura da célula, pelo menos acima de 0°C , está bem estabelecido em várias publicações que compararam a saída de um arranjo de células conectadas em paralelo com rastreamento de potência de pico, com o gradiente de temperatura ao longo do conjunto, com a saída que ocorreria se cada célula no conjunto fosse rastreada individualmente com sua energia de pico. Os resultados indicam que para variações de temperatura não maiores do que aquelas que ocorrem nos coletores de placa plana, a diferença na saída não seria significativa. Portanto, para arranjos de células operados no modo de pico de potência, o uso da equação 4.19 está bem justificado.

Também EVANS; FLORSCHUETZ, 1977 indicam a mesma equação 4.19 para obtenção da eficiência.

A referência EVANS, 1981, publicada posteriormente acrescenta mais um termo a equação 4.19) o que corresponde a equação 4.20.

$$\eta = \eta_r \left[1 + \beta (T_{c,i} - T_r) + \log_{10} I_i \right] \quad 4.20$$

onde: incidente de energia solar por hora na matriz

- I_i é a energia solar incidente no módulo
- i corresponde a um subscrito indicando por hora
- γ é o coeficiente de intensidade para eficiência da célula

De acordo com o autor, na maioria das vezes, a equação 4.20 é usada com $\gamma = 0$ o que recai na equação 4.19.

As referências (SAWADOGO *et al.*, 2020), (JEREZ *et al.*, 2015), (BICHET *et al.*, 2019) e (MAVROMATAKIS *et al.*, 2010) indicam a equação 4.19 para cálculo de $P_r(t)$ sem considerar o termo η_r . Não há explicação do porque desta adoção, mas acredita-se que $P_r(t)$ signifique $\frac{\eta}{\eta_r}$ ou foi adotado $\eta_r = 1$, visto que corresponde a eficiência das células avaliada nas condições STC.

Complementando, η_r não tem interesse direto nas análises que se propõe nas referências indicadas e ao propósito deste trabalho, apesar disto ele será comentado no item 4.5.2

Com isso tem-se a equação 4.21 com a nomenclatura adotada para obtenção de $P_r(t)$.

$$P_r(t) = 1 + \gamma (T_{cell} - T_{STC}) \quad 4.21$$

onde:

- T_{cell} é a temperatura da célula
- T_{STC} é a temperatura do ar ambiente nas condições STC e é igual a 25 °C
- γ é um coeficiente que depende do tipo de célula solar.

Cabe observar que existem outras metodologias mais completas para estimar

o $Pr(t)$ que foge aos propósitos deste trabalho.

Na equação 4.21 o único fator que representa o desvio das condições reais de operação do arranjo fotovoltaico daquelas das condições padrão utilização na equação foi à temperatura da célula.

A temperatura da célula fotovoltaica tem um impacto significativo na geração de energia fotovoltaica. Isso ocorre porque a eficiência e a produção de energia de uma célula solar são diretamente afetadas pela sua temperatura de operação. Existem duas principais razões pelas quais a temperatura é um fator importante na geração fotovoltaica:

- Eficiência do semicondutor: as células fotovoltaicas, geralmente feitas de materiais semicondutores como silício, são mais eficientes na conversão de luz solar em eletricidade em temperaturas mais baixas. Quando a célula esquenta, a eficiência de conversão diminui. Isso ocorre porque o calor aumenta a energia térmica dos elétrons na célula, tornando-os mais propensos a perderem parte dessa energia como calor em vez de contribuir para a geração de eletricidade. Como resultado, a eficiência global da célula solar é reduzida em temperaturas mais altas.
- Coeficiente de temperatura: o coeficiente de temperatura é um parâmetro que mede a sensibilidade da tensão e da corrente gerada pela célula solar em relação à temperatura. Geralmente, o coeficiente de temperatura é negativo, o que significa que, à medida que a temperatura aumenta, a tensão e a corrente geradas pela célula diminuem. Isso é especialmente importante em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, pois a tensão da célula solar precisa ser ajustada para combinar com a tensão da rede elétrica. Com a queda da tensão em altas temperaturas, pode ser necessário ajustar o sistema para evitar perdas de energia e garantir a eficiência ideal da geração fotovoltaica.

Com tudo isso, T_{cell} depende basicamente da irradiância solar incidente no plano do arranjo que é influenciada pela temperatura do ar, pela velocidade do vento ao redor do módulo e que ajuda a resfriá-lo e pela umidade relativa do local.

Artigos já relacionados utilizam dois outros artigos que propõe modelos para obtenção de T_{cell} que são:

- As referências (SAWADOGO *et al.*, 2020), (CHENNI *et al.*, 2007), utilizam o artigo

Photovoltaic module thermal/wind performance: long-term monitoring and model development for energy rating, TAMIZHMANI *et al.*, 2003. O artigo apresenta um modelo matemático para prever a temperatura do módulo fotovoltaico com base nos dados reais monitorados em campo de temperatura do módulo, temperatura ambiente, velocidade do vento, direção do vento e umidade relativa. O método de Redes Neurais foi utilizado para analisar os dados coletados. As redes neurais são compostas por elementos simples operando em paralelo, sendo treinada para executar uma determinada função ajustando os valores das conexões (pesos) entre os elementos, com base na comparação da saída e do valor desejado, até que a saída da rede corresponda a este valor, com um erro admissível. No artigo, o valor desejado foi a temperatura medida do módulo, as entradas foram parâmetros ambientais monitorados, a rede neural um modelo/equação matemática e os pesos ajustados são os coeficientes correspondentes dos parâmetros ambientais. O MATLAB e sua *Neural Networks Toolbox* foram usados para realizar a análise de dados

O primeiro modelo desenvolvido para prever T_{cell} foi baseado em cinco entradas: temperatura ambiente, T_a , umidade relativa, UR, velocidade do vento, wind_{spd} , direção do vento, wind_{dir} , e irradiância global, R_g , sendo dado na equação 4.22).

$$T_{\text{cell}} = w_1 T_a + w_2 R_g + w_3 \text{wind}_{\text{spd}} + w_4 \text{wind}_{\text{dir}} + w_5 \text{UR} + \text{constante} \quad 4.22$$

onde w_1 , w_2 °C m² W⁻¹, w_3 °C s m⁻¹, w_4 °C graus⁻¹, w_5 °C UR%⁻¹ e constante (°C) são coeficientes ajustados na análise neural.

Foram feitas 22 análises envolvendo módulos solares de 5 tecnologias diferentes, cujos parâmetros obtidos foram apresentados em uma tabela juntamente como o valor médio dos coeficientes para cada tecnologia.

A Tabela 4.5 apresenta somente os valores médios dos coeficientes.

Tabela 4.5 - Coeficientes médios para os seis parâmetros de entrada, TAMIZHMANI *et al.*, 2003.

Tecnologia	w_1	w_2 $\left(\frac{^{\circ}\text{Cm}^2}{\text{W}}\right)$	w_3 $\left(\frac{^{\circ}\text{C}\text{s}}{\text{m}}\right)$	w_4 $\left(\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{graus}}\right)$	w_5 $\left(\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{UR\%}}\right)$	Constante ($^{\circ}\text{C}$)
Silício amorfo	0,964	0,026	-1,406	-0,002	0,082	2,500
Silício monocristalino	0,961	0,029	-1,457	0,000	0,109	1,570
Disseleneto de cobre e índio	0,969	0,029	-1,466	-0,001	0,069	2,900
Cristalização Direta Epitaxial	0,960	0,026	-1,453	-0,005	0,079	3,400
Silício policristalino	0,954	0,030	-1,629	-0,005	0,088	3,900
Telureto de cádmio	0,975	0,031	-1,631	-0,005	0,073	4,100
Médio Geral	0,964	0,028	-1,488	-0,003	0,083	2,961

O segundo modelo desenvolvido para prever T_{cell} foi baseado em apenas três entradas: temperatura ambiente, T_a , velocidade do vento, wind_{spd} , dir , e irradiância global, R_g , sendo dado na equação 4.23).

$$T_{\text{cell}} = w_1 T_a + w_2 R_g + w_3 \text{wind}_{\text{spd}} + \text{constante} \quad 4.23$$

onde w_1 , adimensional, w_2 , $^{\circ}\text{C m}^2 \text{W}^{-1}$, w_3 , $^{\circ}\text{C s m}^{-1}$ e constante, $^{\circ}\text{C}$, são coeficientes ajustados na análise neural.

Foram feitas também 22 análises envolvendo os mesmos módulos solares das 5 tecnologias, cujos parâmetros obtidos foram apresentados em uma tabela juntamente como o valor médio dos coeficientes para cada tecnologia.

A Tabela 4.6 apresenta somente os valores médios dos coeficientes.

Tabela 4.6 - Coeficientes médios para os quatro parâmetros de entrada, TAMIZHMANI *et al.*, 2003.

Tecnologia	w_1	w_2 $\left(\frac{^{\circ}\text{Cm}^2}{\text{W}}\right)$	w_3 $\left(\frac{^{\circ}\text{C}_s}{\text{m}}\right)$	Constante ($^{\circ}\text{C}$)
Silício amorfo	0,943	0,026	-1,450	4,100
Silício monocristalino	0,942	0,028	-1,509	3,900
Disseleneto de cobre e índio	0,960	0,029	-1,507	4,000
Cristalização Direta Epitaxial (EFG)	0,935	0,026	-1,468	4,300
Silício policristalino	0,926	0,030	-1,666	5,100
Telureto de cádmio	0,953	0,031	-1,667	4,800
Médio Geral	0,943	0,028	-1,528	4,328

A partir da análise de regressão linear de alguns módulos, os autores observaram que, em geral, os valores dos coeficientes de determinação, r^2 , das retas são 1 (ou próximo de 1) e passam pela origem (próxima da origem) em um ângulo de 45° , independentemente de qualquer conjunto de coeficientes usados.

Os autores também observaram que o modelo de 3 parâmetros resultaram superior ao modelo de 5 parâmetros, pois os erros na precisão da medição dos dois últimos parâmetros podem ter influência mais forte, nos valores dos coeficientes, do que os próprios dois parâmetros.

Também uma análise dos valores dos coeficientes mostrados no artigo e nas tabelas 4.5 e 4.6 observa-se que T_{cell} é ditado principalmente pela temperatura ambiente e irradiância, independentemente da localização ou tipo de tecnologia. A temperatura ambiente define a temperatura de base do módulo e a irradiância define predominantemente o aumento de temperatura do módulo, que é cerca de $0,028 \text{ }^{\circ}\text{C m}^2 \text{ W}^{-1}$. A velocidade do vento e a umidade ambiente influenciam levemente T_{cell} enquanto a influência da direção do vento é insignificante.

Com base nas análises feitas tem-se que T_{cell} pode ser estimado pela equação 4.24 utilizando os coeficientes médios de todas as análises feitas.

$$T_{\text{cell}} = 0,943 \times T_a + 0,028 \times R_s - 1,528 \times \text{wind}_{\text{spd}} + 4,3 \quad 4.24$$

– A referência MARTIN; RUIZ, 2001 cita o artigo *Field experience with a new*

performance characterization procedure for photovoltaic arrays, de KING; KRATOCHVIL; BOYSON, 1997. O artigo comenta que métodos de teste que separam com sucesso as influências interativas e dependentes da hora do dia da irradiância solar, temperatura operacional, espectro solar e ângulo de incidência solar já foram desenvolvidos. Esses métodos de teste resultaram em um novo modelo que é razoavelmente simples, mas prevê o desempenho com precisão para todas as condições de operação. O artigo descreve este novo modelo, testes externos necessários para implementá-lo, resultados de testes de campo para cinco arranjos de diferentes tecnologias e a evolução do modelo em uma ferramenta numérica para projetar e dimensionar arranjos fotovoltaicas com base na produção anual de energia. Os autores colocam que as variáveis que definem a condição de operação de um módulo solar são irradiância, temperatura da célula, massa de ar absoluta e ângulo de incidência solar no arranjo. No artigo são apresentadas as equações para calcular a corrente de curto-circuito, corrente de potência máxima, tensão de circuito aberto e tensão de potência máxima. A partir destes parâmetros principais outros parâmetros, como fator de preenchimento, potência máxima, eficiência, etc, podem ser calculados. Uma premissa fundamental desse modelo de desempenho é que corrente de potência máxima, tensão de circuito aberto e tensão de potência máxima de uma célula, módulo ou arranjo são parâmetros previsíveis quando descritos apenas como funções da corrente de curto-circuito e da temperatura da célula (T_{cell}). Os procedimentos de teste e modelagem do arranjo foram validados por meio de testes de campo de 17 arranjos diferentes de nove tecnologias diferentes

De acordo com o artigo, o ambiente térmico que determina a temperatura operacional do módulo é complexo, sendo também influenciado pela direção do vento e pelo design, orientação e estrutura de montagem do módulo.

No entanto, um modelo simples foi encontrado para fornecer estimativas razoavelmente precisas ($\pm 5^{\circ}\text{C}$) da temperatura da superfície traseira do módulo para módulos de placa plana típicos, próximos ao equilíbrio térmico, montados em uma estrutura de rack aberta.

A equação 4.25 fornece a relação citada.

$$T_m = \frac{E}{E_0} (T_1 e^{bWS} + T_2) + TAS \quad 4.25$$

onde

- ✓ T_m é a temperatura da superfície traseira do módulo (°C)
- ✓ E é a irradiância solar no módulo $W m^{-2}$
- ✓ E_0 é a irradiância de referência, $1.000 W m^{-2}$
- ✓ WS é a velocidade do vento medida na altura padrão de 10 m, $m s^{-1}$
- ✓ T_1 é um coeficiente empírico que determina o limite superior de temperatura em baixas velocidades de vento (°C)
- ✓ T_2 é um coeficiente empírico que determina o limite inferior de temperatura em altas velocidades de vento (°C)
- ✓ b é um coeficiente empírico que determina a taxa que a temperatura do módulo diminui à medida que a velocidade do vento aumenta $s m^{-1}$

O desempenho do módulo deve, na verdade, estar relacionado à temperatura da célula dentro do módulo, que normalmente é mais quente que a superfície traseira.

A diferença de temperatura entre a célula e a superfície posterior (ΔT) depende do nível de irradiação solar e do tipo e espessura dos materiais utilizados para o substrato do módulo.

A equação 4.26 fornece uma relação simples entre a temperatura da superfície traseira do módulo e T_{cell} .

$$T_{cell} = T_m + \frac{E}{E_0} \Delta T \quad 4.26$$

Finalmente tem-se a equação 4.27 para obtenção de T_{cell} .

$$T_{cell} = T_a + \frac{E}{E_0} (T_1 e^{bWS} + T_2 + \Delta T) \quad 4.27$$

A Tabela 4.7 fornece os parâmetros encontrados para a equação 4.27 obtidos a partir das temperaturas medidas para dois tipos diferentes de módulos.

Tabela 4.7 - Coeficientes empíricos para estimativa de temperatura de módulo e célula, para dois projetos de módulo típicos, KING; KRATOCHVIL; BOYSON, 1997.

Tipo	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	b $\left(\frac{s}{m}\right)$	ΔT (°C)
Vidro / célula / vidro	25,0	8,2	-0,112	2
Vidro / célula / tedlar (fluoreto de polivinila)	19,6	11,6	-0,223	3

A concordância entre as estimativas teóricas da temperatura da célula e os dados experimentais resultou adequado e estão apresentados na Figura 4.12, mesmo em dias onde a irradiância solar variou fortemente (de acordo com os autores). Nota-se que a equação 4.27 assume condições de equilíbrio térmico, que são difíceis de persistir quando a energia incidente varia fortemente no tempo. A primeira metade do dia 3/10/2006 pode ser considerada um dia de céu claro e a concordância foi melhor ainda.

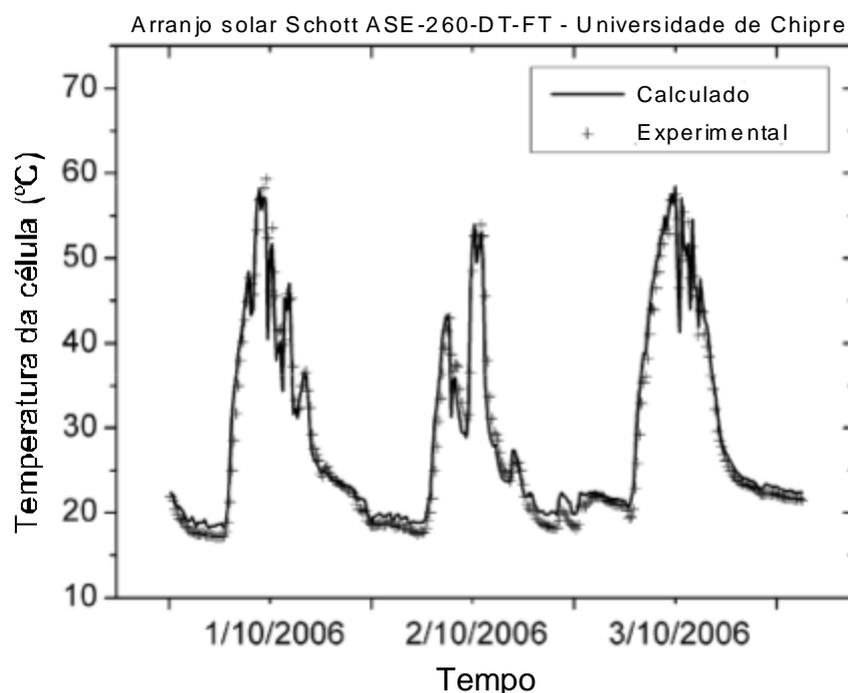


Figura 4.12 - Variação temporal da temperatura fotovoltaica para o arranjo ASE 260 situado em Nicósia, Chipre, adaptado de MAVROMATAKIS *et al.*, 2010.

Substituindo os valores dos coeficientes empíricos indicado pela referência MARTIN; RUIZ, 2001, que corresponde ao tipo vidro/célula/tedlar, resulta a equação 4.28 utilizada para cálculo de T_{cell}.

$$T_{\text{cell}} = T_{\text{AS}} + \frac{R_s(t)}{R_{\text{STC}}} (19,6 \times e^{-0,223 \times w_s} + 14,6) \quad 4.28$$

- Complementado as análises de T_{cell} , a referência (YANG et al., 2019) cita nove outros modelos para cálculo desta temperatura, podendo-se citar: Rauschenbach (1980), Risser and Fuentes (1984), Ross e Smokler (1986), Schott (1985), Servant (1986), Lasnier and Ang (1990), Skoplaki, Boudouvis e Palyvos (2008), Duffie e Beckman (2013), que não serão analisados neste trabalho.

O coeficiente γ é o coeficiente de temperatura da eficiência da célula, sendo uma medida que descreve como a eficiência de uma célula solar varia com a temperatura.

Esse coeficiente é expresso em termos percentuais por °C, K, ou percentuais destas unidades, sendo essencial para entender como a eficiência da célula solar é afetada por mudanças na temperatura ambiente.

Normalmente, o coeficiente de temperatura da eficiência de uma célula solar é negativo, o que significa que, à medida que a temperatura aumenta, a eficiência da célula solar diminui e vice-versa.

Os valores específicos do coeficiente de temperatura de eficiência variam de acordo com o tipo de tecnologia da célula solar.

A Tabela 4.9 apresenta alguns valores aproximados de γ para diferentes tipos de células solares.

Tabela 4.8 - Valores de γ obtidos na literatura.

Especificação	γ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Referência
Célula de silício monocristalino	0,005	(SAWADOGO <i>et al.</i> , 2020), (JEREZ <i>et al.</i> , 2015), (BICHET <i>et al.</i> , 2019)
Célula de silício	0,0041	(TAMIZHMANI <i>et al.</i> , 2003)
Célula de silício (em torno de 270 $^{\circ}\text{C}$)	0,0041	: (EVANS; FLORSCHUETZ, 1977)
NOCT (Nominal Operation Cell Temperature) - SOLMET	0,005	(EVANS, 1981)
Módulo refrigerado a água ou ar	0,0063	(TONUI; TRIPANAGNOSTOPOULOS, 2007)
Módulo EFG – Universidade do Chipre	0,0047	(MAVROMATAKIS <i>et al.</i> , 2010)
Módulo ASIOPAK – Instituto de Creta – filme fino	0,002	(MAVROMATAKIS <i>et al.</i> , 2010)
Célula de silício monocristalino	0,0041	(DWIVEDI <i>et al.</i> , 2020)
Célula de silício policristalino	0,004	(DWIVEDI <i>et al.</i> , 2020)
Célula de silício amorfo	0,0011	(DWIVEDI <i>et al.</i> , 2020)
Célula GICS (cobre, índio, gálio e selênio)	0,0048	(DWIVEDI <i>et al.</i> , 2020)
Célula de telureto de cádmio	0,0035	(DWIVEDI <i>et al.</i> , 2020)
Célula de telureto de cádmio	0,0035	(DWIVEDI <i>et al.</i> , 2020)

4.5.2 Perdas angulares nos módulos solares

Apesar de não ser utilizado na metodologia empregada neste trabalho é importante analisar as perdas angulares que correspondem ao fator η_r já comentado.

Os arranjos fotovoltaicos em operação real apresentam perdas angulares em relação ao seu comportamento em condições de ensaio padrão, devido ao ângulo de incidência da radiação incidente e à superfície do solo. Embora essas perdas nem sempre sejam desprezíveis, elas geralmente não são levadas em consideração ao corrigir as características elétricas do arranjo fotovoltaico ou estimar a produção de energia dos sistemas fotovoltaicos. A principal razão dessa aproximação é a falta de equações matemáticas fáceis de usar para o cálculo das perdas angulares.

No artigo MAVROMATAKIS *et al.*, 2010 é apresentada uma equação matemática para o cálculo das perdas angulares, denominado de coeficiente de reflexão, η_R , com base no artigo *Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model*, MARTIN; RUIZ, 2001. O artigo analisa essas perdas citadas em módulos fotovoltaicos e apresenta um modelo analítico baseado em resultados teóricos e experimentais. O modelo proposto é baseado em módulos fotovoltaicos monocristalinos e policristalinos de silício amorfo, e contempla a existência de poeira superficial. Com ele, as perdas angulares integradas ao longo dos períodos de interesse podem ser facilmente calculadas. As perdas mensais e anuais foram calculadas para 10 locais europeus diferentes, com diversos climas e latitudes (variando de 32° a 52°), e considerando diferentes ângulos de inclinação do módulo. O modelo depende de um parâmetro de ajuste denominado coeficiente de perdas angulares que caracteriza a resposta angular relativa do módulo fotovoltaico.

As perdas angulares, AL, de um módulo fotovoltaico são calculadas em referência à incidência normal de radiação e superfície limpa, que são as condições nas quais comumente as características elétricas de um módulo fotovoltaico são fornecidas, sendo dado pela equação 4.29.

$$AL(\alpha) = 1 - \frac{\bar{T}(\alpha)}{\bar{T}(0)} = 1 - \frac{1 - \bar{R}(\alpha) - \bar{A}(\alpha)}{1 - \bar{R}(0) - \bar{A}(0)} \square 1 - \frac{1 - \bar{R}(\alpha)}{1 - \bar{R}(0)} \quad 4.29$$

onde:

- α é o ângulo de incidência
- $\bar{R}(0)$ e $\bar{R}(\alpha)$ são as refletâncias ponderadas do módulo nas condições de referência STC e no ângulo α
- $\bar{T}(0)$ e $\bar{T}(\alpha)$ são as transmitâncias ponderadas do caminho ar - células nas condições de referência STC e no ângulo α
- $\bar{A}(0)$ e $\bar{A}(\alpha)$ são as absortâncias ponderadas do caminho ar - células nas condições de referência STC e no ângulo α ;

As correspondentes transmitâncias e absortâncias das células solares são dentro do vidro e do encapsulamento e a barra em cima das grandezas indicam

valores ponderados pelo produto da resposta espectral do módulo fotovoltaico pela distribuição espectral da radiação solar, AM15G de acordo com a Norma ASTM E892-87, Livro Anual da ASTM Normas 12.02, 1987, de acordo com MAVROMATAKIS *et al.*, 2010. O termo AM15G refere-se a uma das condições de irradiação solar padrão usado para testar e caracterizar dispositivos fotovoltaicos, como células solares e painéis solares. A sigla "AM" significa "Air Mass", que se refere à quantidade de atmosfera que a radiação solar deve atravessar antes de atingir a superfície da Terra em uma localização específica. O "AM15" é uma condição de irradiação solar que representa a radiação solar típica do espectro solar em um dia claro ao nível do mar, quando o Sol está a 41,81° acima do horizonte. Quanto ao "G" em "AM15G", geralmente indica que a irradiação solar foi ajustada para coincidir com as condições de um dia ensolarado. Em alguns casos, a radiação AM15 é ponderada espectralmente com o espectro solar "G", que é uma aproximação do espectro de radiação solar global em um dia ensolarado ao nível do mar.

O complemento à unidade das perdas angulares é denominado fator angular, $f_{I\alpha}$, e representa, de acordo com a primeira igualdade na equação 4.19), a transmissão de angular de luz relativa do módulo, conforme MARTIN; RUIZ, 2001.

O valor experimental de $f_{I\alpha}$ pode ser obtido dividindo a corrente de curto-circuito, I_{SC} , em um ângulo α pelo produto da corrente de curto-circuito na incidência normal, $\alpha = 0$ e o cosseno do ângulo: α resultando na equação 4.30), conforme MARTIN; RUIZ, 2001.

$$f_{I\alpha} = \frac{I_{SC}(\alpha)}{I_{SC}(0)} \times \frac{1}{\cos(\alpha)} \square \frac{1 - \bar{R}(\alpha)}{1 - \bar{R}(0)} \quad 4.30$$

O fator angular calculado representa as perdas ópticas relativas à situação de incidência normal.

Cabe observar que a condição frequentemente satisfeita de absorção desprezível dentro do caminho ar - célula é a óbvia que leva à última igualdade aproximada nas equações 4.19 e 4.20. É, no entanto, de notar que a aproximação deve manter-se, mesmo que a absorção não seja desprezível, desde que a relação de absorptância, $\frac{\bar{A}(\alpha)}{\bar{A}(0)}$, não seja muito diferente do que a taxa de transmitância ou o

fator angular, um caso não pouco realista (esse termo é usado para descrever uma situação ou cenário que, embora possa ser otimista ou favorável, ainda é considerado possível ou plausível, sem ser completamente fora da realidade).

Os autores fizeram uma análise óptica de diferentes configurações de arranjos fotovoltaicos, considerando as tecnologias de silício cristalino (x - Si) e amorfo (a - Si), com ou sem revestimento antirreflexo.

As tecnologias de silício cristalino (x - Si) e amorfo (a - Si) são duas abordagens diferentes para a fabricação de células solares fotovoltaicas. As células solares de silício cristalino são as mais comuns e amplamente utilizadas em aplicações fotovoltaicas. Elas são feitas de silício com uma estrutura cristalina altamente organizada, na qual os átomos estão dispostos em um padrão regular e repetitivo. São conhecidas por sua confiabilidade, eficiência e longa vida útil. Elas compõem a maior parte do mercado de energia solar fotovoltaica. Existem duas principais formas de células de silício cristalino: monocristalino e policristalino. As células solares de silício amorfo são fabricadas a partir de silício com uma estrutura amorfa, ou seja, sem uma estrutura cristalina regular. Isso é conseguido depositando uma camada fina de silício amorfo sobre um substrato, geralmente vidro ou plástico. Essas células são mais flexíveis e podem ser produzidas em filmes finos, o que permite uma maior versatilidade em termos de design e aplicações. No entanto, elas tendem a ter uma eficiência de conversão mais baixa em comparação com as células de silício cristalino, o que significa que produzem menos eletricidade para uma determinada área de superfície. Apesar de sua menor eficiência, essas células têm a vantagem de custos de produção mais baixos, o que as torna atraentes para aplicações onde a eficiência não é o fator mais crítico, como em certos sistemas de energia solar de grande escala ou dispositivos eletrônicos portáteis.

A partir da análise citada os autores obtiveram uma equação analítica simples para $\bar{R}(\alpha)$ que está apresentado na equação 4.31.

$$\bar{R}(\alpha) = \bar{R}(0) + [1 - \bar{R}(0)] \times \left[\frac{e^{-\cos\left(\frac{\alpha}{a_r}\right)} - e^{-\frac{1}{a_r}}}{1 - e^{-\frac{1}{a_r}}} \right] \quad 4.31$$

onde a_r é o coeficiente de perdas angulares, um parâmetro empírico adimensional a ser ajustado em cada caso.

O modelo foi aplicado à análise de diferentes módulos x - Si e a - Si. Em todos os casos, os resultados foram muito satisfatórios.

Os resultados da aplicação do modelo proposto para diferentes configurações de módulos x - Si e a - Si estão apresentados na Figura 4.13 e resumidos na Tabela 4.9. O revestimento triplo consiste em uma camada otimizada ($\text{SiO}_2 / \text{Ta}_2\text{O}_3 / \text{ZnS}$), a espessura a-Si:H (amorfo hidrogenado) é 400 nm, ITO é óxido de estanho dopado com índio), $d_1 = 92$ nm e $d_2 = 62$ nm.

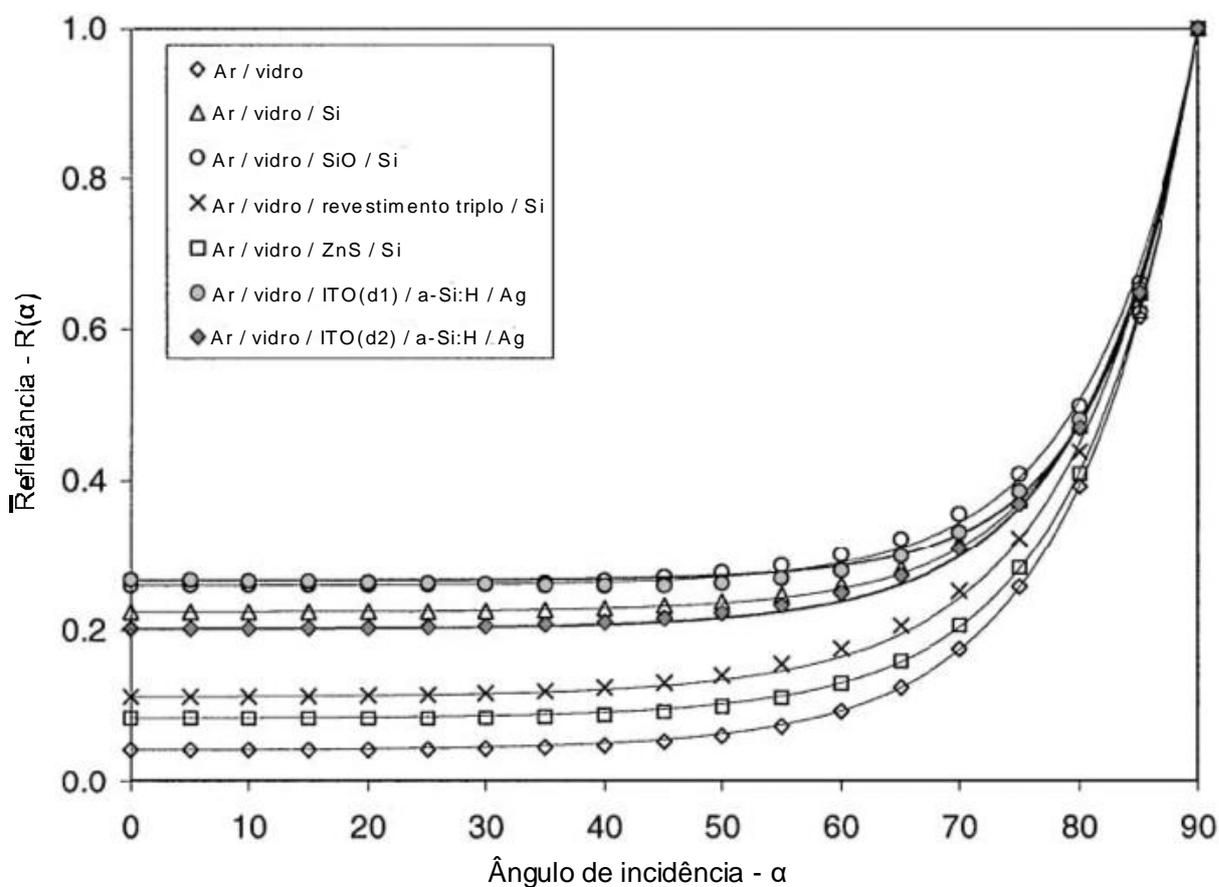


Figura 4.13 - Valores calculados de refletância (pontos) e modelados (linhas) para cada configuração indicada de módulos de silício cristalino e amorfo, adaptado de MARTIN; RUIZ, 2001.

Tabela 4.9 - $\bar{R}(0)$ e valores para cada configuração, erros padrão assintóticos relativos (σ) e coeficientes de determinação (r^2) obtido em cada análise de regressão, MARTIN; RUIZ, 2001.

Configuração	$\bar{R}(0)$	a_r	$\sigma(a_r)$	r^2
Ar / vidro	0,043	0,173	2,0E-03	1,000
Ar / vidro / Si	0,225	0,157	1,6E-02	0,998
Ar / vidro / SiO ₂ / Si	0,260	0,155	5,4E-03	0,999
Ar / vidro/ revestimento triplo./ Si	0,113	0,179	1,4E-02	0,999
Ar / vidro / ZnS / Si	0,085	0,168	3,1E-03	1,000
Ar / vidro / a-Si:H / Ag	0,358	0,136	1,8E-02	0,998
Ar / vidro / ITO (d1) / a-Si:H / Ag	0,267	0,138	1,4E-02	0,999
Ar / vidro / ITO (d1) / a-Si:H / Ag	0,203	0,163	1,4E-02	0,999

Pode-se observar que o modelo proposto descreve com muita precisão todas as configurações analisadas.

A referência MAVROMATAKIS *et al.*, 2010, indica um valor típico de a_r como 0,165.

Substituindo a equação 4.21 na equação 4.19 resulta na equação 4.32.

$$\begin{aligned}
AL(\alpha) &= 1 - \frac{1 - \bar{R}(\alpha)}{1 - \bar{R}(0)} = \\
&= 1 - \frac{1 - \left\{ \bar{R}(0) + [1 - \bar{R}(0)] \times \left[\frac{e^{-\cos\left(\frac{\alpha}{a_r}\right)} - e^{-\frac{1}{a_r}}}{1 - e^{-\frac{1}{a_r}}} \right] \right\}}{1 - \bar{R}(0)} = \\
&= 1 - \left(1 - \frac{e^{-\cos\left(\frac{\alpha}{a_r}\right)} - e^{-\frac{1}{a_r}}}{1 - e^{-\frac{1}{a_r}}} \right) = \\
&= 1 - \left(\frac{1 - e^{-\frac{1}{a_r}} - e^{-\cos\left(\frac{\alpha}{a_r}\right)} + e^{-\frac{1}{a_r}}}{1 - e^{-\frac{1}{a_r}}} \right) = \\
&= 1 - \frac{1 - e^{-\cos\left(\frac{\alpha}{a_r}\right)}}{1 - e^{-\frac{1}{a_r}}}
\end{aligned} \tag{4.32}$$

Usando a nomenclatura adotada tem-se finalmente a equação 4.33 que estima o valor de η_r .

$$\eta_r = 1 - \frac{1 - e^{-\cos\left(\frac{\alpha}{a_r}\right)}}{1 - e^{-\frac{1}{a_r}}} \tag{4.33}$$

4.5.3 Obtenção da Irradiância Solar R_s

A irradiância R_s já foi comentada anteriormente e serão obtidos dos modelos do CMIP6.

4.5.4 Obtenção da Irradiância Solar R_{STC}

A irradiância R_{STC} corresponde a irradiância solar nas condições padrão de teste, STC, que são um conjunto de condições padronizadas utilizadas na indústria

fotovoltaica para caracterizar e comparar o desempenho de módulos solares de diferentes fabricantes.

Essas condições foram estabelecidas para proporcionar um ambiente de teste consistente e reprodutível.

As condições padrão de teste geralmente incluem:

- Irradiação Solar: a irradiação solar incidente é fixada no valor dado na equação 4.34, o que significa que a superfície do módulo solar é exposta a uma intensidade constante de radiação solar deste valor.

$$R_{STC} = 1.000 \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad 4.34$$

- Temperatura do Painel: a temperatura do painel solar é definida em °C ou °F, que não corresponde a temperatura ambiente, mas sim a temperatura do painel solar durante o teste, sendo mostrada na equação 4.35.

$$T_{STC} = 25 \text{ (}^\circ\text{C)} = 77 \text{ (}^\circ\text{F)} \quad 4.35$$

- Massa de Ar: o coeficiente de massa de ar, AM, é definido como AM 1,5 e já foi definida anteriormente. AM 1,5 é uma condição típica em relação à atmosfera terrestre ao nível do mar.

4.5.5 Equação para o cálculo de PVP(t)

Utilizando as equações 4.18, 4.21 e 4.23 pode-se obter a equação para cálculo da PVP(t) que esta apresentada na equação 4.36.

$$\begin{aligned} PVP(t) &= P_r(t) \times \frac{R_s}{R_{STC}} = \\ &= \left[1 + \gamma (w_1 TAS + w_2 R_s + w_3 wind_{spd} + \text{constante} - 25) \right] \times \frac{R_s}{1.000} \end{aligned} \quad 4.36$$

Os valores dos coeficientes γ , w_1 , w_2 , w_3 e a constante serão definidos baseados no tipo abrangente de células fotovoltaicas presente na área de estudo e R_s , TAS e $wind_{spd}$ serão obtidos dos modelos do CMIP6.

Capítulo 5 - METODOLOGIA

“A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último, melhorar a humanidade.”
Nikola Tesla, em sérvio: Никола Тесла, foi um inventor, engenheiro eletrotécnico e mecânico sérvio, mais conhecido por suas contribuições ao projeto do moderno sistema de fornecimento de eletricidade em corrente alternada (1856 -1943)

5.1. Introdução

Este capítulo dedica-se a apresentar a metodologia para a obtenção do CSPOUT e PVP(t) já exposto em capítulos anteriores envolvendo o tratamento das variáveis climatológicas necessárias, as equações aplicadas no cálculo da energia solar disponível e as contantes empíricas adotadas. .

O estudo de caso que será apresentado no próximo capítulo envolve a avaliação da energia solar no território brasileiro em quatro períodos futuros: 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 e 2080-2099 e comparadas ao período histórico (1995-2014).

As variáveis climatológicas dos períodos futuros e do histórico necessárias para o estudo correspondem às dos modelos do CMIP6, em dois cenários diferentes de SSP, o SSP2-4.5, que representa uma combinação de vulnerabilidade social com um nível intermediário de forçamento, e parece mais condizente com a realidade, e o SSP5-8.5, que representa o cenário mais pessimista e catastrófico sobre mudanças climáticas na literatura (ARISTIZÁBAL, 2021), em conjuntos de dados distintos, sendo dois produzidos pelo *Euro-Mediterranean Center on Climate Change* (CMCC), denominados CMCC-CM2-SR5 e CMCC-ESM2 e um pelo *Earth Consortium*, denominado EC-Earth3, que serão comentados no item 5.2.

Os dados do período histórico, 1995-2014, serão comparadas com os dados ERA5 (*ERA-Interim reanalysis version 5*), que corresponde a um conjunto de dados climáticos produzidos pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), sendo uma reanálise atmosférica de quinta geração do clima global, abrangendo o período de janeiro de 1940 até o presente. O ERA5 combina grandes quantidades de observações históricas em estimativas globais usando modelagem avançada e sistemas de assimilação de dados e substitui a reanálise ERA-Interim

que deixou de ser produzida em 31 de agosto de 2019 (SETCHELL, 2020) e também serão comentados no item 5.2.

As equações necessárias para a obtenção do potencial de geração solar, ou seja CSPOUT e PVP(t) já definidas no capítulo 4 correspondem às equações 4.16 e 4.36 e que serão novamente apresentadas no item 5.3.

As variáveis climáticas necessárias são a irradiância solar no topo da atmosfera, a temperatura do ar na superfície e a velocidade do vento a 10 m de altura, sendo utilizadas também algumas constantes empíricas de acordo com a tecnologia empregada no Brasil e que serão comentadas no item 5.4.

5.2. Variáveis Climatológicas

Como já comentado, as variáveis climatológicas do período histórico correspondem a dados do CMIP6 e dos períodos futuros utilizadas no estudo são de dois SSPs do CMIP6, denominados SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

O histórico e cada um dos SSPs do CMIP6 incluem uma ampla gama de modelos climáticos que variam em termos de complexidade e abrangência, atingindo cerca de 120 modelos climáticos globais e por volta de 45 instituições e organizações em todo o mundo, conforme relatado em LOVATO; PEANO, 2020.

Serão utilizados na presente análise os seguintes modelos:

- CMCC-CM2: o modelo climático acoplado CMCC-CM2 representa a nova família de modelos climáticos globais acoplados desenvolvidos e usados no CMCC. Baseia-se nos componentes atmosféricos, terrestres e marinhos do *Community Earth System Model* juntamente com o modelo oceânico global *Nucleus for European Modeling of the Ocean*, que considera a dinâmica interativa dos componentes da atmosfera, oceano, gelo marinho e terra, desenvolvidos no instituto denominado *Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici*, situado na Itália.

O CMCC-CR2-SR5 corresponde à configuração padrão do CMCC-CM2, conforme CHERCHI *et al.*, 2018.

O CMCC-ESM2 também é desenvolvido pelo CMCC, e sua versão atual é baseada no CMCC-CM2 com a inclusão da biogeoquímica marinha para representar plenamente os ciclos globais de carbono, de acordo com o “CMCC-ESM - Earth System Model”, 2023.

- EC-Earth3: este modelo é uma versão atualizada do modelo EC-Earth, que é um modelo de sistema terrestre desenvolvido por um consórcio europeu de serviços meteorológicos nacionais e institutos de pesquisa. O consórcio EC-Earth foi iniciado em 2006 e recebeu muitos novos parceiros desde então. O EC-Earth tornou-se um modelo de ponta proeminente no cenário internacional do clima global e dos modelos do sistema terrestre, conforme o “EC-Earth – EC-Earth a Global Climate Model”, 2023.

Cabe observar que as projeções dos três modelos climáticos integrantes do CMIP6 estão disponíveis para download na plataforma do *Earth System Grid Federation* conforme relatado em “ESGF-CEDA - Home”, 2023.

As variáveis climatológicas referentes ao período histórico do ERA5 estão disponíveis no *Climate Data Store (CDS)* do ECMWF e acessado no site <https://cds.climate.copernicus.eu/> de acordo com o “Copernicus Climate Data Store”, 2023. Para obtê-los deve-se criar uma conta.

Não foi necessário fazer download destes dados pois os mesmos já se encontram disponíveis com a professora orientador deste trabalho.

5.3. Equações Utilizadas nas Análises

Para obtenção do CSPOUT será utilizada a equação 5.1 = 4.16.

$$\text{CSPOUT} = 0,572 \times \text{Rs} - 0,2125 (115 - \text{TAS}) \quad 5.1$$

Para obtenção do PVP(t) será utilizada a equação 5.2 = 4.36.

$$\text{PVP}(t) = \left[1 + \gamma (w_1 \text{TAS} + w_2 \text{Rs} + w_3 \text{wind}_{\text{spd}} + \text{constante} - 25) \right] \times \frac{\text{Rs}}{1.000} \quad 5.2$$

Os parâmetros utilizados nas equações 5.1 e 5.2 são os seguintes:

- Rs é a radiação solar recebida à superfície, W/m², denominado nos dados

climáticos do CMIP6 como *surface solar radiation downwards*, *rsdc* e no ERA5 como *surface solar radiation downward*, *ssrd*.

- TAS é a temperatura do ar na superfície, °C, mesmo denominação nos dados climáticos do CMIP6 e como *2m Temperature*, representado por *t2m* no ERA5.
- w_{spt} é a velocidade do vento em 10 m, m s^{-1} , denominado nos dados climáticos do CMIP6 como *sfcWindU* ou *u10* correspondendo a componente zonal, *sfcWindV* ou *v10* corresponde a componente meridional, e *sfcWindMag* ou *wnd* correspondendo a magnitude do vento. No ERA5 são fornecidas *u10* e *v10* que representam as componentes já citadas.
- w_1 , adimensional, w_2 , $^{\circ}\text{C m}^2 \text{W}^{-1}$, w_3 , $^{\circ}\text{C s m}^{-1}$, constante, $^{\circ}\text{C}$ e γ , $^{\circ}\text{C}^{-1}$, são coeficientes que depende do tipo de célula solar e serão definidos no próximo item.

O CSPOUT corresponde à saída de potência solar concentrada, ou seja, a potência disponibilizada no concentrador solar, sendo dado em W m^{-2} . O PVP(t) corresponde a máxima potência disponível com relação às condições padrão de teste (STC), sendo um número adimensional. Seu valor multiplicado pela potência do painel fotovoltaico, também referido as condições STC, indica a potência de saída do complexo fotovoltaico. Para melhor análise, o valor de PVP(t) será multiplicado por 100, sendo, portanto referido em %.

5.4. Constantes Empíricas Adotadas para o Brasil

A tecnologia CSP não necessita de nenhuma constante adicional além das variáveis climáticas.

Já a tecnologia de geração fotovoltaica necessita do conhecimento do tipo de célula fotovoltaica utilizada no empreendimento.

Consultando sites específicos de fabricação de células fotovoltaicas brasileiros, podendo-se citar (CASARIN, 2023.1; “Placa Solar: modelos, preços e onde comprar”, 2023; “Placa Solar Fotovoltaica: Tudo Sobre”, 2023; SOLAR, 2021) tem-se que os tipos de células fotovoltaicas predominantes no Brasil são as células de silício cristalino, e as tecnologias mais comuns utilizadas no Brasil são:

- Células de silício policristalino: amplamente utilizadas no Brasil devido à sua eficiência e custo relativamente baixo de produção. Elas são feitas de silício fundido e solidificado em grandes blocos, resultando em múltiplos cristais.
- Células de silício monocristalino: também são populares e eficientes. São feitas a partir de um único cristal de silício, o que as torna mais eficientes em comparação com as células de silício policristalino, mas são geralmente mais caras.
- Outras tecnologias de células fotovoltaicas, como as células de filme fino de diferentes materiais, tais como silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), seleneto de cobre, índio e gálio (CIS/CIGS), orgânico (OPV) e híbrido (HJT), não são tão comuns no Brasil, mas podem ser encontradas em alguns projetos específicos ou em menor escala.

As placas solares monocristalinas (mono-Si) são hoje as mais vendidas do Brasil, incluindo os modelos tradicionais (Módulos PoliStandard - Std) e as placas com tecnologia PERC (com camadas de passivação atrás da célula). Até 2019, porém, os modelos policristalinos eram predominantes no mercado solar fotovoltaico. Essa realidade mudou rapidamente com o crescimento das placas mono-Si, como mostrado na Figura 5.1, disponível em “Placa Solar Fotovoltaica: Tudo Sobre”, 2023. A figura também mostra que as placas de filme fino ainda representam uma parcela pequena do mercado

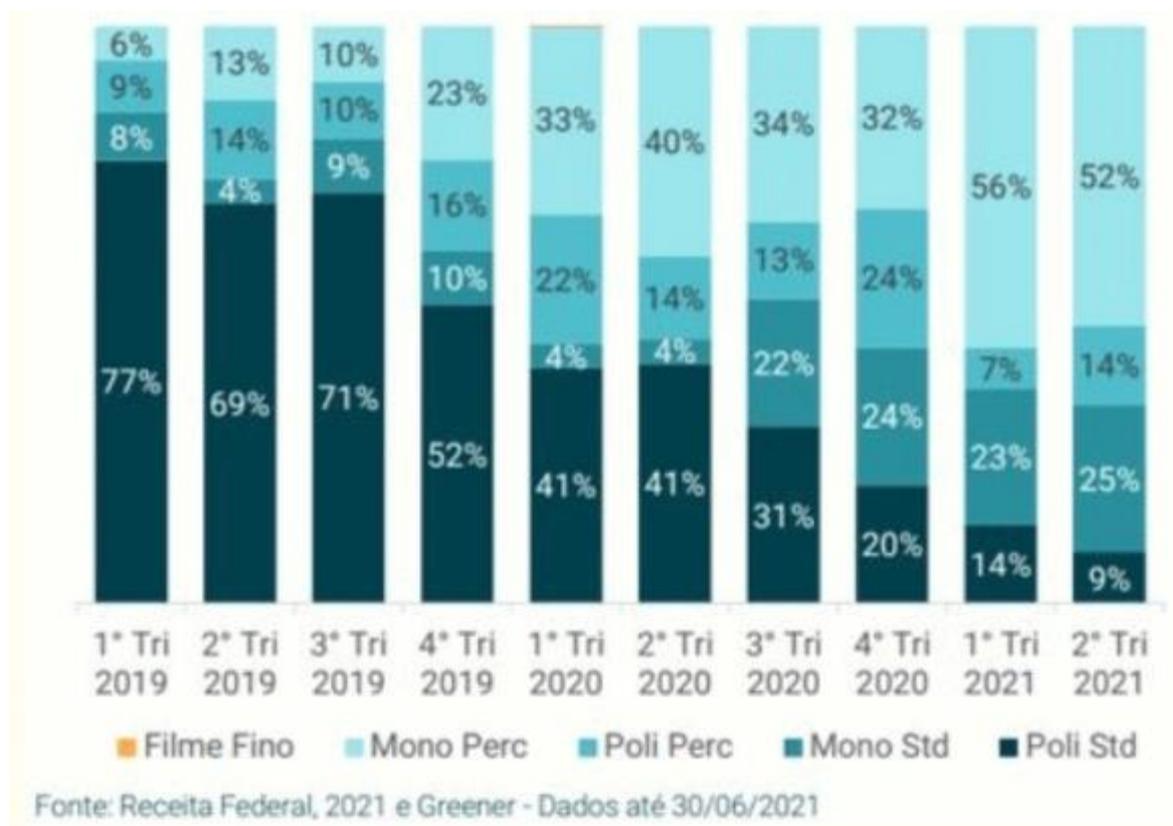


Figura 5.1 - Parcela de cada tecnologia de Placa Solar Fotovoltaica no mercado brasileiro. Geração distribuída e concentrada, disponível em “Placa Solar Fotovoltaica: Tudo Sobre”, 2023.

Serão utilizados os valores dos coeficientes γ , w_1 , w_2 , w_3 e da constante referentes às células de silício monocristalino apresentados na Tabela 5.1

Tabela 5.1 - Coeficientes para o silício monocristalino utilizados no estudo.

Coeficientes	Valor	Tabela
w_1 (adimensional)	0,942	4.3
$w_2 \left(\frac{^{\circ}\text{Cm}^2}{\text{W}} \right)$	0,028	4.3
$w_3 \left(\frac{^{\circ}\text{Cs}}{\text{m}} \right)$	-1,509	4.3
Constante ($^{\circ}\text{C}$)	3,900	4.3
γ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0,005	4.6

5.5. Tratamento Adicional para as Variáveis Climatológicas

Para as três variáveis climatológicas $rsdc$, tas e ws deve-se fazer um tratamento adicional de modo a deixá-las adequadas as análises a serem feitas e aplicadas nas equações já mencionadas.

As análises partirão de períodos mensais, devido ao elevado número de dados que serão utilizados de cada variável por período de estudo. Isto não acarreta perda de precisão para os propósitos das análises e reduzem enormemente o tamanho das matrizes de dados, reduzindo memória e tempo de processamento.

Para tanto os seguintes tratamento foram dados as variáveis climatológicas disponibilizadas:

- Uma vez que a maioria dos modelos do CMIP6 não fornecem as médias mensais dos dados necessários ao estudo foram obtidas com frequência de 3 horas. .Para obter as médias mensais foi utilizado um comando denominado *monmean* da ferramenta CDO (Climate Data Operators) que é usada para realizar operações em dados climáticos. O CDO é uma coleção de ferramentas de linha de comando usadas para manipular e analisar dados climáticos e meteorológicos em diferentes formatos. O comando *monmean* calcula a média para cada mês ao longo de um conjunto de anos, resultando em uma série de médias mensais. A ferramenta pode ser obtida no site oficial do CDO, que pode ser acessado em <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/>, conforme “Overview - CDO - Project Management Service”, 2023).
- Para o ERA5 foram obtidos os dados diários e convertidos em dados mensais.
- A temperatura nos modelos CMIP6 e ERA5 foram dados em K e nas equações 5.1 e 5.2 devem ser utilizadas em °C, portanto foi feita a conversão a partir da equação 5.3:

$$TAS(^{\circ}C) = TAS(K) - 273,15 \quad 5.3$$

- No ERA5 o valor de $ssrd$ foi dado em $J\ m^{-2}$, que na presente situação corresponde à energia de um dia. Como nas equações 5.1 e 5.2, R_s deve entrar em $W\ m^{-2}$, deve-se utilizar a equação 5.4 para converter energia em potência, correspondente a um dia:

$$\begin{aligned}
 R_s &= \frac{\text{ssrd}(\text{Jm}^{-2})}{1(\text{dia})} = \frac{\text{ssrd}(\text{Jm}^{-2})}{1(\text{dia}) \times 24(\text{hdia}^{-1}) \times 60(\text{minh}^{-1}) \times 60(\text{smin}^{-1})} = \\
 &= \frac{\text{ssrd}(\text{Jm}^{-2})}{86.400(\text{s})} = \frac{\text{ssrd}}{86.400} (\text{Wm}^{-2})
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

- O vento, não foi fornecido sua magnitude w_s , mas as componentes zonal (u_{10}) e meridional (v_{10}) do mesmo para todos os modelos, sendo obtidas com frequência de 3 horas ou diárias (ERA5). Com isso, w_s é obtido a partir da equação 5.5.

$$w_s = \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \tag{5.5}$$

Com isto os dados resultam em matrizes quadridimensionais contendo a latitude, longitude, variável e tempo, estando prontas para as análises desejadas.

5.6. Metodologia

Para o cálculo das variáveis a seguinte metodologia foi utilizada:

- Os dados climatológicos utilizado nas análises foi delimitado pelas latitudes 10°N – 40°S e longitudes 80°W – 30°W, que abrange toda a região brasileira e partes da América do Sul
- Para todos os cenários, modelos e períodos (meses) de análise, foram calculados os valores de CSPOUT e PVP(t) utilizando as equações 5.1 e 5.2. A grandeza PVP(t) será referida a partir deste momento como PVP.
- Um período de 30 anos é frequentemente utilizado para análises climatológicas e é considerado o período de referência padrão pela OMM e por muitas agências meteorológicas em todo o mundo. No entanto, em algumas situações específicas, como estudos de mudanças climáticas de longo prazo, períodos de 20 anos ou outros intervalos de tempo podem ser usados. No presente trabalho foi utilizado um período de 20 anos.
- Com isso, os valores de CSPOUT e PVP foram divididos em períodos de 20 anos, que correspondem aos anos 1995-2014, 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079, 2080-2099.
- Em cada um dos períodos acima foram obtidas as médias por estação do ano, ou

seja, verão (DJF), outono (MAM), inverno (JJA) e primavera (SON), para cada um dos três modelos, utilizando as expressões apresentadas na equação 5.6.

$$\begin{aligned} \text{DJF} \rightarrow G_{\text{DJF}} &= \frac{\sum_{i=\text{anoi}-1}^{\text{anof}-1} G_{i-\text{dez}} + \sum_{i=\text{anoi}}^{\text{anof}} (G_{i-\text{jan}} + G_{i-\text{fev}})}{240} \\ \text{XYZ} \rightarrow G_{\text{XYZ}} &= \frac{\sum_{i=\text{anoi}}^{\text{anof}} (G_{i-X} + G_{i-Y} + G_{i-Z})}{240} \end{aligned} \quad 5.6$$

onde:.

- ✓ G = CSPOUT e PVP.
 - ✓ anoi = 1995, 2020, 2040, 2060 e 2080.
 - ✓ anof = 2015, 2039, 2059, 2079 e 2099.
 - ✓ X = março, junho e setembro.
 - ✓ Y = abril, julho e outubro.
 - ✓ Z = maio, agosto e novembro.
- Em cada um dos períodos selecionados foram calculadas as médias por estação do ano referente aos três modelos, utilizando a equação 5.7.

$$GM_{\text{XYZ}} = \frac{G_{M1-\text{XYZ}} + G_{M2-\text{XYZ}} + G_{M3-\text{XYZ}}}{3} \quad 5.7$$

onde:.

- ✓ GM = valores médios de CSPOUT e PVP.
 - ✓ M1 = CMCC-CR2-SR5.
 - ✓ M2 = CMCC-ESM2
 - ✓ M3 = EC-Earth3
 - ✓ XYZ = DJF, MAM, JJA, SON.
- Para os períodos 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 e 2080-2099 foram obtidas a anomalias do CSPOUT e do PVP correspondentes a estes valores do período 1995-2015, utilizando a equação 5.8.

$$GA_{\text{XYZ}} = GK_{\text{PER-XYZ}} - GK_{1995-2014-\text{XYZ}} \quad 5.8$$

onde:.

- ✓ GA = anomalias de CSPOUT e PVP.
 - ✓ GK = G e GM.
 - ✓ PER = 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 e 2080-2099.
- As obtenções das grandezas citadas acima foram feitas utilizando o programa Matlab a partir dos arquivos em formato NETCDF resultantes do tratamento descrito no item anterior.
 - Os resultados das grandezas obtidos com o Matlab foram disponibilizados em arquivos também em formato NETCDF.
 - Estes arquivos foram processados no programa GrADS (*Grid Analysis and Display System*) que produziram as figuras envolvendo a área de interesse, ou seja, o território brasileiro.

Capítulo 6 - ESTUDO DE CASO

“Ao contemplarmos a vastidão do cosmos, percebemos que nosso planeta é um ponto frágil suspenso na vastidão do espaço, e a energia solar se apresenta como uma dádiva natural que poderia sustentar a vida e a prosperidade da humanidade, preservando a beleza única de nosso lar planetário.”

Carl Sagan, cientista planetário, astrônomo, astrobiólogo, astrofísico, escritor, divulgador científico e ativista (1934 - 1996)

6.1. Introdução

Neste capítulo serão analisadas as anomalias do potencial de geração solar para o território brasileiro, devido às mudanças climáticas, com relação às tecnologias CSP e fotovoltaica em dois cenários diferentes, cada um com três modelos distintos do CMIP6.

Conforme comentado no capítulo anterior as avaliações serão feitas em quatro períodos futuros: 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 e 2080-2099 e comparadas ao período histórico (1995-2014).

6.2. Sensibilidade de CSPOUT e PVP a Partir das Equações de Definição

Neste item será feita uma análise da sensibilidade de CSPOUT e de PVP partir das equações de definição dessas variáveis.

Analisando as equações 5.1 e 5.2 com os parâmetros apresentados na Tabela 5.1 tem-se:

- A equação 5.1 é uma equação linear, e com isso os valores de CSPOUT alteram linearmente com a variação das grandezas climatológicas descritas na equação, ou seja, R_s e TAS .
- As sensibilidades dessas variáveis climatológicas no valor de CSPOUT correspondem aos coeficientes angulares das mesmas.
- Para o CSPOUT tem-se uma sensibilidade de $0,572 \text{ W/m}^2$ com relação à R_s e de $0,2125 \text{ W/m}^2$ com relação à TAS .
- O impacto da variação de R_s no CSPOUT é cerca de três vezes maior que o

impacto da variação de TAS.

- A equação 5.2 é uma equação não linear e neste caso as sensibilidades de PVP são dadas pela equação 6.1:

$$\frac{\partial \text{PVP}}{\partial R_s} = 8,95 \times 10^{-4} + 2,80 \times 10^{-7} R_s + 4,71 \times 10^{-6} \text{TAS} - 7,55 \times 10^{-6} \text{wind}_{\text{spd}}$$

$$\frac{\partial \text{PVP}}{\partial \text{TAS}} = 4,71 \times 10^{-6} R_s \quad 6.1$$

$$\frac{\partial \text{PVP}}{\partial \text{wind}_{\text{spd}}} = -7,55 \times 10^{-6} R_s$$

- A sensibilidade da PVP com relação à R_s tem uma parcela constante (mais significativa) e três outras dependentes do próprio R_s , TAS e wind_{spd} .
- Com base nas ordens de grandeza de R_s , TAS e wind_{spd} o impacto na sensibilidade de PVP com relação a R_s , são de cerca de 3%, 5% e -8% da parcela constante respectivamente.
- As sensibilidades da PVP com relação a TAS e a wind_{spd} dependem do valor da radiação solar no momento considerado.

–

6.3. Valores de CSPOUT e PVP Possíveis de Ocorrer com os Dados Climáticos Disponibilizados

Neste item será feita uma análise simplificada dos valores de CSPOUT e PVP possíveis de ocorrer a partir dos valores máximos e mínimos das variáveis climáticas que ocorrem nos cenários, modelos e períodos considerados.

Observando todos os valores das variáveis climatológicas de interesse nos cenários, modelos e períodos analisados, dentro da região estudada, tem-se:

- R_s varia de $3,1 \text{ W m}^{-2}$ até $433,7 \text{ W m}^{-2}$.
- TAS varia de $-20,1 \text{ }^\circ\text{C}$ até $45,4 \text{ }^\circ\text{C}$.
- wind_{spd} varia de 0 m s^{-1} até $16,8 \text{ m s}^{-1}$.

O impacto das faixas de valores de R_s e TAS no CSPOUT estão apresentados nas figuras 6.1 e 6.2, onde se observa que a potência solar

concentrada, com os valores de R_s e TAS observados, resultam na faixa de 0 até 217 W m^{-2} para o menor valor de TAS e na faixa de 0 até 231 W m^{-2} , para o maior valor de TAS. Isto mostra que quanto maior o valor da temperatura ambiente maior o valor da potência solar disponível. Para uma mesma temperatura ambiente a potência solar concentrada varia linearmente com o valor de R_s , tendo uma diferença de 14 W m^{-2} para uma variação da temperatura ambiente entre os limites observados, para um mesmo valor de R_s .

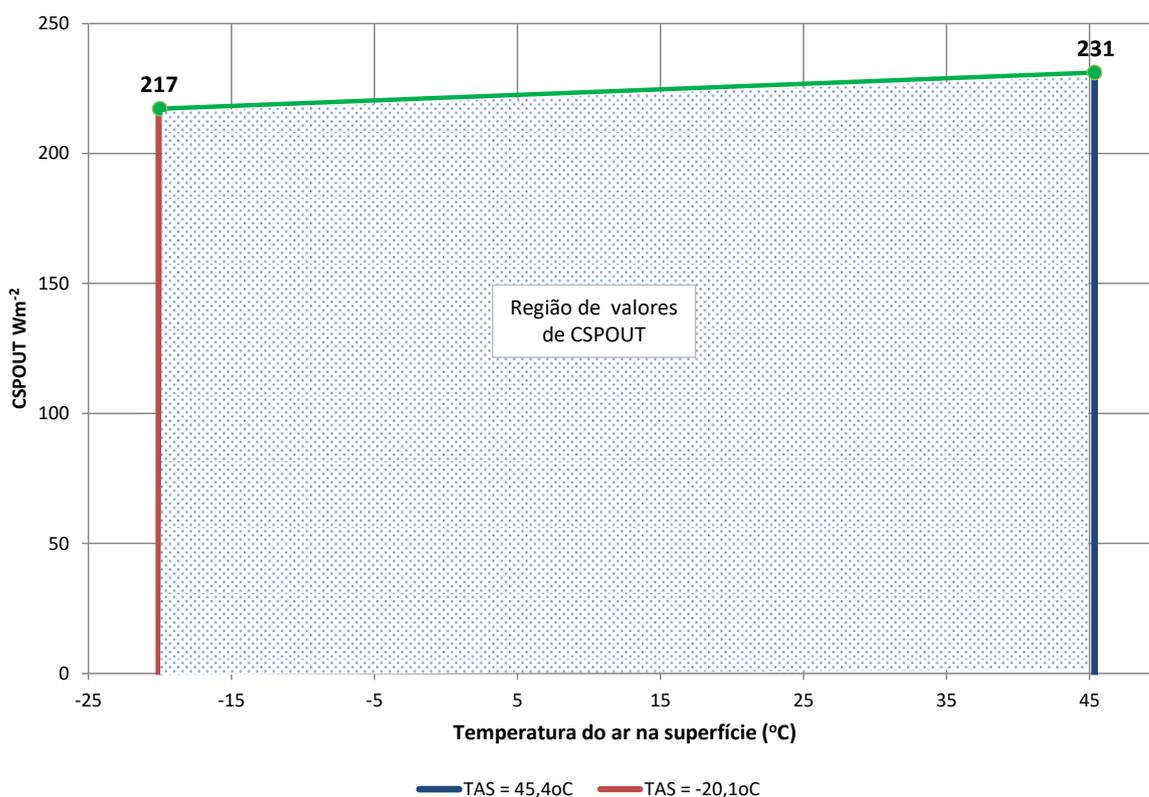


Figura 6.1 – Região de valores de CSPOUT para as faixas de R_s e TAS na região de análise para todos os cenários, modelos e períodos analisados.

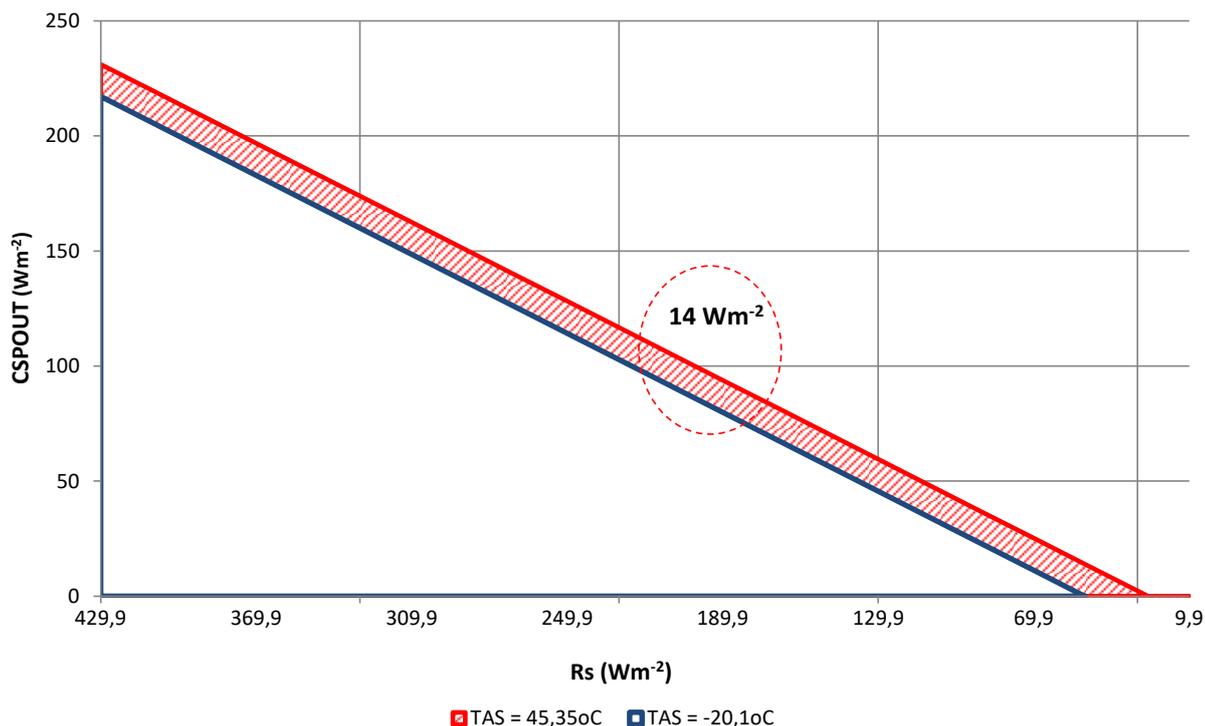


Figura 6.2 – Valores de CSPOUT para a faixa de Rs e TAS máximo e mínimo na região de análise para todos os cenários, modelos e períodos analisados.

O impacto das faixas de valores de Rs, TAS e ws no PVP estão apresentados nas figuras 6.3 a 6.5, onde se fixam dois destes valores e varia o outro. Na Figura 6.3 foram fixados TAS e ws em seus valores máximo e mínimo, variando Rs. Observa-se uma variação significativa no PVP, que aumenta com o aumento de Rs como era esperado. A influência da temperatura mostrou mais significativa que a influência de ws, devido à faixa de valores possíveis para estas grandezas. Na Figura 6.4 foram fixados Rs e TAS em seus valores máximo e mínimo, variando ws. Nesta situação a influência de Rs é significativa praticamente anulando PVP para valores baixos da mesma. Com aumento de ws o valor de PVP aumenta devido a refrigeração que ocorre nas células fotovoltaicas. Aumentando TAS o valor de PVP diminui devido à menor transferência de energia térmica das células fotovoltaicas para o ambiente. Na Figura 6.5 foram fixados Rs e ws em seus valores máximo e mínimo, variando TAS. Também nesta situação a influência de Rs é significativa praticamente anulando PVP para valores baixos do mesmo. Com aumento de TAS o valor de PVP diminui como já comentado, devido a maior dificuldade de transferir energia térmica das células fotovoltaicas para o ambiente. Aumentando ws o valor de PVP aumenta devido à melhor refrigeração das células fotovoltaicas.

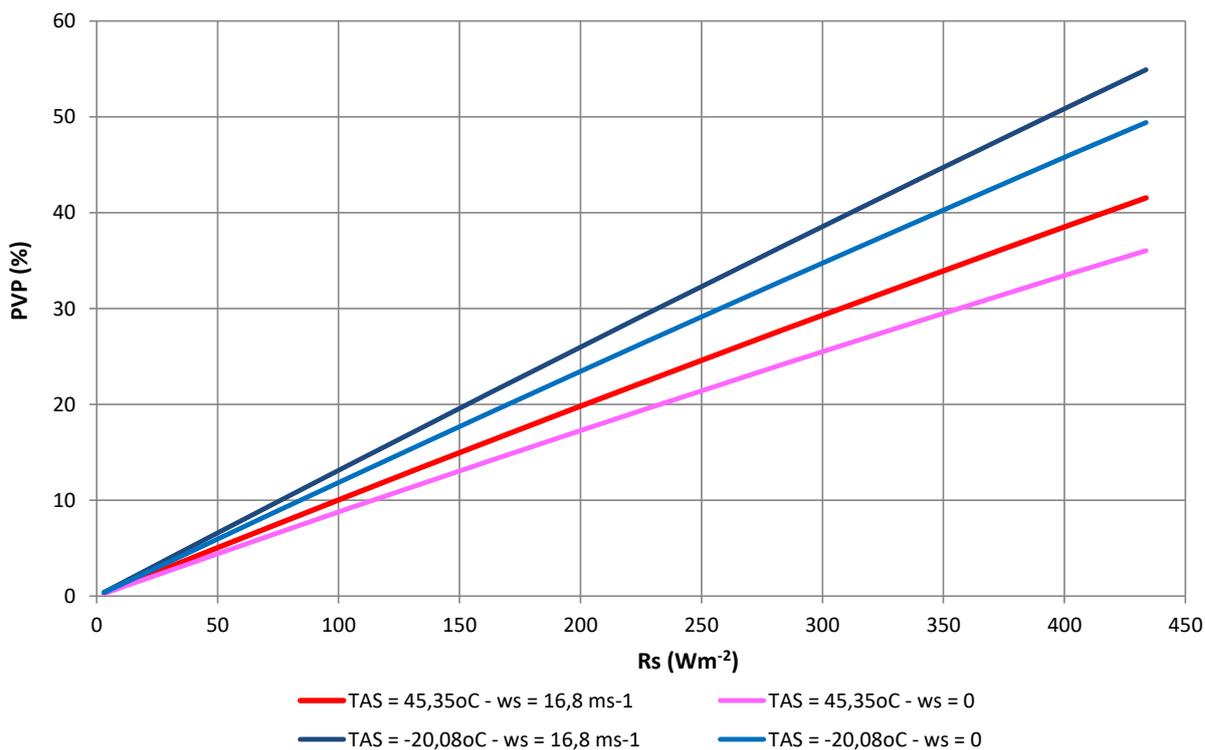


Figura 6.3 – Valores de PVP para variação de Rs com TAS e ws constantes na região de análise para todos os cenários, modelos e períodos analisados.

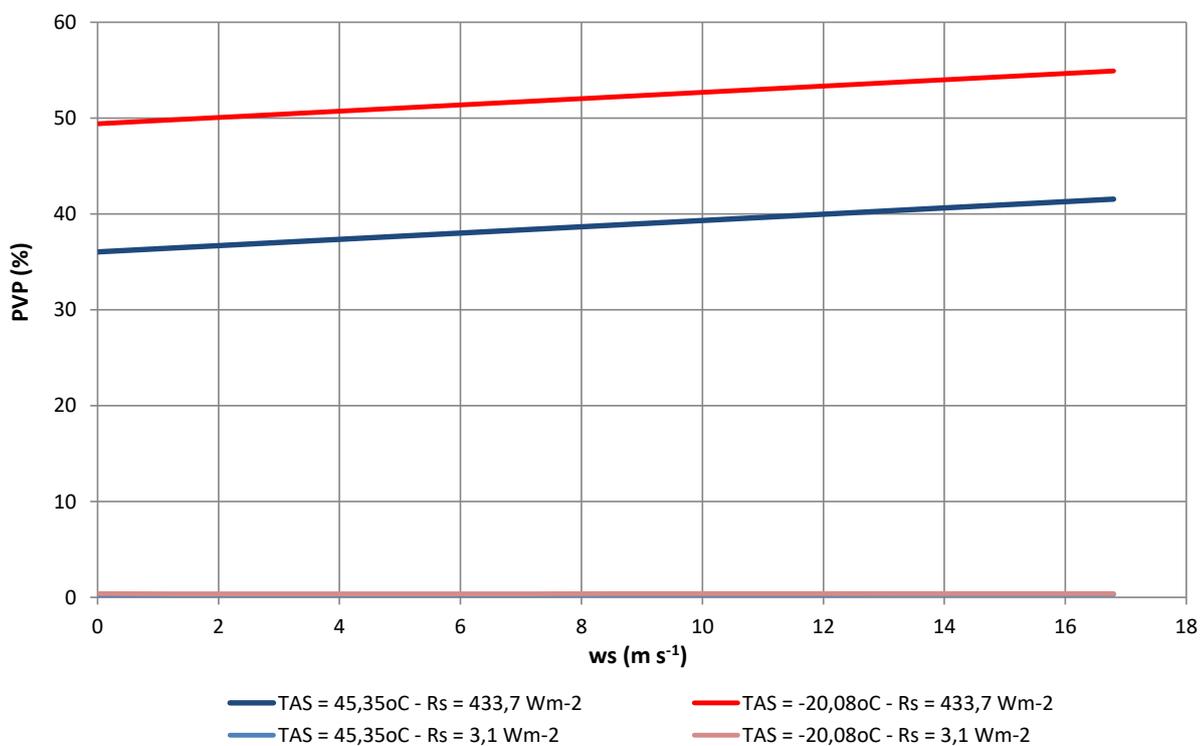


Figura 6.4 – Valores de PVP para variação de ws com Rs e TAS constantes na região de análise para todos os cenários, modelos e períodos analisados.

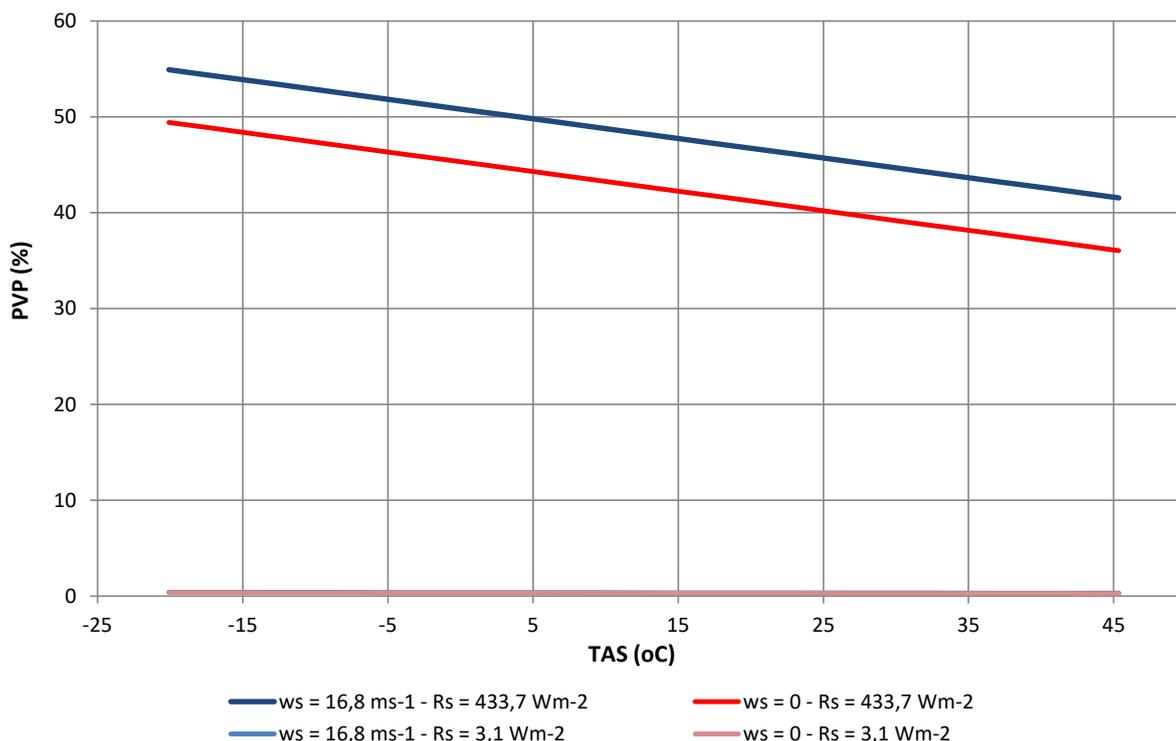


Figura 6.5 – Valores de PVP para variação de TAS com Rs e ws constantes na região de análise para todos os cenários, modelos e períodos analisados.

6.3. Valores de CSPOUT e PVP para o Território Brasileiro e Análises Correspondentes

Neste item será feita a apresentação e a análise dos valores obtidos de CSPOUT e PVP a partir dos dados de cenários, modelos e períodos considerados.

Os valores de CSPOUT e PVP obtidos para o território brasileiro estão apresentados em forma de figuras.

Cada figura corresponde a uma grandeza, ou seja, CSPOUT ou PVP, em um dos períodos analisados e uma das estações do ano.

As figuras destacam o território brasileiro, com dois tipos de mapas na mesma figura. Um mapa de contorno onde as linhas de contorno conectam pontos com valores semelhantes simultaneamente, permitindo visualizar a variação espacial dos dados e facilitando a identificação de padrões e tendências das grandezas. O outro mapa corresponde a um gráfico de contorno sombreado, onde as áreas entre as linhas de contorno sejam preenchidas com cores sólidas, criando um efeito de relevo, o que é útil para destacar regiões com valores específicos ou criar

visualizações mais suaves das grandezas.

As figuras citadas acima foram agrupadas em tabelas que apresentam características comuns entre as mesmas facilitando a análise e visualização dos resultados que as envolvem.

Para o ERA5 foi analisado somente o período histórico, 1995-2014, para comparação com os resultados obtidos do mesmo período do CMIP6, agregado em uma tabela que segue a formatação apresentada na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Formatação das figuras com os resultados obtidos do ERA5.

CSPOUT Verão (DJF)	CSPOUT Outono (MAM)	CSPOUT Inverno (JJA)	CSPOUT Primavera (SON)
Paleta de cores das figuras CSPOUT			
PVP Verão (DJF)	PVP Outono (MAM)	PVP Inverno (JJA)	PVP Primavera (SON)
Paleta de cores das figuras PVP			

Para o CMIP6, cada tabela corresponde ao CSPOUT ou ao PVP, em um dos períodos selecionados, envolvendo os três modelos e a média destes modelos, e as estações do ano, como mostrado na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Formatação das figuras com os resultados obtidos do CMIP6.

Modelo 1 CMCC-CM2-SR5	Modelo 2 CMCC-ESM2	Modelo 3 EC-Earth3	Média dos três modelos
Verão (DJF)	Verão (DJF)	Verão (DJF)	Verão (DJF)
Outono (MAM)	Outono (MAM)	Outono (MAM)	Outono (MAM)
Inverno (JJA)	Inverno (JJA)	Inverno (JJA)	Inverno (JJA)
Primavera (SON)	Primavera (SON)	Primavera (SON)	Primavera (SON)
Paleta de cores das figuras CSPOUT ou PVP			

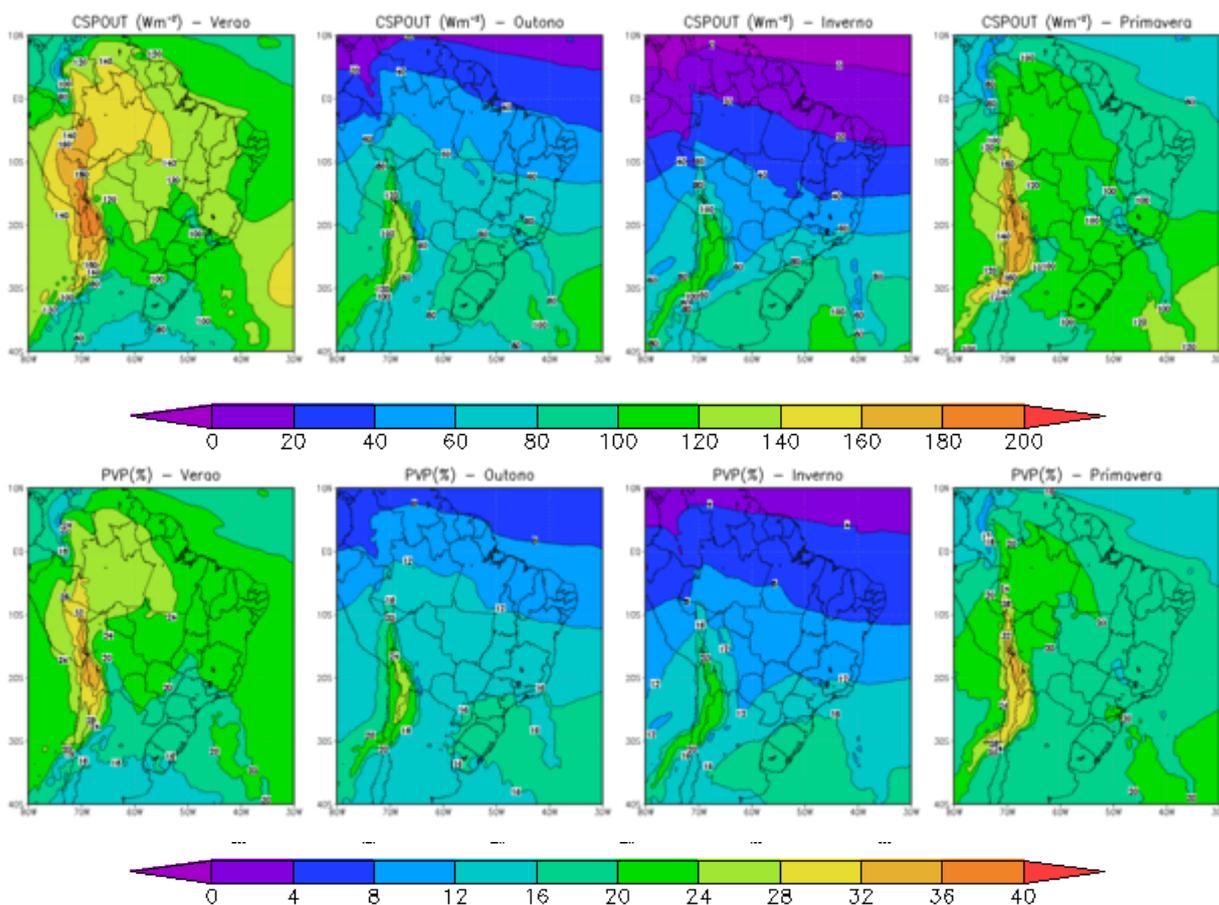
Tem um conjunto destas tabelas para cada um dos cenários (SSPs) do CMIP6 analisados, ou seja, SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

Nestas tabelas para o período histórico a figura mostra o próprio valor da grandeza, já para os demais períodos correspondentes à anomalia, como já comentado anteriormente.

A Tabela 6.3, apresenta os resultados obtidos para o período histórico, 1994-2015, correspondente ao ERA5, donde se pode observar:

- O CSPOUT varia entre 100 e 140 W m⁻² no verão, 40 e 100 W m⁻² no outono, 0 e 100 W m⁻² no inverno e 80 e 120 W m⁻² na primavera.
- Já o PVP varia entre 16 e 24% no verão, 8 e 16% no outono, 4 a 16% no inverno e 16 a 20% na primavera.
- Como era de se esperar, estas grandezas diminuem ao longo do ano do verão até o inverno para voltar a crescer na primavera.
- Também as variações de CSPOUT e PVP ao longo das estações, de um modo geral, são mais significativas nas regiões norte e nordeste, seguidos pelo sudeste e menor na região sul.
- Ao passar do verão para o outono ocorre uma diminuição de cerca de 60 W m⁻² no CSPOUT e de 10% no PVP nas regiões norte, nordeste, parte do centro oeste e norte da Bahia. A queda é menor, de 24 a 32 W m⁻² no CSPOUT e de 6 a 8% no PVP no sul da Bahia, Mato Grosso do Sul e sudeste do Brasil. Já na metade sul de São Paulo e região sul, a queda é de 16 a 24 W m⁻² e de 2 a 4% nestas grandezas.
- Ao passar do outono para o inverno a sistemática da queda se mantém, com pequena modificação na região central do país. As quedas nas grandezas são menores, de 24 a 32 W m⁻² no CSPOUT e de 2 a 4% no PVP, do norte do Brasil até Minas Gerais. Para o restante sul do país, a variação do CSPOUT é de 0 a 16 W m⁻² e de 0 a 2% no PVP.
- Ao passar do inverno para a primavera as grandezas citadas voltam a aumentar em todo o país. O aumento ocorre mais intensamente da direção sul para o norte do Brasil. O CSPOUT aumenta de 16 a 24 W m⁻² no Rio Grande do Sul e de 24 a 60 W m⁻² no resto do Brasil. O mesmo ocorre com o PVP, com aumento de 2 a 4% no Rio Grande do Sul e de 6 a 10% no resto do país.
- Da primavera para o verão as grandezas continuam a aumentar, com a distribuição ao longo do país da mesma forma que ocorreu a queda do verão para o outono. Os aumentos vão de 0 a 32 W m⁻² e de 0 a 6% no CSPOUT e PVP, respectivamente, na direção do sul para o norte do Brasil.

Tabela 6.3 – Valores do CSPOUT e PVP para o período histórico (1995-2014) do ERA5.



As tabelas 6.4 e 6.5 apresentam o CSPOUT e o PVP para o período histórico, 1994-2015, correspondente aos três modelos do CMIP6, donde pode-se observar:

- A variação do CSPOUT nos modelos M1, M2, M3 e média são as seguintes:
 - ✓ Modelo M1: entre 60 e 120 W m⁻² no verão, 60 a 100 W m⁻² no outono, 40 a 100 W m⁻² no inverno e 80 e 120 W m⁻² na primavera.
 - ✓ Modelo M2: entre 60 e 120 W m⁻² no verão, 60 a 100 W m⁻² no outono, 40 a 100 W m⁻² no inverno e 80 e 120 W m⁻² na primavera.
 - ✓ Modelo M3: entre 100 a 120 W m⁻² no verão, 80 a 100 W m⁻² no outono, 60 a 100 W m⁻² no inverno e 100 a 140 W m⁻² na primavera.
 - ✓ Média dos modelos: entre 80 a 120 W m⁻² no verão, 60 a 100 W m⁻² no outono, 40 a 100 W m⁻² no inverno e 80 a 120 W m⁻² na primavera.
- Já o PVP a variação nos modelos M1, M2, M3 e média são as seguintes:
 - ✓ Modelo M1 e M2: entre 12 a 20% no verão e primavera, 12 a 16% no outono e

inverno.

- ✓ Modelo M3 e média dos modelos: entre 16 a 20% no verão, outono e primavera e 12 a 16% no inverno.
- No modelo M1 o CSPOUT apresenta valores próximos no verão e outono em quase todo país, em exceção a região sul, que diminui no outono. O mesmo comportamento é verificado na primavera e inverno.
- Nos modelos M2 e M3, o CSPOUT apresenta faixa de valores muito próximas com relação às estações do ano e distribuição semelhante no verão e outono em quase todo país, em exceção a região sul. Já para a primavera e inverno, os valores e distribuição ao longo do país são distintos. Na região nordeste os valores são maiores na primavera, próximos no inverno e verão e menores no outono.
- Na média dos modelos o comportamento acima se repete.
- No modelo M1 o PVP apresenta distribuição semelhante e uniforme ao longo do ano em todo Brasil, com valores mais elevados na primavera. No outono aparece uma região de queda no PVP no Ceará e Piauí e uma de elevação no extremo norte. Na primavera os menores valores são no litoral sul, no nordeste e sul do Amazonas. No verão na região central do país aparecem os menores valores, com uma região de queda mais acentuada no Ceará e Piauí. No inverno os maiores valores resultam na região norte, central e parte oriental do nordeste.
- Nos modelos M2, M3 e média, o comportamento é semelhante ao acima, ocorrendo variações em valores em algumas estações do ano.
- Os modelos M1 e M2 apresentam variações de até cerca de 3 W/m^2 nos valores de CSPOUT e atingem cerca de 4% no PVP, tendo o modelo M1 valores mais elevados que o modelo M2.
- O modelo M3 apresenta valores maiores que o modelo M1, sendo que as variações no CSPOUT aumentam com relação aos valores acima, atingindo cerca de 10 W m^{-2} , Com relação ao PVP as variações são as mesmas acima, cerca de 4%.
- Portanto, os modelos M1 e M2 apresentam resultados semelhantes com pouca diferença com o modelo M3.

- Com isso a média dos modelos pode ser usada para as análises posteriores.
- Comparando o CSPOUT obtido do ERA5 com o obtido da média dos modelos CMIP6, para o período histórico, tem-se:
 - ✓ Verão: O ERA5 apresentou os maiores valores, praticamente em todo país, a menos do Rio Grande do Sul onde ficou inferior a média do CMIP6. A variação ERA5 – CMIP6, chegou a mais de 60 W m^{-2} no norte, nordeste e parte do centro-oeste, reduzindo a partir daí até atingir cerca de -30 W m^{-2} no extremo sul do Brasil.
 - ✓ Outono: a situação se inverte com relação ao verão de acordo aos valores, mas apresentando a mesma distribuição, e com isso o CMIP6 apresentou os maiores valores, variando de cerca de 30 W m^{-2} no norte do país até zerar do meio de São Paulo para o extremo sul.
 - ✓ Inverno: semelhante à situação do outono, com CMIP6 mais elevado, variando de cerca de 60 W m^{-2} no norte do país até zerar do meio de São Paulo para o extremo sul. Apresenta uma variação de cerca de 90 W m^{-2} em partes do Maranhão, Piauí e Rio Grande do Norte.
 - ✓ Primavera: semelhante aos anteriores, com o CMIP6 apresentando maiores valores em parte do norte, nordeste e parte do centro-oeste e norte de Minas Gerais, com variação de cerca de 30 W m^{-2} . A partir daí a variação se anula no restante de Minas Gerais, e parte de Mato Grosso do Sul e São Paulo. A partir deste ponto a variação se inverte e o ERA5 resulta superior ao CMIP6 atingindo cerca de 30 W.m^{-2} .
- Comparando o PVP obtido do ERA5 com o obtido da média dos modelos CMIP6, para o período histórico, tem-se:
 - ✓ Verão: O ERA5 apresentou os maiores valores, praticamente em todo país, a menos de Santa Catarina e Rio Grande do Sul onde ficou inferior a média do CMIP6. A variação ERA5 – CMIP6 chegou a cerca de 8% em uma faixa envolvendo o Amazonas, parte do Pará e Ceará e norte do Mato Grosso e Tocantins e a 12% na parte oriental do Amazonas. Ao caminhar em direção ao sul do país esta variação diminui até atingir cerca de -3% no extremo sul do Brasil.

- ✓ Outono: O ERA5 apresentou maiores valores, do Rio de Janeiro e parte de São Paulo, sul do Mato Grosso do Sul e toda região sul do Brasil, com uma diferença de cerca de até 3%. Já em uma faixa do litoral do norte do Brasil até praticamente o estado da Bahia a situação se inverte e o CMIP6 resulta mais elevado chegando a atingir cerca de 5%. No resto do país praticamente não ocorre variação entre os dois modelos.
- ✓ Inverno: semelhante à situação do outono, com CMIP6 mais elevado, variando de cerca de 9% no norte do país até zerar em parte da região sudeste e invertendo chegando a -6% no extremo sul.
- ✓ Primavera: semelhante aos anteriores, com o CMIP6 apresentando maiores valores em parte do norte, nordeste e parte do centro-oeste e norte de Minas Gerais, com variação de cerca de 3 a 5%. Da parte oriental da região amazônica e do centro-oeste até o sul do país a situação se inverte e o ERA5 resulta superior até 1%. Em uma pequena área do litoral do Paraná e de Santa Catarina e no extremo oriental do Amazonas e no Acre ocorre uma variação elevada atingindo cerca de 9%.

Tabela 6.4 – Valores do CSPOUT para o período histórico (1995-2014) do CMIP6.

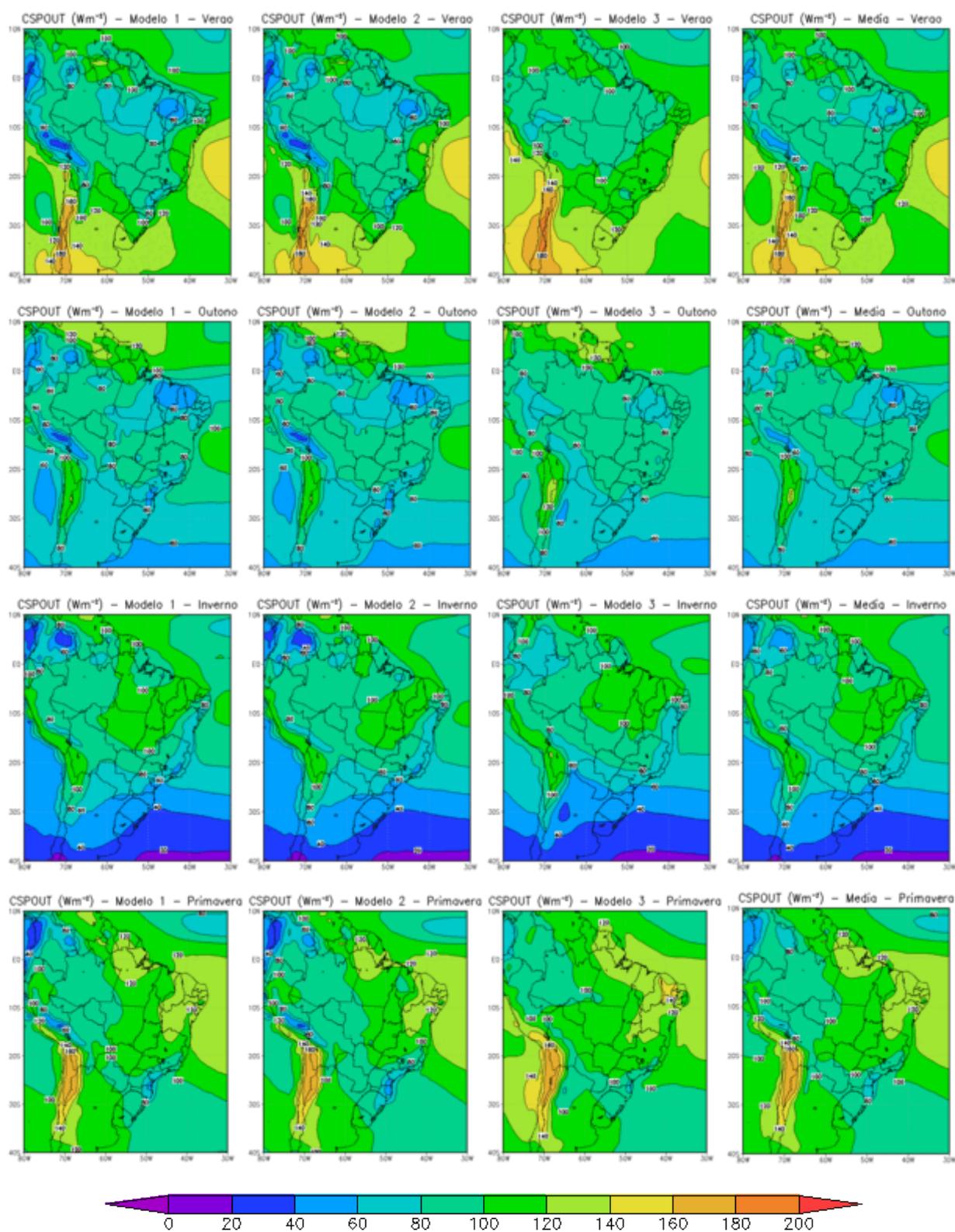
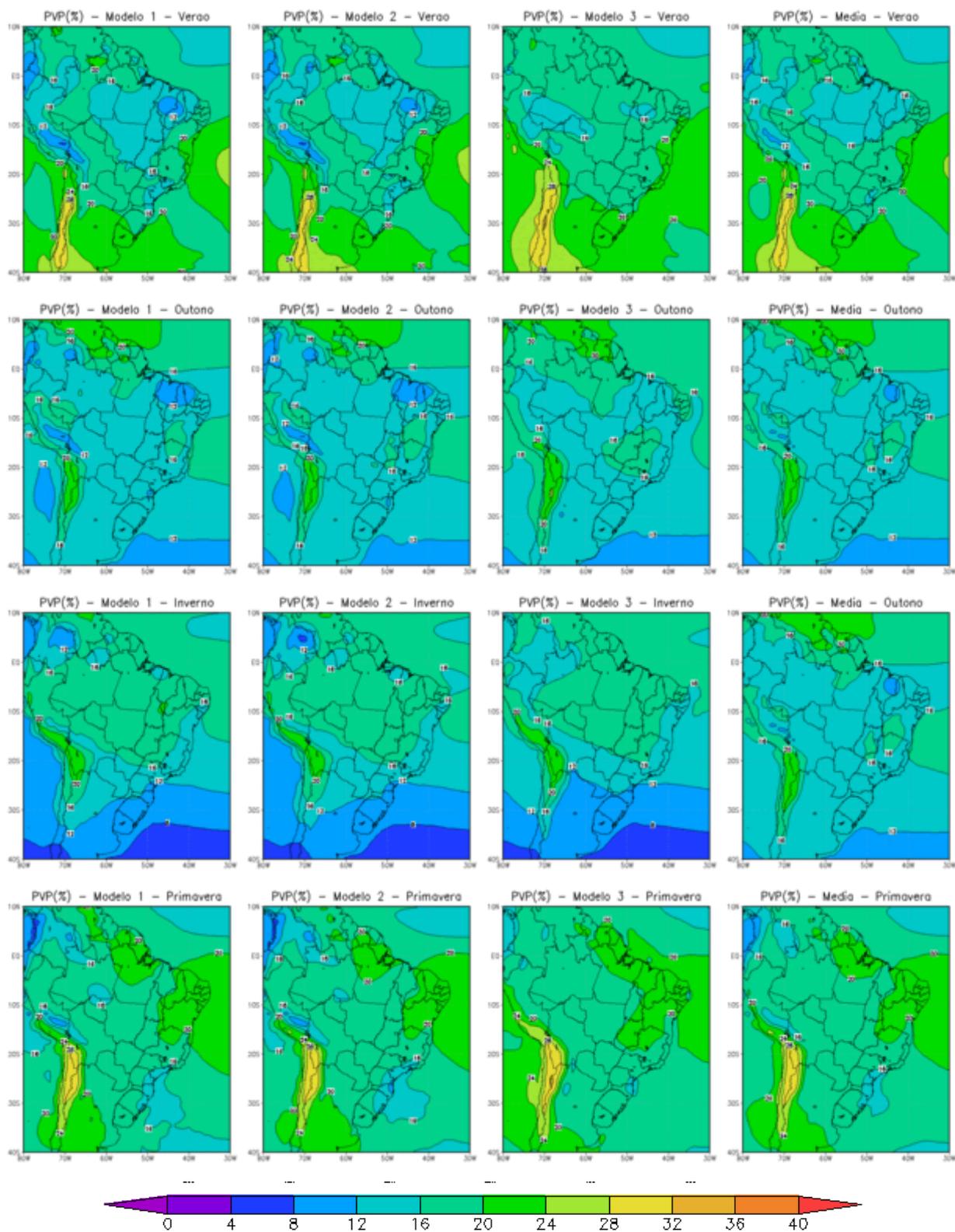


Tabela 6.5 – Valores do PVP para o período histórico (1995-2014) do CMIP6.



As tabelas 6.6 a 6.13 apresentam a anomalia do CSPOUT e o PVP para os períodos 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079, 2080-2099, correspondente aos três modelos do CMIP6, no cenário SSP2-4.5 donde pode-se observar:

- Para o período (2020-2039):
 - ✓ Os modelos M1 e M2 apresentam variações de até cerca de $\pm 3 \text{ W/m}^2$ nos valores de CSPOUT. Estas variações estão espalhadas ao longo do território brasileiro. Com relação ao PVP os valores são praticamente idênticos com uma leve predominância (<1%) para o modelo M2.
 - ✓ O modelo M3 apresenta variações entre -6 a 10 W m^2 com relação ao CSPOUT Com relação ao PVP os valores são praticamente idênticos, com diferenças menores que $\pm 1\%$.
 - ✓ A média dos três modelos acompanha as variações acima, com variações de $\pm 2 \text{ W m}^2$ com relação ao CSPOUT Com relação ao PVP os valores são praticamente idênticos, com diferenças menores ainda que a situações acima.
- Para o período (2040-2059):
 - ✓ O comportamento dos modelos M1, M2 e M3 são muito próximos as do período (2020-2039)
 - ✓ A média dos três modelos para o CSPOUT acompanha a tendência do período (2020-2039), com variações de -2 a 4 W m^2 e atingindo 10 W m^2 no verão envolvendo o Rio de Janeiro e partes de Minas Gerais, São Paulo e Espírito Santo. Com relação ao PVP os valores são praticamente idênticos, com diferenças menores que 1%, a menos da região citada que atinge no verão diferenças de cerca de 1%.
- Para o período (2060-2079):
 - ✓ O comportamento dos modelos M1, M2 e M3 são muito próximos as do período (2020-2039)
 - ✓ A média dos três modelos para o CSPOUT acompanha a tendência do período (2020-2039), com variações de -2 a 4 W m^2 e atingindo 6 W m^2 no verão envolvendo o Rio de Janeiro e partes de Minas Gerais, São Paulo e Espírito Santo. Com relação ao PVP os valores são praticamente idênticos.

- Para o período (2080-2099):
 - ✓ O comportamento dos modelos M1, M2 e M3 são muito próximos as do período (2020-2039)
 - ✓ A média dos três modelos para o CSPOUT acompanha a tendência do período (2020-2039), com variações de até 4 W m^{-2} e atingindo 6 W m^{-2} no verão em uma pequena área no norte do Paraná e no mar litorâneo do Rio de Janeiro. Também no outono aparece no sul de Minas Gerais uma área com variações de 6 W m^{-2} . Com relação ao PVP os valores são praticamente idênticos, com diferenças menores que 1%.
- Seja P1 = período de (2020-2039), P2 = período de (2040-2059), P3 = período de (2060-2079) e P4 = período de (2080-2099). Comparando as estações do ano ao longo desses períodos tem-se:
 - ✓ No verão os valores de CSPOUT diminuem ao passar de P1 para P2. Ao passar de P2 para P3 aumentam em quase todo país a menos da região sul e de parte do Maranhão e do Piauí. Ao passar de P3 para P4 continuam a aumentar a menos de uma região no sudeste de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro. As variações chegam a 3 W m^{-2} . Já os valores de PVP ao passar de P1 para P2 diminuem a menos de uma área no noroeste do Amazonas, do meio do Paraná até o meio do Rio Grande do Sul e centro do nordeste até o extremo leste de Minas Gerais. Ao passar de P2 para P3 aumentam a menos de uma área envolvendo o nordeste desde o Maranhão até Pernambuco e de uma área no oeste da Bahia e leste do Tocantins. Ao passar de P3 para P4 a variação se distribui no país, aumentando em umas partes e diminuindo em outras. A variação fica em torno de $\pm 1\%$.
 - ✓ No outono os valores de CSPOUT diminuem ao passar de P1 para P2 a menos de uma região no interior do nordeste. Ao passar de P2 para P3 aumentam e voltam a diminuir de P3 para P4, a menos da região citada. As variações chegam a 3 W m^{-2} . Já os valores de PVP ao passar de P1 para P2 aumentam em uma faixa central do país e no nordeste brasileiro e diminuem nas demais áreas. Ao passar de P2 para P3 aumentam praticamente em todo país a menos de uma estreita faixa no Rio Grande do Sul, no norte do Amazonas, Amapá, pequena área no norte do Pará até o Piauí e na região cacauzeira na Bahia. Ao

passar de P3 para P4 aumentam em grande parte do nordeste, parte de Minas Gerais, no sul do Rio Grande do Sul e no noroeste do Amazonas. A variação continua em torno de $\pm 1\%$.

- ✓ No inverno os valores de CSPOUT aumentam ao passar de P1 para P2, a menos de uma região entre o Pará e Maranhão e de parte do sudeste de São Paulo. Ao passar de P2 para P3 aumentam a exceção da região sul e de uma pequena área no Amapá. Ao passar de P3 para P4 aumentam a menos da região sul. As variações chegam a 2 W m^{-2} . Os valores de PVP ao passar de P1 para P2 aumentam em praticamente todo país, a menos de partes do Rio Grande do Sul, Pernambuco, Alagoas, Pará, Roraima, Amapá e em uma região central envolvendo Tocantins, Bahia, Goiás, Mato Grosso, Piauí e Maranhão. Ao passar de P2 para P3 aumentam em grande parte do norte, no nordeste e partes do sudeste e do sul. De P3 para P4 diminuem em parte da região sul, no noroeste do Amazonas e na região central cita acima. As variações continuam em torno de $\pm 1\%$.
- ✓ Na primavera os valores de CSPOUT variam em todos os sentidos ao passar de P1 para P2; Aumentam no centro do país, se mantem constante no norte e litoral do nordeste, e aumentam na direção sul a partir de Minas Gerais. Ao passar de P2 para P3 aumentam em todo país a menos da região sul. Ao passar de P3 para P4 também aumentam em todo país a exceção de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Os valores chegam a 3 W m^{-2} . Para o PVP de P1 para P2 observa-se aumento e redução em partes de todas as regiões do país. De P2 para P3 a área que ocorre redução se reduz e fica concentrada abaixo do Paraná e oeste do Amazonas. E de P3 para P4 ocorre diminuição em uma pequena área no oeste do Paraná e Santa Catarina. As variações ainda são em torno de $\pm 1\%$.

Tabela 6.6 - Anomalia do CSPOUT para o período (2020-2039), cenário SSP2-4.5, CMIP6.

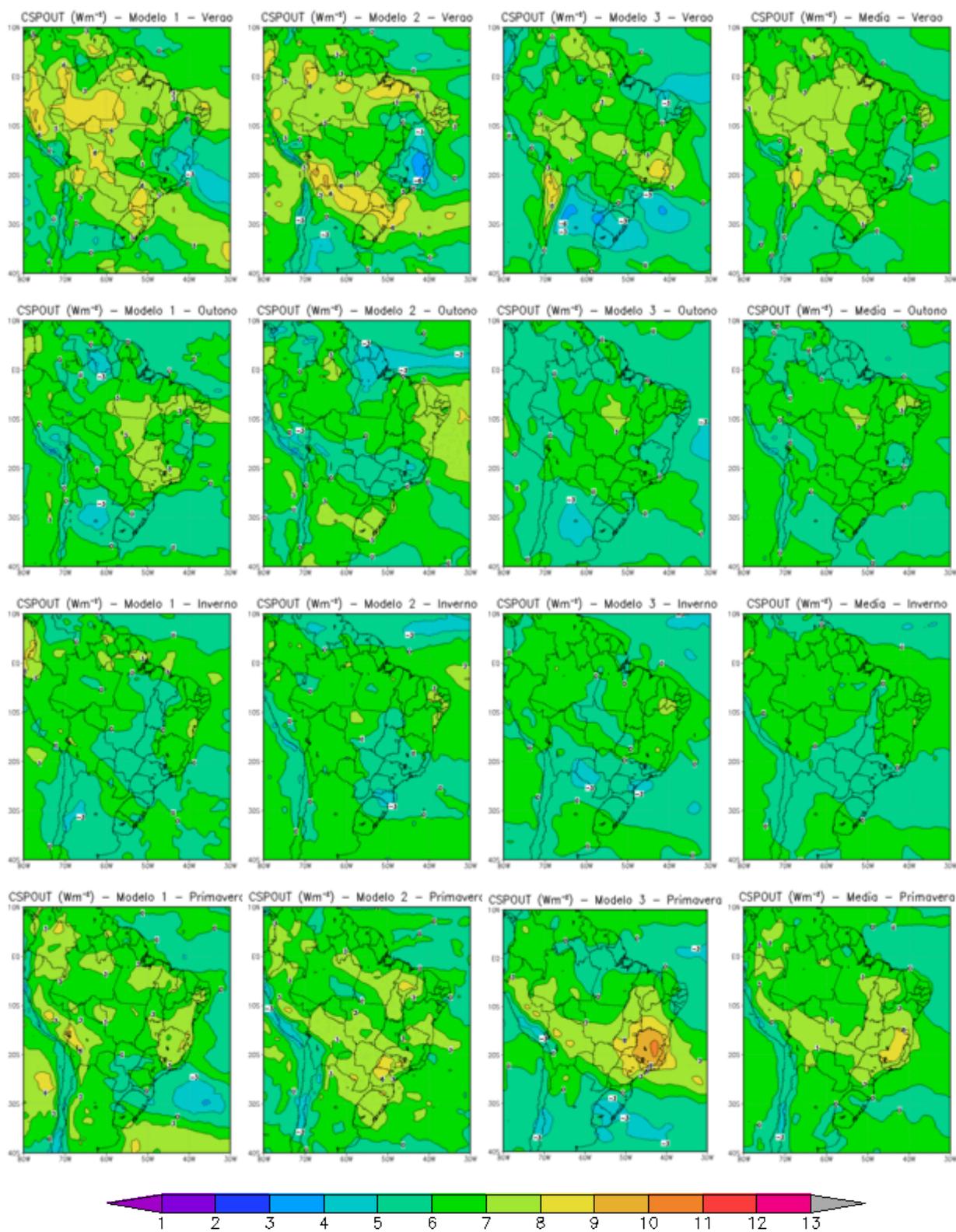


Tabela 6.7 - Anomalia do PVP para o período (2020-2039), cenário SSP2-4.5, CMIP6.

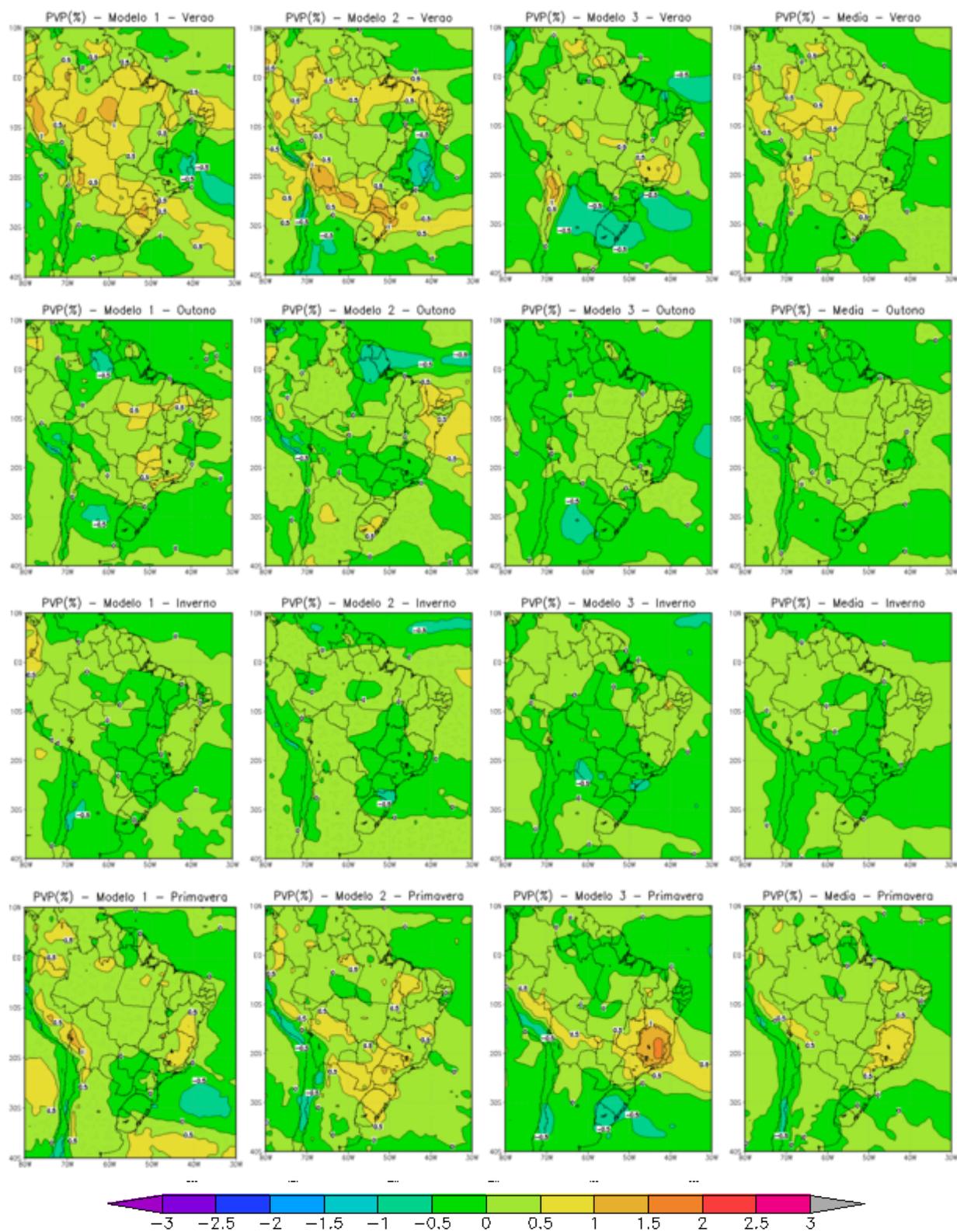


Tabela 6.8 - Anomalia do CSPOUT para o período (2040-2059), cenário SSP2-4.5, CMIP6.

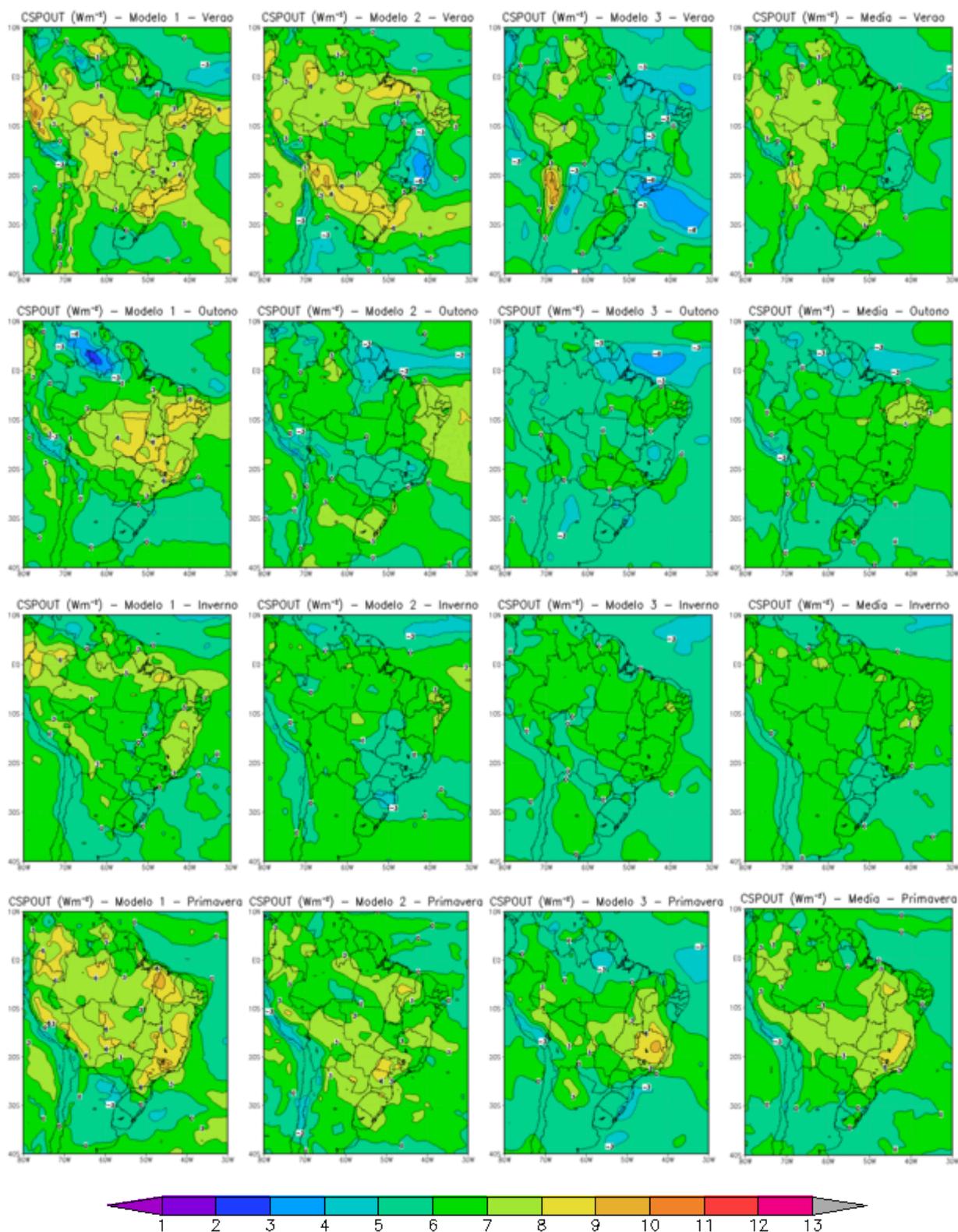


Tabela 6.9 - Anomalia do PVP para o período (2040-2059), cenário SSP2-4.5, CMIP6.

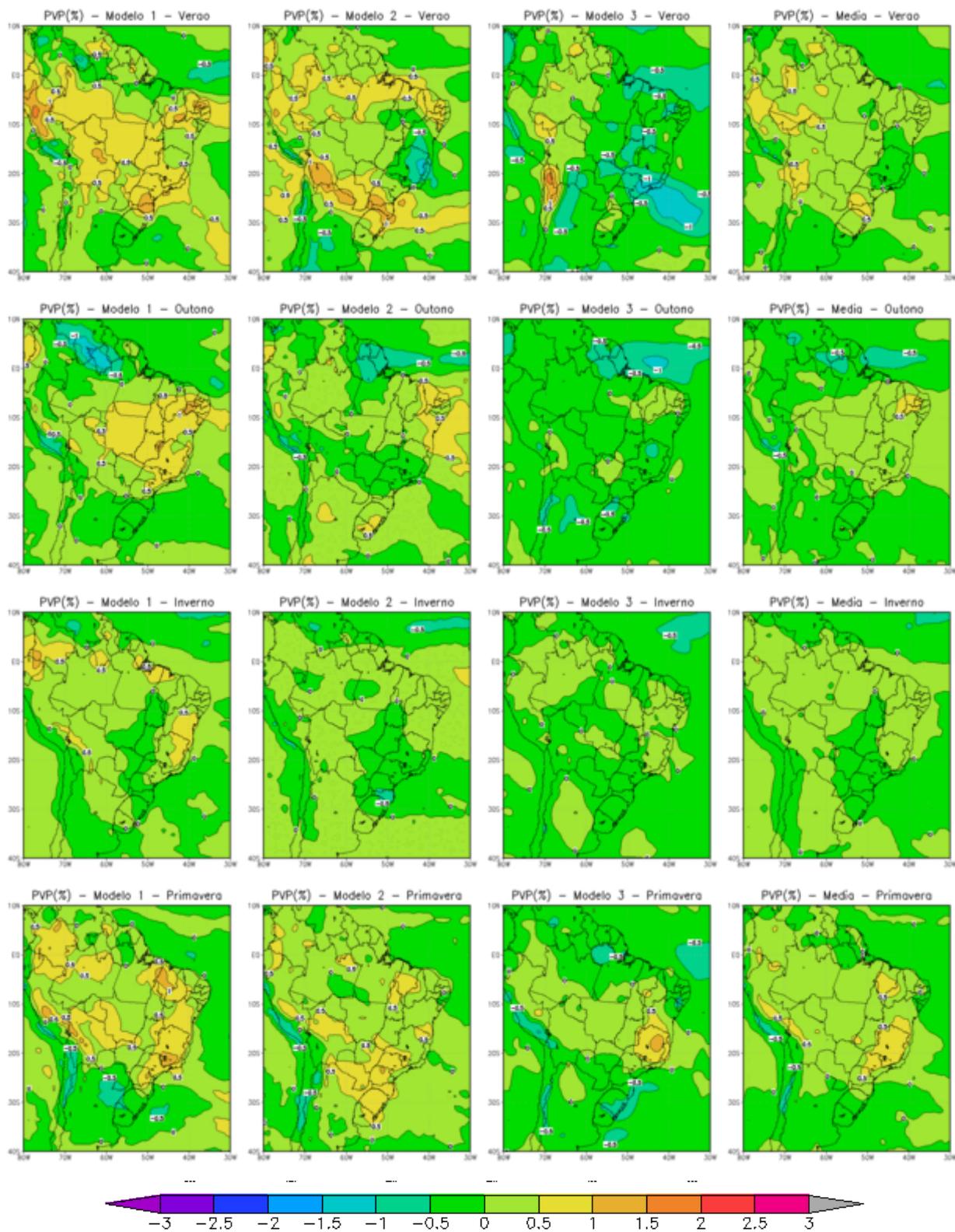


Tabela 6.10 - Anomalia do CSPOUT para o período (2060-2079), cenário SSP2-4.5, CMIP6.

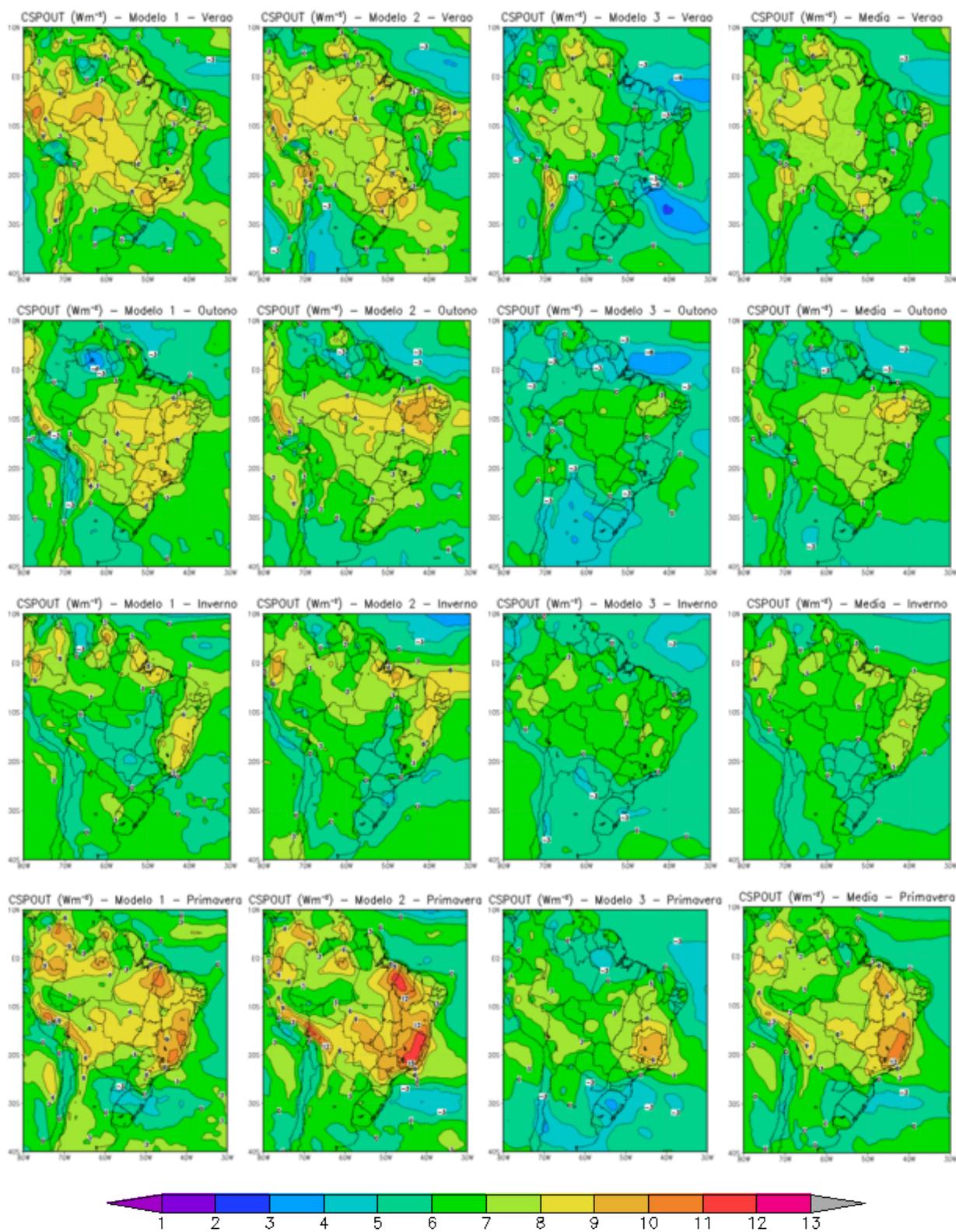


Tabela 6.11 - Anomalia do PVP para o período (2060-2079), cenário SSP2-4.5, CMIP6.

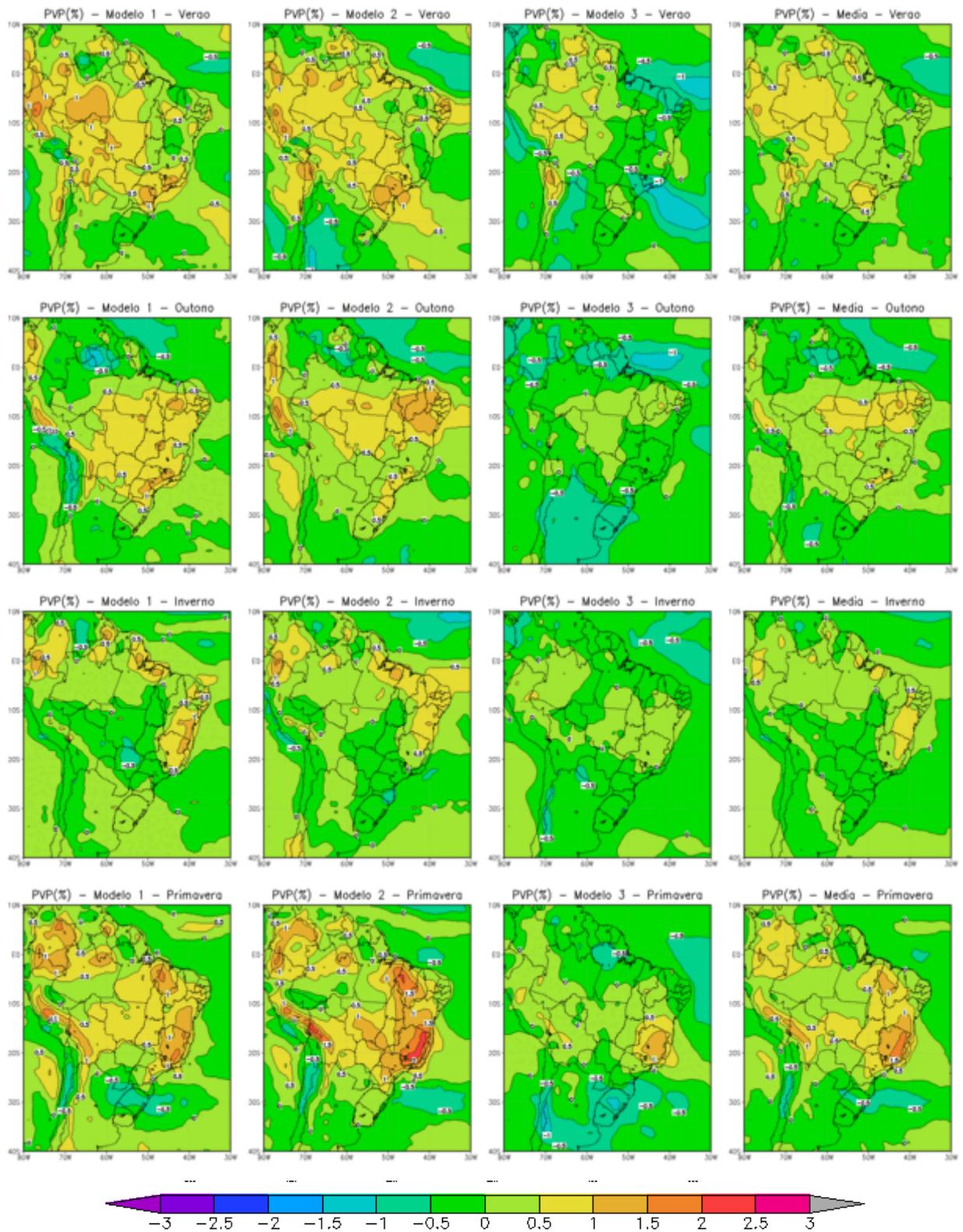


Tabela 6.12 - Anomalia do CSPOUT para o período (2080-2099), cenário SSP2-4.5, CMIP6.

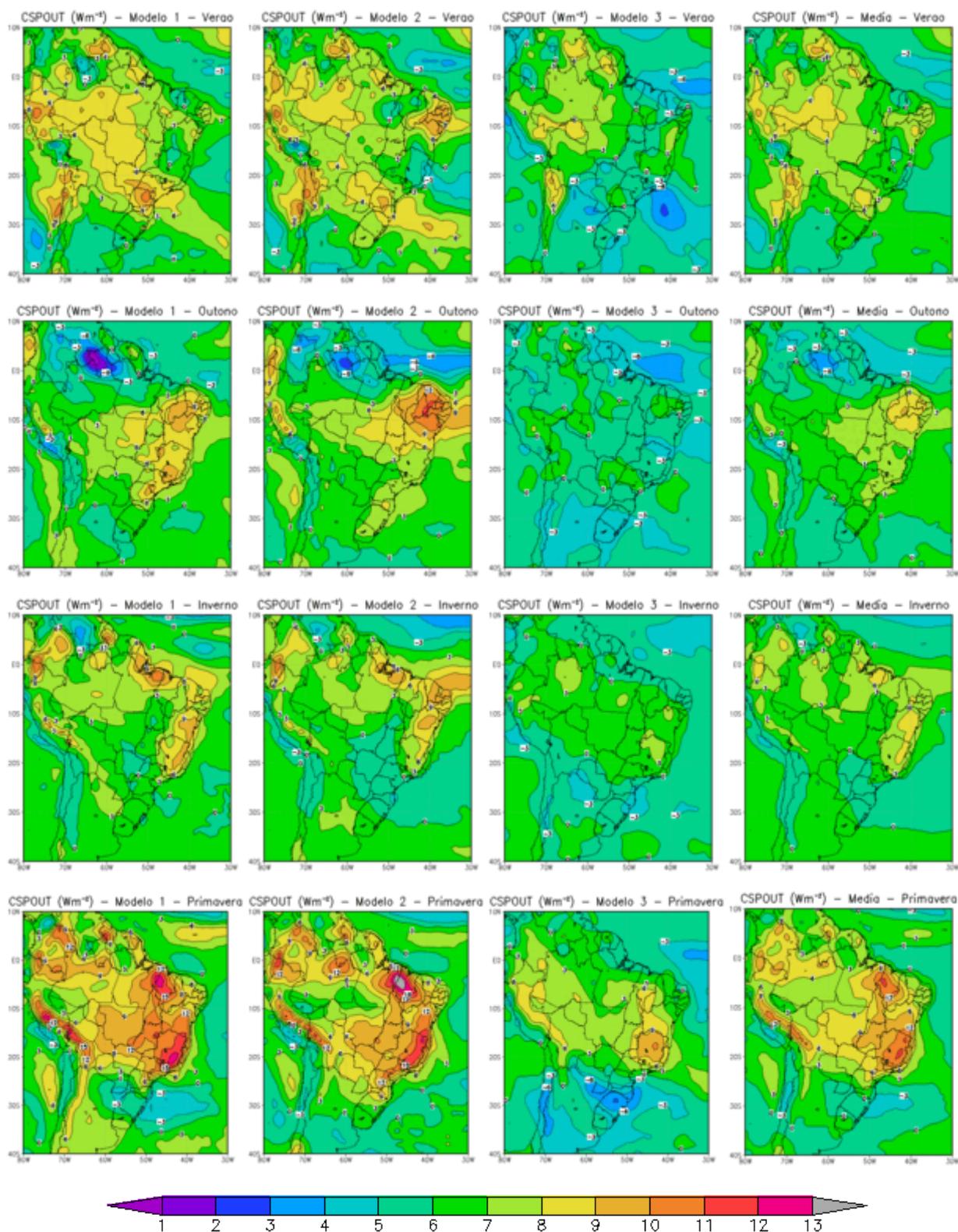
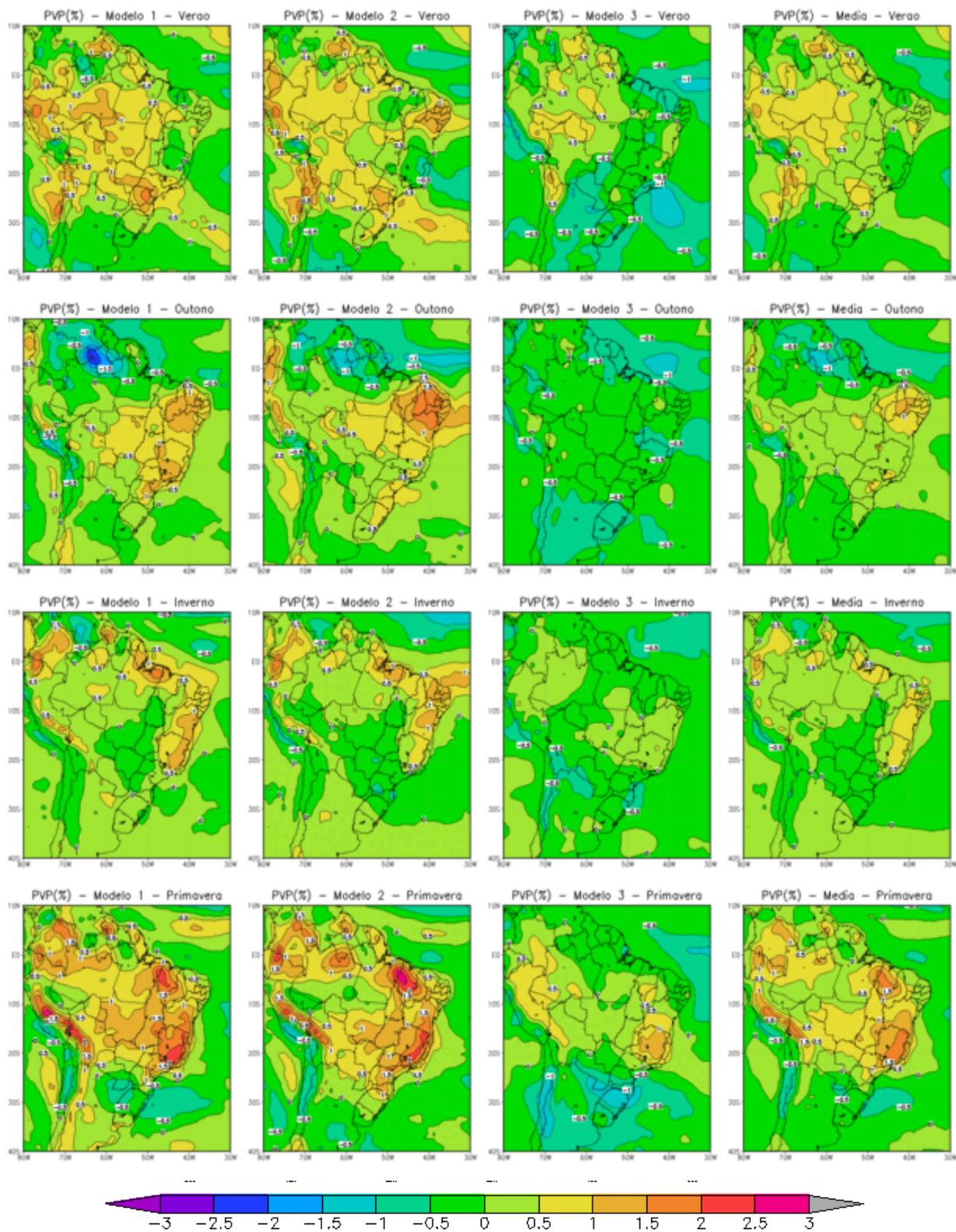


Tabela 6.13 - Anomalia do PVP para o período (2080-2099), cenário SSP2-4.5, CMIP6.



As tabelas 6.14 a 6.21 apresentam a anomalia do CSPOUT e o PVP para os períodos 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079, 2080-2099, correspondente aos três modelos do CMIP6, no cenário SSP5-8.5 donde pode-se observar:

- Para o período (2020-2039):
 - ✓ Os modelos M1 e M2 apresentam variações de até cerca de $\pm 3 \text{ W/m}^2$ nos valores de CSPOUT. Estas variações estão espalhadas ao longo do território brasileiro. Com relação ao PVP os valores são praticamente idênticos com uma leve predominância (<1%) para o modelo M2.
 - ✓ O modelo M3 apresenta variações entre -4 a 6 W m^2 com relação ao CSPOUT. Com relação ao PVP os valores são praticamente idênticos, com diferença menor que $\pm 1\%$.
 - ✓ A média dos três modelos acompanha as variações acima, com variações de $\pm 2 \text{ W m}^2$ com relação ao CSPOUT. Observa-se no outono uma variação de -4 W m^2 no norte do Amazonas. Com relação ao PVP os valores são praticamente idênticos, com diferenças menores ainda que a situações acima.
- Para o período (2040-2059):
 - ✓ O comportamento dos modelos M1, M2 e M3 são muito próximos as do período (2020-2039)
 - ✓ A média dos três modelos para o CSPOUT acompanha a tendência do período (2020-2039), com variações de -2 a 4 W m^2 . Com relação ao PVP os valores são praticamente idênticos, com diferenças menores que 1%.
- Para o período (2060-2079):
 - ✓ O comportamento dos modelos M1, M2 e M3 são muito próximos as do período (2020-2039)
 - ✓ A média dos três modelos para o CSPOUT acompanha a tendência do período (2020-2039), com variações de -2 a 4 W m^2 . Com relação ao PVP os valores são praticamente idênticos.
- Para o período (2080-2099):
 - ✓ O comportamento dos modelos M1, M2 e M3 são muito próximos as do período (2020-2039)

- ✓ A média dos três modelos para o CSPOUT acompanha a tendência do período (2020-2039), com variações de -2 até 4 W m⁻². Exceção se faz para uma área que chega a atingir 6 W m⁻², no leste da Bahia e de Minas Gerais no inverno, no leste do paraná e sudeste de São Paulo na primavera e se desloca para o sudeste de Minas Gerais, sul do Espirito Santo, Rio de Janeiro e parte norte do litoral de São Paulo, no verão. Com relação ao PVP os valores são praticamente idênticos, com diferenças menores que 1%.
- Comparando as estações do ano ao longo dos períodos tem-se:
 - ✓ No verão os valores de CSPOUT aumentam ao passar de P1 para P2, a menos de uma área no nordeste e sul. Ao passar de P2 para P3 aumentam em quase todo país a menos da região sul e de parte do Maranhão, Piauí, Bahia e Minas Gerais. Ao passar de P3 para P4 continuam a aumentar a menos de uma região no sul, oeste do Amazonas e litoral norte do nordeste. As variações chegam a 3 W m⁻². Já os valores de PVP ao passar de P1 para P2 aumentam a menos de uma área no litoral do nordeste e a partir de Santa Catarina. Ao passar de P2 para P3 o comportamento continua com a inclusão de uma área em Minas Gerais e Bahia. Ao passar de P3 para P4 o aumento continua bem como o comportamento. A variação fica em torno de ±3%.
 - ✓ No outono os valores de CSPOUT aumentam ao passar de P1 para P2 em uma grande faixa central do país e diminui nas demais áreas. De P2 para P3 continuam a aumentar alargando esta faixa. O mesmo ocorre de P3 para P4. As variações oscilam entre -1 e 3 W m⁻². Já os valores de PVP ao passar de P1 para P2 aumentam em praticamente todo Brasil, mas diminuem no litoral do nordeste e no sul do país a partir de São Paulo. Ao passar de P2 para P3 o comportamento continua e ocorre aumento em todo nordeste e um deslocamento na área de redução no sul para somente o Rio Grande do Sul. Ao passar de P3 para P4 a redução no PVP no sul do país reduz para cerca de 0%.
 - ✓ No inverno os valores de CSPOUT aumentam ao passar de P1 para P2 na faixa envolvendo o norte e o nordeste e diminuem desta faixa para o sul do país. Ao passar de P2 para P3 a faixa se expande desde o Rio Grande do Norte até Minas Gerais. E ao passar de P3 para P4 o comportamento é

praticamente o mesmo. As variações chegam a 3 W m^{-2} . Os valores de PVP ao passar de P1 para P2 aumentam do centro do país para o norte e diminuem do centro do país em direção ao sul. De P2 para P3 o comportamento é o mesmo e área de diminuição se desloca para o meio de São Paulo. Surge também uma pequena área de diminuição no meio do Amazonas. De P3 para P4 continuam com o mesmo comportamento aumentando as áreas de diminuição citada. As variações continuam em torno de $\pm 1\%$.

- ✓ Na primavera os valores de CSPOUT ao passar de P1 para P2 aumentam em praticamente todo país, a menos na região sul onde diminuem. De P2 para P3 o comportamento continua o mesmo. E de P3 para P4 o mesmo comportamento é verificado só acrescentando uma parte do nordeste que ocorre redução. As variações continuam em torno de até 3 W m^{-2} . Para o PVP de P1 para P2 observa-se aumento em praticamente todo o Brasil, e diminuição no sul e litoral do nordeste. De P2 para P3 as áreas que ocorrem redução se expandem. De P3 para P4 o PVP aumenta em uma grande região central do Brasil e diminui no sul, parte do nordeste e do norte e no Mato Grosso. As variações ficam de $-0,5$ as 1% .

Tabela 6.14 - Anomalia do CSPOUT para o período (2020-2039), cenário SSP5-8.5, CMIP6.

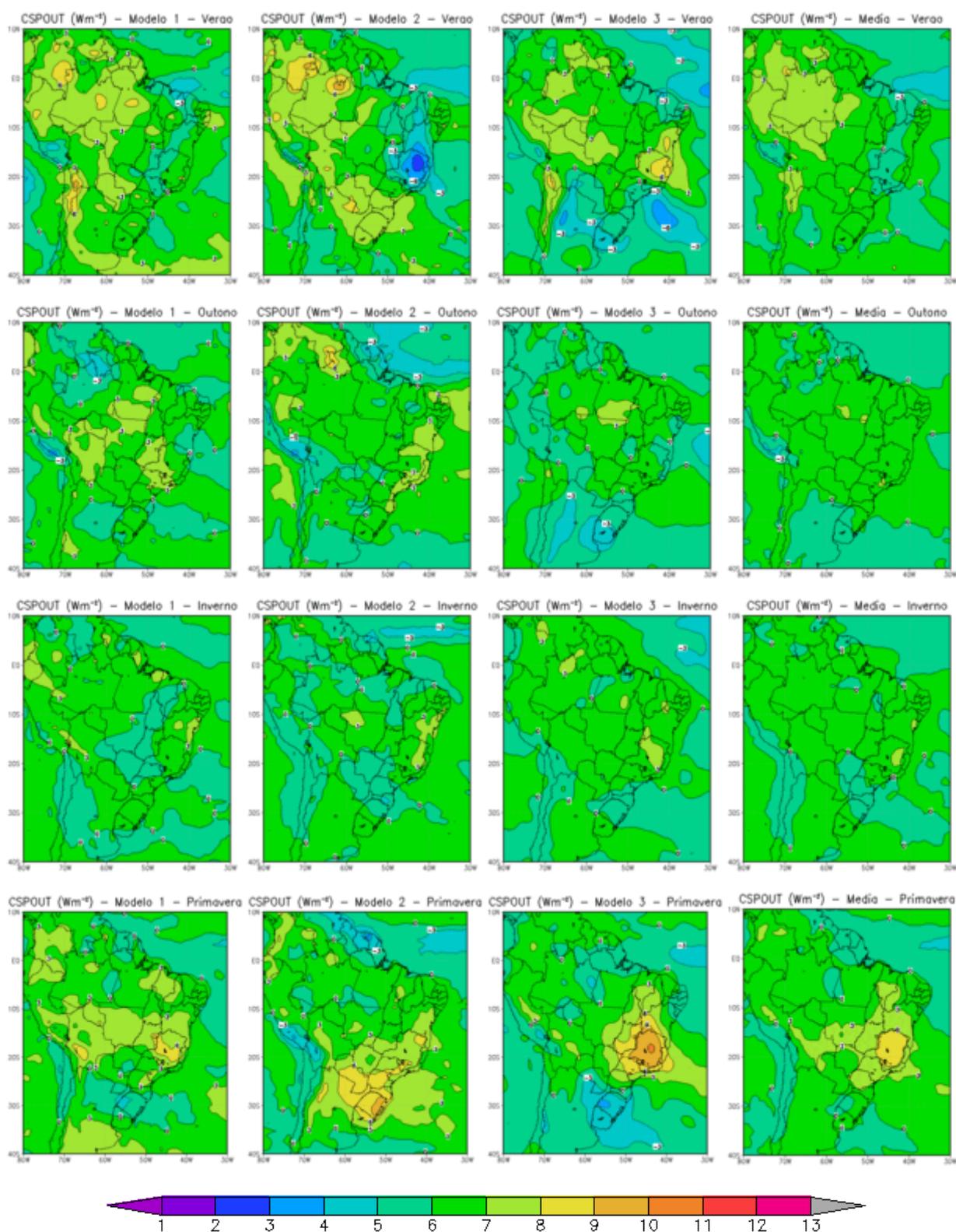


Tabela 6.15 - Anomalia do PVP para o período (2020-2039), cenário SSP5-8.5, CMIP6.

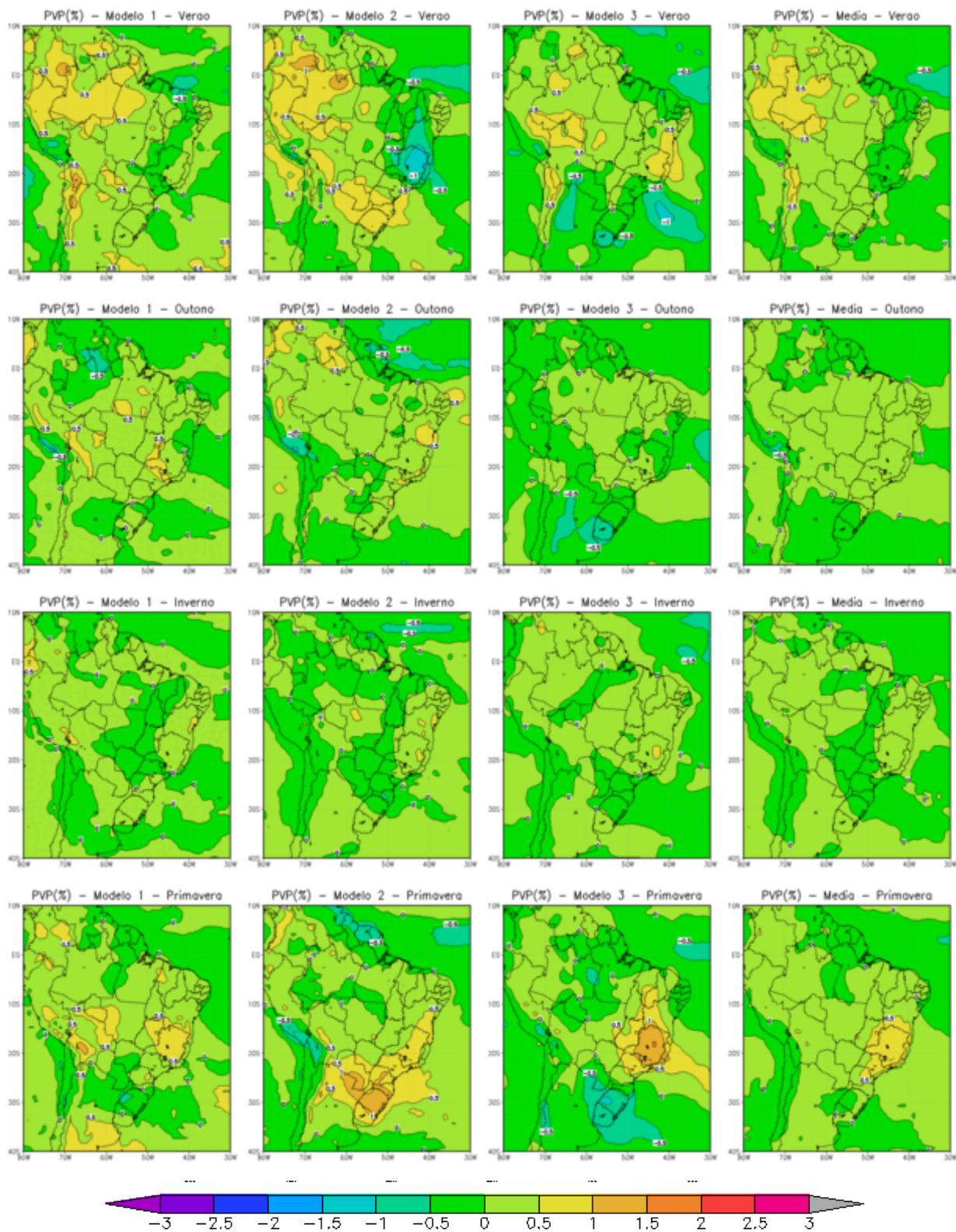


Tabela 6.16 - Anomalia do CSPOUT para o período (2040-2059), cenário SSP5-8.5, CMIP6.

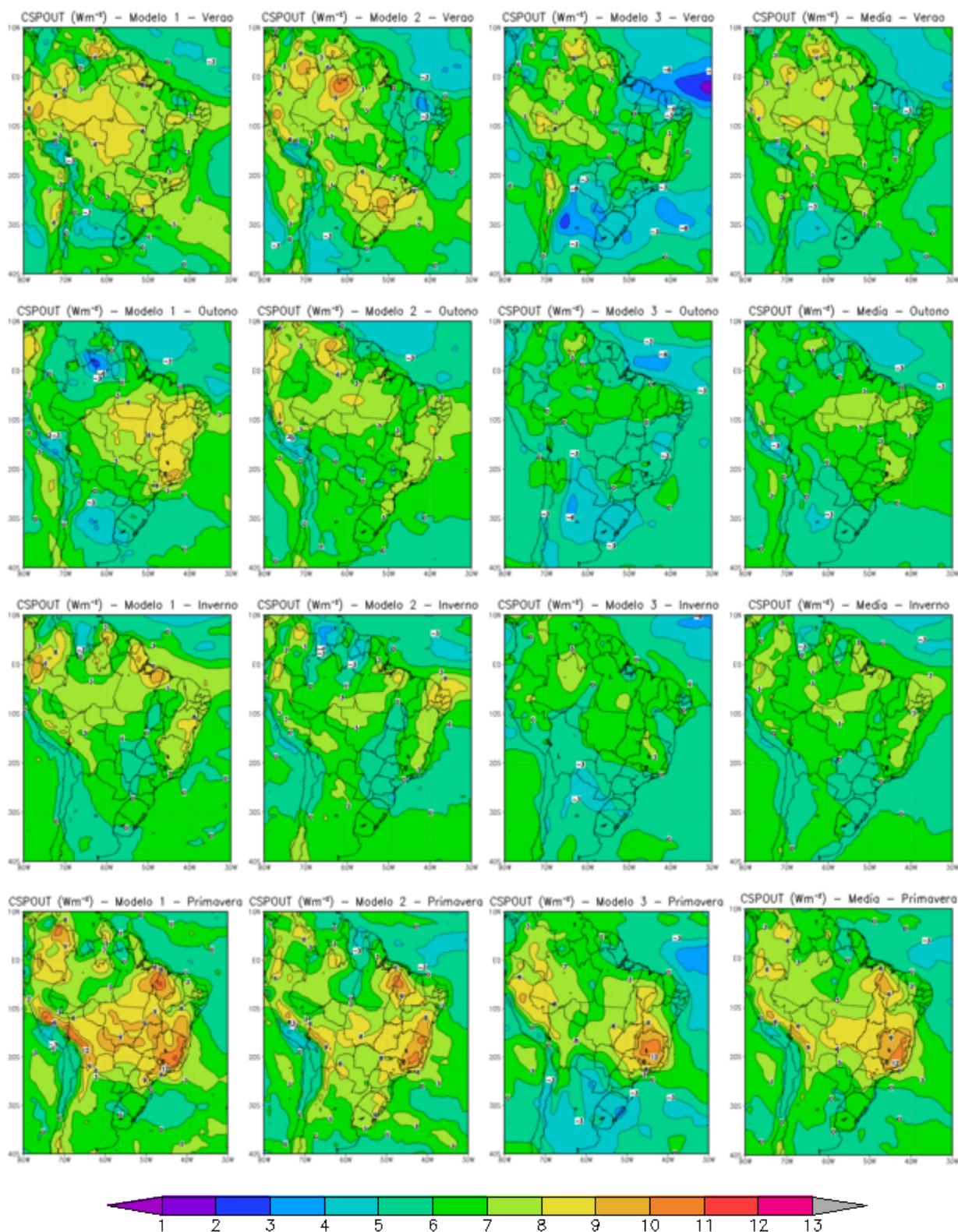


Tabela 6.17 - Anomalia do PVP para o período (2040-2059), cenário SSP5-8.5, CMIP6.

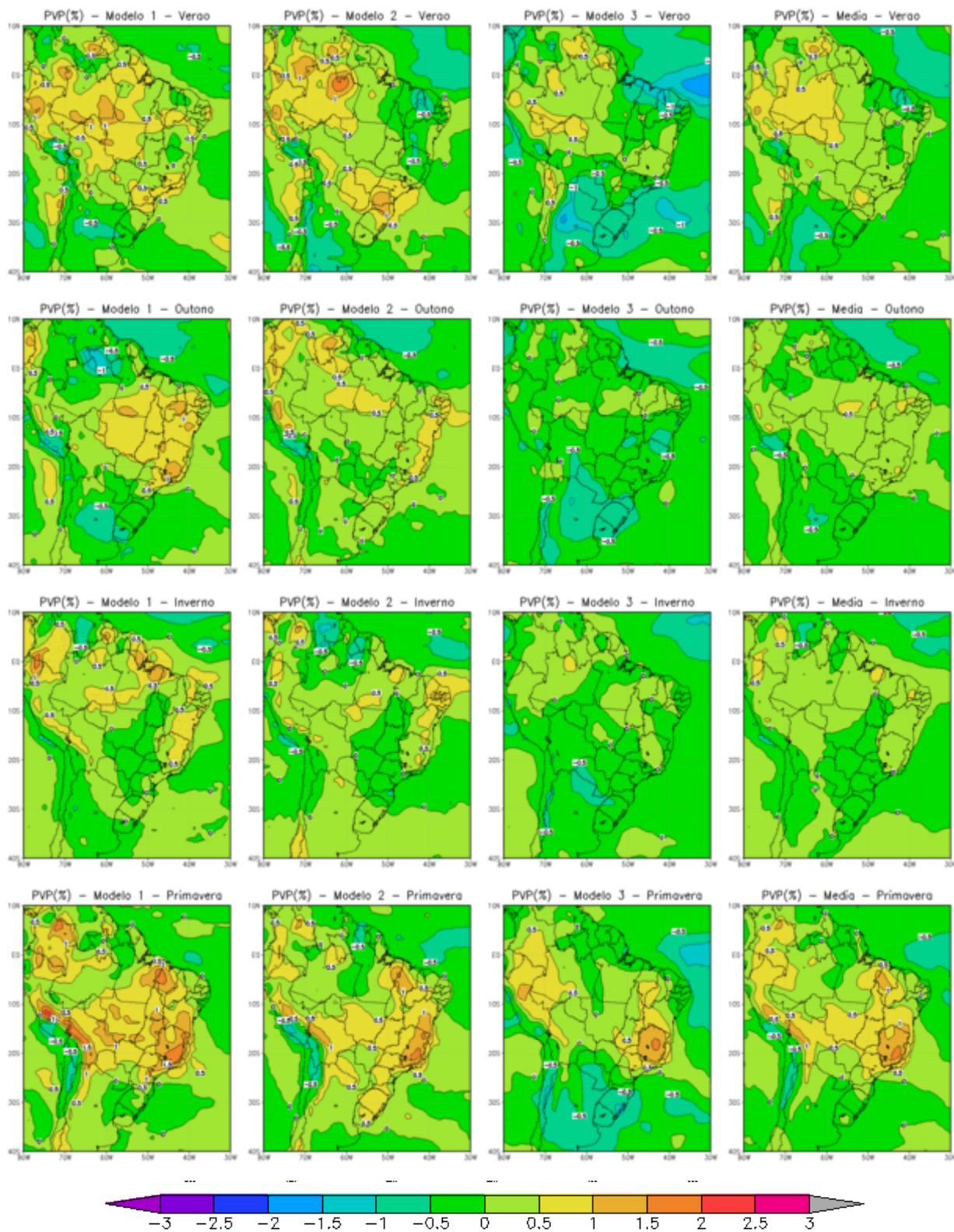


Tabela 6.18 - Anomalia do CSPOUT para o período (2060-2079), cenário SSP5-8.5, CMIP6.

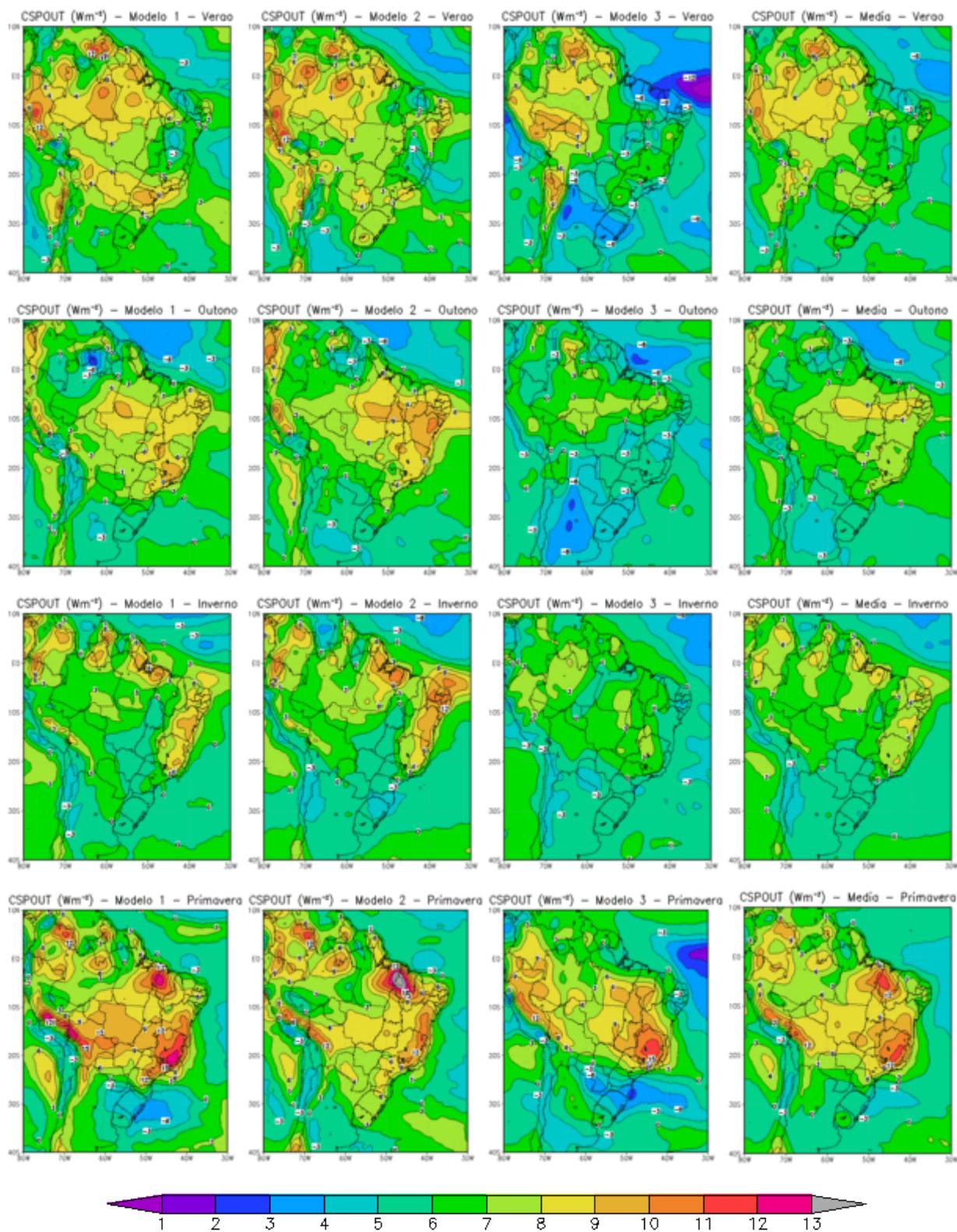


Tabela 6.19 - Anomalia do PVP para o período (2060-2079), cenário SSP5-8.5, CMIP6.

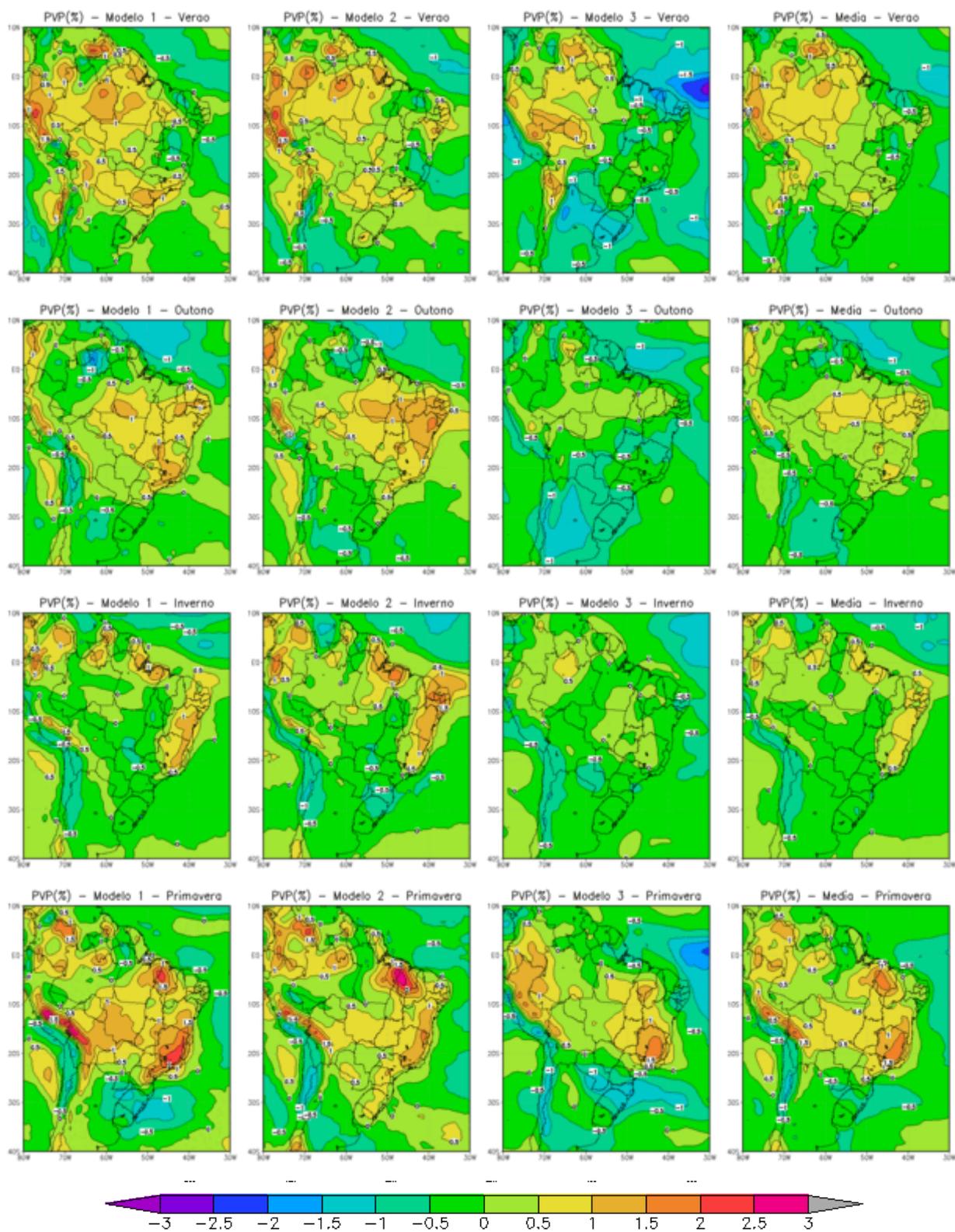


Tabela 6.20 - Anomalia do CSPOUT para o período (2080-2099), cenário SSP5-8.5, CMIP6.

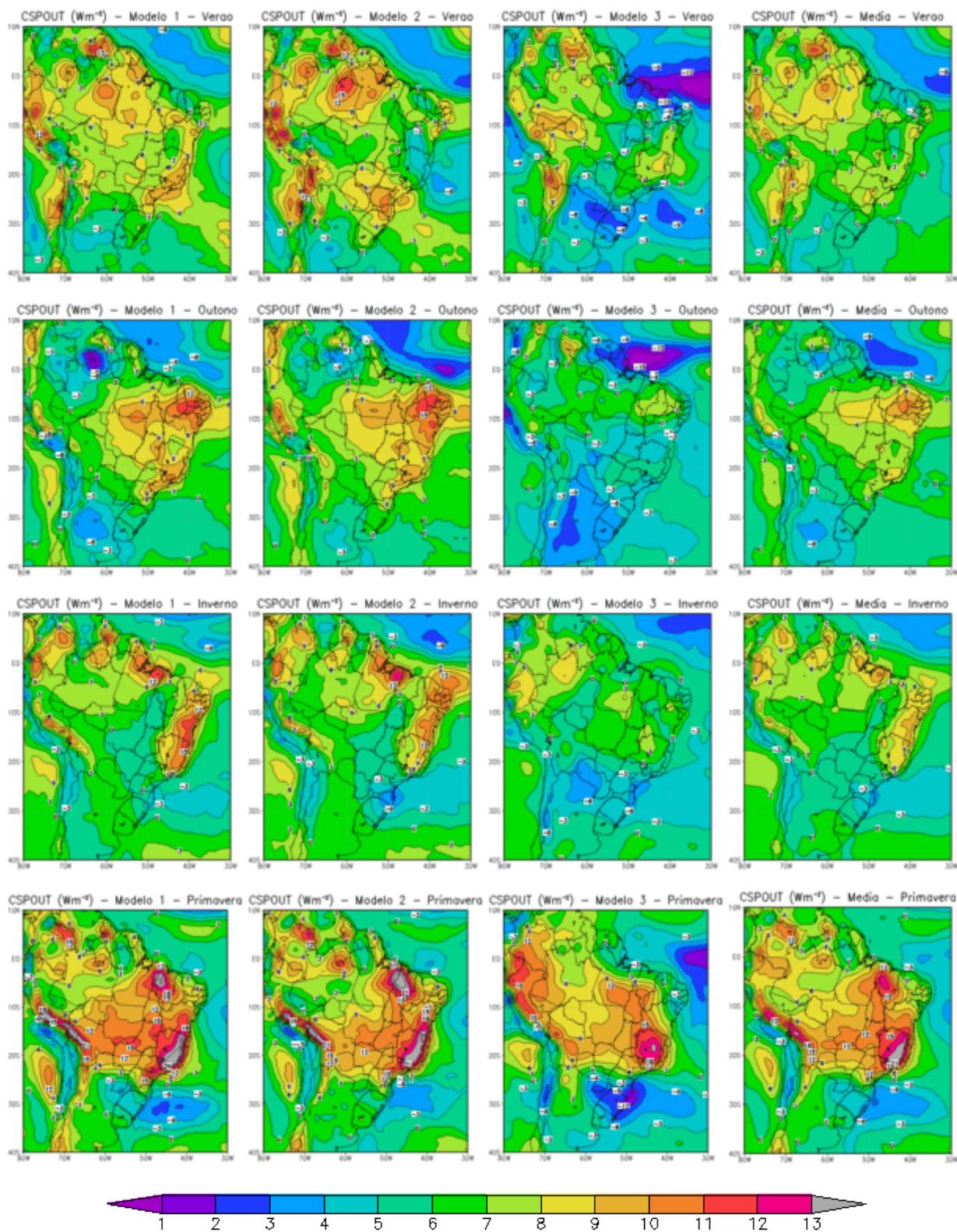
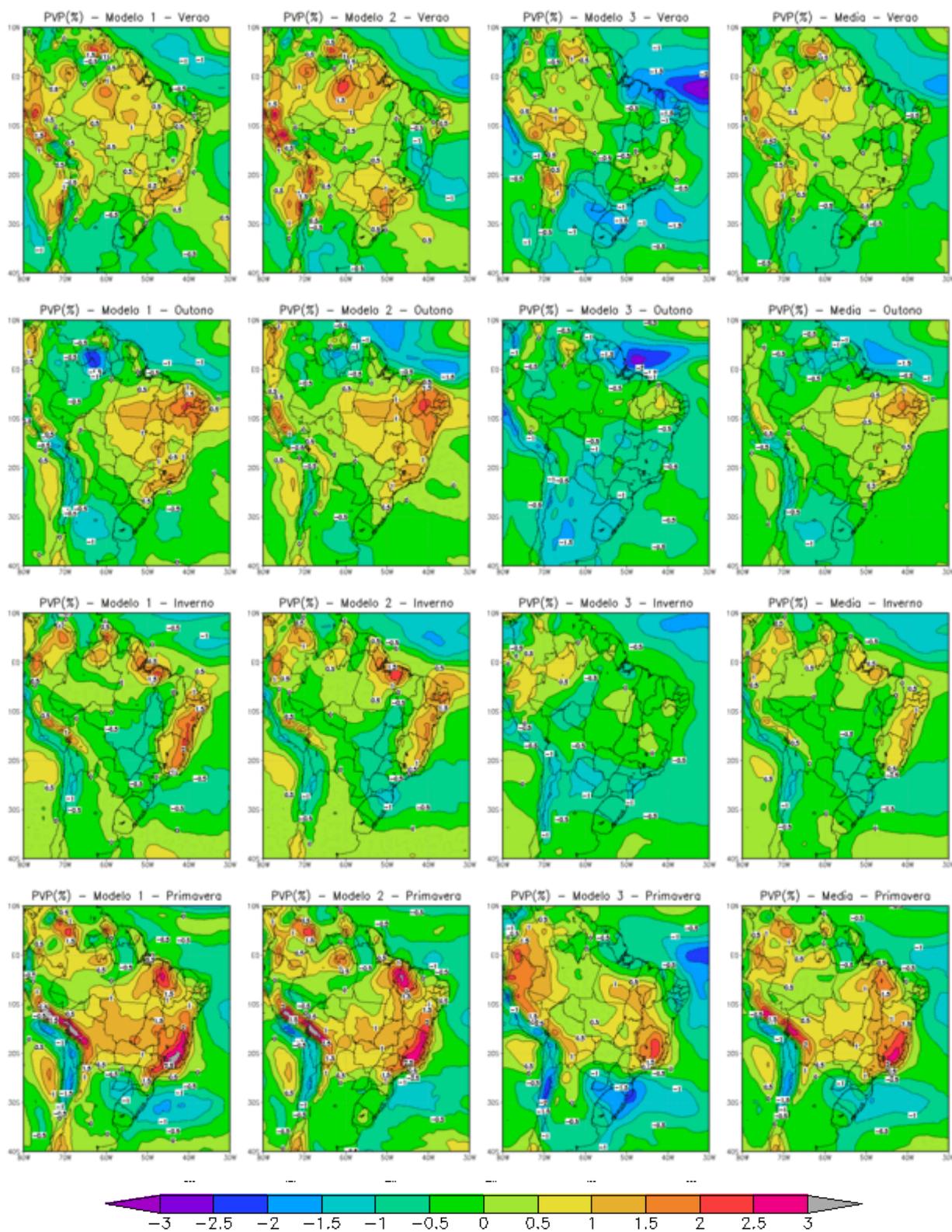


Tabela 6.21 - Anomalia do PVP para o período (2080-2099), cenário SSP5-8.5, CMIP6.



De uma análise conjunta das médias dos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, considerando o SSP5-85 com relação ao SSP2-4.5, ou seja, SSP2-4.5 - SSP5-8.5, tem-se:

– Para o período (2020-2039):

- ✓ Variações no CSPOUT de -2 a 3 W m^{-2} , com predominância de valores positivos ao longo do país. No verão mais significativo no litoral do nordeste e extremo sul do país, com exceção no leste de Minas Gerais, Espírito Santo, e uma pequena área no Amazonas que apresentam valores negativos. No outono, a exceção ocorre em uma área central de Minas Gerais, norte de São Paulo, Amapá, norte do Amazonas e do Pará com valores negativos. No inverno, o centro e sudeste de Minas Gerais, leste de São Paulo e nordeste do Paraná apresentam valores negativos. Na primavera uma pequena região no noroeste de Minas Gerais e outra no leste do Paraná apresentam valores negativos.
- ✓ As variações no PVP são sempre positivas e inferiores a 1%.

– Para o período (2040-2059):

- ✓ Variações no CSPOUT de $\pm 3 \text{ W m}^{-2}$, distribuídos ao longo do país, com predominância negativa na primavera e verão e positiva no inverno e outono. No verão a exceção ocorre em parte do Maranhão, Piauí, todo Ceará, parte oeste do Rio Grande do Norte e Pernambuco e na primavera, do sul do Mato Grosso do Sul, sul de São Paulo e demais estados do sul que apresentam valores positivos. No outono a exceção ocorre em parte da região norte e quase toda Minas Gerais e no inverno, se distribui em parte do litoral do nordeste, sul do Pará e uma pequena área central de Minas Gerais com valores negativos.
- ✓ As variações no PVP são sempre positivas e inferiores a 1%.

– Para o período (2060-2089):

- ✓ Variações no CSPOUT de $\pm 3 \text{ W m}^{-2}$ distribuídas ao longo do país, com predominância de valores negativos ao norte e positivos ao sul. No verão resultam negativo na região norte e negativo no resto do país. No outono, a área negativa diminui e atinge a parte norte do Amazonas, Pará, Roraima e

Amapá e uma pequena área no leste de Minas Gerais e outra em Alagoas. No inverno, a área negativa se reduz mais ainda e se espalha em partes do norte, nordeste e Minas Gerais. Na primavera os valores positivos aparecem abaixo de São Paulo para o sul do país.

- ✓ As variações no PVP são sempre positivas e inferiores a 1%.
- Para o período (2080-2099):
 - ✓ Variações no CSPOUT de -4 a 2 W m^{-2} , distribuídas ao longo do país, com predominância de valores negativos ao norte e positivos ao sul. No verão, outono e primavera resultam positivos após o estado de São Paulo. No inverno, a área negativa se reduz concentrado no norte do Amazonas, Roraima e Amapá e na região litorânea do nordeste.
 - ✓ As variações no PVP são sempre positivas e inferiores a 1%.

Capítulo 7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

“Eu colocaria meu dinheiro no sol e na energia solar. Que fonte de energia! Espero que não tenhamos que esperar até que o petróleo e o carvão acabem para fazer isso.
Thomas Alva Edison, empresário (1847 - 1931)

Com base nas análises efetuadas no item 5.7 e complementando as mesmas têm-se as seguintes conclusões e recomendações com relação aos propósitos deste trabalho:

- A irradiância solar e a temperatura do ar na superfície são parâmetros importantes para análise da tecnologia da potência solar concentrada, denominada CSP, e geralmente a irradiância é o fator mais influente, pois determina a quantidade de energia solar disponível para ser coletada, enquanto a temperatura pode afetar a eficiência da conversão de calor em eletricidade.
- Também influenciam na CSP outros fatores, podendo-se citar: clima e condições meteorológicas, poeira e poluição do ar, umidade atmosférica, topografia, latitude, altitude, vento, etc.
- Para a tecnologia de geração fotovoltaica, denominada PVP, a irradiância solar também é o parâmetro mais influente, seguido pela temperatura do ar e, logo após pela velocidade do vento, sendo que a influência na geração com relação à temperatura e a velocidade do vento dependem do valor da irradiação solar no momento considerado.
- Também influenciam no PVP outros fatores, podendo-se citar: ângulo de incidência solar, orientação solar, sombreamento, reflexão de superfícies próximas, altitude, latitude, poluição atmosférica, etc.
- Recomenda-se ao planejar e implementar projetos das tecnologias CSP e PVP levar em consideração esses fatores físicos e ambientais para garantir a eficiência, a sustentabilidade e o cumprimento das regulamentações ambientais.
- A expressão utilizada para análise do CSP não necessita de nenhuma constante adicional além das variáveis climáticas, sendo utilizado a irradiância solar e a temperatura do ar na superfície.
- Já a tecnologia PVP além das variáveis climáticas, irradiância solar, temperatura

e velocidade do vento são necessárias o conhecimento do tipo de célula fotovoltaica utilizada no empreendimento.

- Os sites específicos de fabricação de células fotovoltaicas brasileiros mostram que os tipos de células fotovoltaicas predominantes no Brasil são as células de silício cristalino e as tecnologias mais comuns utilizadas são as de silício policristalino e monocrystalino
- Outras tecnologias de células fotovoltaicas, como as células de filme fino de diferentes materiais, tais como silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe), seleneto de cobre, índio e gálio (CIS/CIGS), orgânico (OPV) e híbrido (HJT), não são tão comuns no Brasil, mas podem ser encontradas em alguns projetos específicos ou em menor escala.
- Para os valores de irradiância solar e temperatura obtidos nos modelos utilizados neste trabalho a potência CSP para o Brasil, resultam na faixa de zero até 217 W m⁻² e zero até 231 W m⁻², para o menor e maior valor da temperatura do ar, respectivamente.
- Com relação à geração PVP para o Brasil, a influência da temperatura mostrou mais significativa que a influência da velocidade do vento, devido à faixa de valores possíveis para estas grandezas.
- Para o Brasil, os modelos CMCC-CR2-SR5M1 e CMCC-ESM2 apresentaram resultados semelhantes com pouca diferença com o modelo EC-Earth3 e com isso a média desses modelos foi usada para as análises posteriores.
- Como era de se esperar, as gerações CSP e PVP diminuem ao longo do ano do verão até o inverno para voltar a crescer na primavera.
- As variações nessas grandezas ao longo das estações, de um modo geral, são mais significativas nas regiões norte e nordeste, seguidos pelo sudeste e menor na região sul.
- Comparando a geração CSP obtido com os dados do ERA5 com o obtido da média dos modelos CMIP6, para o período histórico, tem-se que no verão o ERA5 apresentou os maiores valores e nas demais estações o CMIP6, com distribuição semelhante ao longo do país.
- Para a geração PVP o comportamento é semelhante, no verão o ERA5

apresentou os maiores valores, praticamente em todo país e nas demais estações o ERA5 apresentou maiores valores do centro para o sul do Brasil e o CMIP6 do centro para o norte.

- Não há uma variação uniforme e distribuída ao longo do Brasil e durante as estações do ano, da anomalia do CSP e do PVP, com relação ao período histórico, ao se passar de um período de análise ((2020-2039), (2040-2059), (2060-2079), (2080-2099)) para o outro nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.
- A mesma situação é verificada ao comparar o CSP e o PVP do cenário SSP2-4.5 com o do cenário SSP5-8.5.
- Neste caso chega-se a observar diferenças de $\pm 3 \text{ W m}^{-2}$ na anomalia do CSP e de até -1% na anomalia do PVP.
- No Brasil, em 2023, a energia solar fotovoltaica ultrapassou a marca de 35 GW, representando mais de 15% da matriz elétrica brasileira e ocupando a segunda posição em tecnologia de geração de energia elétrica do país.
- Até 2030 é possível instalar mais 46 GW de energia solar centralizada, não tendo previsão para o final do século.
- As mudanças climáticas mostram, em média, variações de $\pm 1\%$ no potencial de geração fotovoltaica até 2100, o que atualmente significa metade de uma máquina de Itaipu.
- Apesar de tudo isso a geração CSP e PVP desempenham um papel crucial na resposta do Brasil às mudanças climáticas, pois oferecem uma fonte de energia limpa, abundante e resiliente que pode contribuir significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, o desenvolvimento econômico sustentável e a garantia de acesso à energia em todo o país, ajudando a moldar um futuro mais sustentável e resiliente às mudanças climáticas.
- Os cenários climáticos SSP2-4.5 e SSP5-8.5 representam diferentes trajetórias de emissões de gases de efeito estufa e, portanto, diferentes níveis de aquecimento global e mudanças climáticas ao longo do século.
- Tanto no cenário SSP2-4.5, que corresponde a uma sustentabilidade média ou no cenário SSP5-8.5, um caminho de altas emissões, a geração solar, tanto CSP quanto PVP, continuam sendo uma fonte de energia renovável valiosa para o

Brasil.

- Para minimizar os riscos e maximizar os benefícios da energia solar, recomendasse ao Brasil adotar estratégias de adaptação e mitigação das mudanças climáticas, investir em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias solares avançadas e implementar políticas que incentivem a transição para fontes de energia limpa, independentemente do cenário climático que se materialize.

Capítulo 8 - REFERÊNCIAS

“Ensinar não é transferir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua própria produção ou a sua construção.”
Paulo Reglus Neves Freire, educador e filósofo (1921 - 1997)

A Description of RAMS. *RAMS*. Disponível em:

<https://rams.atmos.colostate.edu/rams-description.html>. Acesso em: 05/05/2023.

ABBASS, K. *et al.* *A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures*. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, p. 42539-42559, 4 abr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>

About CODATA. *CODATA*. Disponível em: <https://codata.org/about-codata/>. Acesso em: 12/07/2023.

ADAMS, W. G.; DAY, R. E. *The action of light on selenium*. *Proceedings of the Royal Society of London*, v. 25, n. 171-178, p. 113-117, 31 dez. 1877. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstl.1877.0009>.

AFRICA, T. W. *Archimedes through the Looking-Glass*. *The Classical World*, v. 68, n. 5, p. 305, 1975. DOI: <https://doi.org/10.2307/4348211>

ARISTAZÁBAL, C. F. Z. *Solar radiation in Brazil: observations, historical simulations, projections and applications*, 2021. 98 pág. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa.

ARNETT, J. C. *et al.* *Design, installation and performance of the ARCO Solar one-megawatt power plant*. *Proceedings of the Fifth International Conference, Athens, Greece. EC Photovoltaic Solar Energy Conference*: 314. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1984pvse.conf..314A>. Acesso em: 03/06/2023.

ASTM E490-00a(2006). *Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables*. Disponível em: <https://www.patarnott.com/atms749/pdf/SolarConstantZeroAirMass.pdf>. Acesso em: 26/07/2023.

Astronomical unit. *Wikipedia*. Disponível em:

https://en.wikipedia.org/wiki/Astronomical_unit. Acesso em: 03/08/2023.

AWAN, A. B. *et al.* *Commercial parabolic trough CSP plants: Research trends and technological advancements*. *Solar Energy*, v. 211, p. 1422-1458, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.072>.

BALAJI, V. *et al.* *Requirements for a global data infrastructure in support of CMIP6. Geoscientific Model Development*, v. 11, n. 9, p. 3659-3680, 11 set. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-3659-2018>.

BARROZO, P. *Atenuação da Radiação. Aula 5*. Disponível em:

https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/15111915102012Laboratorio_de_Mecanica_Quantica_e_de_Fisica_Nuclear_Aula_5.pdf Acesso em: 03/06/2023

Basic Radiometric Quantities. *Gigahertz Optik*. Disponível em: <https://light-measurement.com/basic-radiometric-quantities/>. Acesso em: 16/08/2023.

BECQUEREL, A. E. *Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumiere solaire au moyen des courants electriques*, *Comptes Rendus de L'Academie des Sciences*, vol. 9, pp. 145-149, 1839. Disponível em: https://www.becquerel-prize.org/pdf/2020_02_10_History_PV_BECQUEREL_prize.pdf. Acesso em: 12/07/2023.

BICHET, A. *et al. Potential impact of climate change on solar resource in Africa for photovoltaic energy: analyses from CORDEX-AFRICA climate experiments*. *Environmental Research Letters*, v. 14, n. 12, p. 124039, 6 dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab500a>.

BIRD, R.; HULSTROM, R. L. *Direct Insolation Models*. Solar Energy Research Institute. U.S. Department of Energy. Janeiro 1980. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/5626683>. Acesso em: 03/08/2023.

BJERKNES, V. *The problem of weather prediction, considered from the viewpoints of mechanics and physics*. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 18, n. 6, p. 663-667, 1 dez. 2009 (reprint). DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2009/416>.

Black body radiation and color temperature. *giangrandi.ch*. Disponível em: <https://www.giangrandi.ch/optics/blackbody/blackbody.shtml>. Acesso em: 03/06/2023.

Brasil atinge 32 GW de capacidade instalada em energia solar fotovoltaica. *Absolar*. 19/07/2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/brasil-atinge-32-gw-de-capacidade-instalada-em-energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 16/08/2023

BORVON, G. overblog. *Edmond Becquerel et la découverte de l'effet photovoltaïque*. 07/12/2020. Disponível em: <http://histoires-de-sciences.over-blog.fr/2020/12/edmond-becquerel-et-la-decouverte-de-l-effet-photovoltaique.html>. Acesso em: 26/07/2023.

Capacidade de energia solar no Brasil deve crescer 42% em 2023, a 34 GW, prevê Absolar. *Absolar*. 2022. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/capacidade-de-energia-solar-no-brasil-deve-crescer-42-em-2023-a-34-gw-preve-absolar/>. Acesso em: 16/08/2023.

CASARIN, R. *Ranking lista os 10 fabricantes com maior volume de módulos embarcados em 2022*. Portal Solar. 19/04/2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/internacional/ranking-lista-os-10-fabricantes-com-maior-volume-de-modulos-embarcados-em-2022>. Acesso em: 20 ago. 2023.

CASARIN, R. *Energia solar supera 35 GW de capacidade instalada no Brasil*, Portal Solar, 07/11/2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/operacao-e-expansao/oem/energia-solar-supera-35-gw-de-capacidade-instalada-no-brasil>. Acesso em 12/11/2023.

CHAPIM D.M., FULLER C.S., PEARSON, G.L., *Solar Energy Converting Apparatus*. Patente dos EUA nº 2.780.765. 5 de fevereiro de 1957. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/36/ee/af/d21dacd3884160/US2780765.pdf>. Acesso em: 03/06/2023.

Charles Greeley Abbot, 1872-1973. *Smithsonian Institution Archives*. Disponível em: <https://siarchives.si.edu/history/charles-greely-abbot>. Acesso em: 03/08/2023.

CHENNI, R. *et al.* *A detailed modeling method for photovoltaic cells*. *Energy*, v. 32, n. 9, p. 1724-1730, set. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.12.006>.

CHERCHI A *et al.* *Global mean climate and main patterns of variability in the CMCC-CM2 coupled model*. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13 dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018MS001369>

CHU, E.; TARAZANO, L. *A Brief History of Solar Panels*. *Smithsonian Magazine*. Disponível em: <https://www.smithsonianmag.com/sponsored/brief-history-solar-panels-180972006/>. Consultado em: 16/08/2023.

Climate change impacts. *NOAA*. 2021. Disponível em: <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/climate/climate-change-impacts>. Acesso em: 03/06/2023.

CMCC-ESM. *Earth System Model*. Disponível em: <https://www.cmcc.it/models/cmcc-esm-earth-system-model>. Acesso em: 20/08/2023.

CMIP6 climate projections. Copernicus Climate Data Store. *Copernicus*. Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip6?tab=overview>. Acesso em: 26/07/2023.

CODATA RECOMMENDED VALUES OF THE FUNDAMENTAL PHYSICAL CONSTANTS: 2018. *National Institute of Standards and Technology*. Disponível em: https://physics.nist.gov/cuu/pdf/wall_2018.pdf. Acesso em: 03/06/2023.

Community Earth System Model - CESM®. *NCAR CGD*. Disponível em: <https://www.cesm.ucar.edu/>. Acesso em: 03/08/2023.

Compact Linear Fresnel Reflectors. *SolarTechAdvisor*. 2022. Disponível em: <https://solartechadvisor.com/clfr>. Acesso em: 16/08/2023.

Concentrated solar power. *Wikipedia* Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated_solar_power. Acesso em: 16/08/2023.

Consequences of climate change. *European Commission*. Disponível em: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_en. Acesso em: 03/06/2023.

Consortium for Small-scale Modeling. *Cosmo*. Disponível em: <https://www.cosmo-model.org/>. Acesso em: 26/07/2023.

Copernicus Climate Data Store. *Copernicus Climate Data Store*. Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/#>. Acesso em: 21/08/2023.

CREPEAU, J. *A Brief History of the T⁴ Radiation Law. Volume 1: Heat Transfer in Energy Systems; Thermophysical Properties; Heat Transfer Equipment; Heat Transfer in Electronic Equipment*. *Proceedings of the ASME 2009 Heat Transfer Summer Conference, HT2009, July 19-23, 2009, San Francisco, California, EUA*. DOI: <https://doi.org/10.1115/HT2009-88060>.

CROOK, J. A. *et al.* *Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output*. *Energy & Environmental Science*, v. 4, n. 9, p. 3101, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1039/C1EE01495A>

CUNHA, G. *Meteorologia - Fatos & Mitos*. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1997. 268p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/819619/1/ID78501997LVFatosMitos1.pdf>. Acesso em: 03/08/2023.

DALTON, J. *Meteorological Observations and Essays* (Classic Reprint). Forgotten Books, 2018. 232 p.

DEARDORFF, J. W. *Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation*. Journal of Geophysical Research, v. 83, n. C4, p. 1889, 1978. DOI: <https://doi.org/10.1029/JC083iC04p01889>.

Decode urban nature. Disponível em: <https://www.envi-met.com/wp-content/uploads/2021/08/ENVI-met-brochure.pdf>. Acesso em: 16/08/2023.

DOVE, H. W. *Meteorologische Untersuchungen*. Wentworth Press, 2018. 344 p.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, 4th edition, 2013. 944 p.

DUNCAN, C. H. *et al.* *Latest rocket measurements of the solar constant*. Solar Energy, v. 28, n. 5, p. 385-387, 1982. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90256-0](https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90256-0)

DUTTA, R.; CHANDA, K.; MAITY, R. *Future of solar energy potential in a changing climate across the world: A CMIP6 multi-model ensemble analysis*. Renewable Energy, v. 188, p. 819-829, abr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.023>.

DWIVEDI, P. *et al.* *Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art*. Case Studies in Thermal Engineering, v. 21, 100674, 1 out. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100674>.

DYSON, F. W.; EDDINGTON, A. S.; DAVIDSON, C. *A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919*. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 220, n. 571-581, p. 291-333, 1 jan. 1920. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.1920.0009>

Early Solar History. Disponível em: http://solarcellcentral.com/history_page.html. Acesso em: 26/07/2023.

EC-Earth. *EC-Earth a Global Climate Model*. Disponível em: <<https://ec-earth.org>>. Acesso em: 20/08/ 2023.

Edmond Becquerel. *Wikipedia*. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Edmond_Becquerel. Acesso em 03/06/203.

EDWARDS, J. M.; SLINGO, A. *Studies with a flexible new radiation code. I: Choosing a configuration for a large-scale model*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 122, n. 531, p. 689-719, abr. 1996. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.49712253107>.

EDWARDS, P. N. *History of climate modeling*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 2, n. 1, p. 128-139, 23 dez. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.95>.

e-ILV. *CIE*. Disponível em: <https://cie.co.at/e-ilv>. Acesso em: 16/08/2023.

EMILIO, M. *et al.* *Measuring the Solar Radius from Space During the 2003 and 2006 Mercury transits*. The Astrophysical Journal, v. 750, n. 2, p. 135, 24 abr. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/750/2/135>.

ESGF-CEDA - Home. *ESGF-CoG*. Disponível em: <https://esgf-index1.ceda.ac.uk/projects/esgf-ceda/>. Acesso em: 21/08/2023.

Estatística da Radiação - Lei de Planck. *Moodle USP: e-Disciplinas*. 2016.

Disponível em:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1253076/mod_resource/content/3/estat%C3%ADstica%20de%20Planck.pdf. Acesso em: 26/07/2023.

EVANS, D. L. *Simplified method for predicting photovoltaic array output*. *Solar Energy*, v. 27, n. 6, p. 555-560, 1981. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(81\)90051-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90051-7).

EVANS, D. L.; FLORSCHUETZ, L. W. *Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration*. *Solar Energy*, v. 19, n. 3, p. 255-262, 1977. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(77\)90068-8](https://doi.org/10.1016/0038-092X(77)90068-8).

EYRING, V. *et al.* *Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization*. *Geoscientific Model Development*, v. 9, n. 5, p. 1937-1958, 26 maio 2016. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.

FAIZAN, O. M. *Microwave Radiometry*. 10.13140/RG.2.2.14759.37280. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/347981826_Microwave_Radiometry. Acesso em: 03/06/2023.y

FERON, S. *et al.* *Climate change extremes and photovoltaic power output*. *Nature Sustainability*, v. 4, n. 3, p. 270-276, 16 nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00643-w>.

FERREIRA, A. *et al.* *Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 181-191, jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.102>.

FERREL, W. *An essay on the winds and the currents of the ocean*. The Perfect Library. Createspace Independent Publishing Platform, 2015. 28 p. Disponível em: https://en.wikisource.org/wiki/An_essay_on_the_winds_and_the_currents_of_the_ocean. Acesso em: 03/08/2023.

First photovoltaic Devices. *PVEducation*. Disponível em:

<https://www.pveducation.org/pvcdrom/manufacturing-si-cells/first-photovoltaic-devices>. Acesso em: 03/06/2023.

FLORSCHUETZ, L. W. *Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors*. *Solar Energy*, v. 22, n. 4, p. 361-366, 1979. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90190-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90190-7).

FRATE, C. A.; BRANNSTROM, C. *Stakeholder subjectivities regarding barriers and drivers to the introduction of utility-scale solar photovoltaic power in Brazil*. *Energy Policy*, v. 111, p. 346-352, dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.048>.

FREIRE, W., "Solar deverá ser a maior fonte de energia do Brasil até 2040". Canal Solar, 29/08/2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/solar-devera-ser-a-maior-fonte-de-energia-do-brasil-ate-2040/>. Acesso em 12/11/2023.

GATES, W. L. *An AMS Continuing Series: Global Change*. AMIP: The Atmospheric Model Intercomparison Project. v. 73, n. 12, p. 1962-1970, 1 dez. 1992. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1992\)0731962:ATAMIP2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1992)0731962:ATAMIP2.0.CO;2).

Gerald Meehl. *NCAR/UCAR*. Disponível em: <https://www2.cgd.ucar.edu/staff/meehl/>. Acesso em: 16/08/2023.

GISS GCM ModelE. *NASA*. Disponível em: <https://www.giss.nasa.gov/tools/modelE/>. Acesso em: 26/07/2023.

Global Climate Model, CM3. *GSFL*. Disponível em: <https://www.gfdl.noaa.gov/coupled-physical-model-cm3/>. Acesso em: 16/08/2023.

GUEYMARD, C. A. *A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations*. *Solar Energy*, v. 168, p. 2-9, jul. 2018. DOI. 1016/j.solener.2018.04.001.

GURNEY, R. J.; FOSTER, J. L.; PARKINSON, C. L. *Atlas of satellite observations related to global change*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 1993. 484 p.

Gustav Kirchhoff (1824-1887). *NCAR*. High Altitude Observatory. Disponível em: <https://www2.hao.ucar.edu/education/scientists/gustav-kirchhoff-1824-1887>. Acesso em: 03/06/2023.

HA, S. *et al. Comparative assessment of future solar power potential based on CMIP5 and CMIP6 multi-model ensembles*. *Renewable Energy*, Elsevier, vol. 206(C), pages 324-335, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.039>.

HadGEM3 family: Met Office climate prediction model. *Met Office*. Disponível em: <https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadgem3>. Acesso em: 26/07/2023

Hadley cell. *Wikipedia* Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Hadley_cell. Acesso em: 26/07/2023.

HADLEY G. VI. *Concerning the cause of the general tradewinds*. *Philos Trans R Soc Lond* 1735, 39:58-62.. Concerning the cause of the general trade-winds. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 39, n. 437, p. 58-62, 31 dez. 1735. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstl.1735.0014>.

HALLEY, E. *An historical account of the trade winds, and monsoons, observable in the seas between and near the Tropicks, with an attempt to assign the physical cause of the said winds*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 16, n. 183, p. 153-168, set. 1686. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstl.1686.0026>.

HAMILTON, C.J. *O Sol*. Traduzido por Kepler Oliveira. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/ast/solar/portug/sun.htm>. Acesso em 03/06/2023.

HEIN, H. *“Brasil será 5º maior mercado de energia solar do mundo em menos de 10 anos”*, Canal Solar, 16/10/2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/brasil-sera-5o-maior-mercado-de-energia-solar-do-mundo-em-menos-de-10-anos/>. Acesso em 12/11/2023.

HETEM, J. C. G. *Classificação Estelar: As Estrelas não são Iguais. Tópico 2*. Grupo Apoio Técnico-Pedagógico, Licenciatura em Ciências - USP/Univesp, Disponível em: https://midia.atp.usp.br/impressos/lic/modulo01/estrelas_PLC0006/Estrelas_top02.pdf. Acesso em: 4 ago. 2023.

HEYMANN, M. *The climate change dilemma: big science, the globalizing of climate and the loss of the human scale*. *Regional Environmental Change*, 29 jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1373-z>.

HICKEY, J. R. *et al.* *Extraterrestrial solar irradiance variability two and one-half years of measurements from Nimbus 7*. v. 29, n. 2, p. 125-127, 1 jan. 1982. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90173-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90173-6).

Home ICTP. *ICPT*. Disponível em: <https://www.ictp.it/>. Acesso em: 03/08/2023.

HORROCKS, J. *Oxford Reference. A Dictionary of Scientists*. Disponível em: <https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/oi/authority.20110803095945430>. Acesso em: 26/07/2023.

HOU, X. *et al.* *Climate change impacts on solar power generation and its spatial variability in Europe based on CMIP6*. *Earth System Dynamics*, v. 12, n. 4, p. 1099-1113, 9 nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.5194/esd-12-1099-2021>.

How Other Forms of Energy from Sunshine May Affect Our Health. *GrassrootsHealth Nutrient Research Institute*. Disponível em: <https://www.grassrootshealth.net/blog/forms-energy-sunshine-may-affect-health/>. Acesso em: 03/06/2023

HUANG, W.; LIU, B. *Solar Position Algorithm Based on the Kepler Equation*. *Applied Sciences*, v. 12, n. 11, p. 5449, 27 maio 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12115449>.

IAU, International Astronomical Union. *RESOLUTION B2 - on the re-definition of the astronomical unit of length*. 2012. Disponível em: https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2012_English.pdf. Acesso em: 16/08/2023.

IAU, International Astronomical Union. *XVIth General Assembly, Grenoble, France, 1976*. Disponível em: https://www.iau.org/static/resolutions/IAU1976_French.pdf. Acesso em: 03/06/2023.

Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC*. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 26/07/2023.

Introduction to climate dynamics and climate modelling - Cloud feedback. *UCL*. Disponível em: https://www.climate.be/textbook/chapter4_node8.html. Acesso em: 03/08/2023.

Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC*. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 22/06/2023

ISO 14222. *Space environment (natural and artificial) - Earth upper atmosphere. International Organization for Standardization*. 2022. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/77492/2a419e0d8e2f4b83abcf86868b66f38/ISO-14222-2022.pdf>. Acesso em: 03/06/2023.

IVANOVA, D. P. *linkedin*. Disponível em: <https://www.linkedin.com/in/detelinaivanova>. Acesso em: 03/06/2023.

JANNUZZI, G. DE M.; DE MELO, C. A. *Grid-connected photovoltaic in Brazil: Policies and potential impacts for 2030*. *Energy for Sustainable Development*, v. 17, n. 1, p. 40-46, fev. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.10.010>.

JEREZ, S. *et al.* *The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe*. *Nature Communications*, v. 6, n. 1, dez. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms10014>.

John Henry Poynting. *Wikipedia*. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/John_Henry_Poynting. Acesso em: 03/06/2023.

- KALOGIROU S. A. *Semantic Scholar - An academic search engine for scientific articles*. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Solar-thermal-collectors-and-applications-Kalogirou/5b80c8ef5d09676f20274fe440fa66002318a41b>. Acesso em: 26/07/2023.
- KALOGIROU, S. A. *Solar thermal collectors and applications*. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 30, n. 3, p. 231-295, jan. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>.
- Karl E. Taylor. *SCISPACE*. Lawrence Livermore National Laboratory Disponível em: <https://typeset.io/authors/karl-e-taylor-4pbk9q87px>. Acesso em: 22/06/2023.
- KIDWELL, P. A. *Prelude to solar energy: Pouillet, Herschel, Forbes and the solar constant*. *Annals of Science*, 38:4, 457-476, 1981. DOI: <https://doi.org/10.1080/00033798100200321>.
- KING, D. L.; KRATOCHVIL, J. A.; BOYSON, W. E. *Field experience with a new performance characterization procedure for photovoltaic arrays*. *Procedure for Photovoltaic Arrays. 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, 6-10 July 1998*. Disponível em: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc692790/m2/1/high_res_d/629484.pdf. Acesso em: 16/08/2023.
- KOCH, H. *et al. The impact of climate change and variability on the generation of electrical power*. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 24, n. 2, p. 173-188, 13 abr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1127/metz/2015/0530>,
- KUMAR, G.; GUPTA, H. *A Study of Linear Fresnel Solar Collector Reflector Field for Performance Improvement*. In book: *Recent Advances in Mechanical Infrastructure, Proceedings of ICRAM 2020* (pp.353-371). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4176-0>.
- LIMA, C.R.A. *Tópicos de Laboratório de Física Moderna*. 2013. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/fisica/files/2010/03/Labfismodroteiro.pdf>. Acesso em: 03/08/2023
- LINDSEY, R. *Climate Change: Incoming Sunlight*. NOAA Climate.gov. 2009. Disponível em: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-incoming-sunlight>. Acesso em: 22/06/2023.
- List of photovoltaic power stations. *Wikipedia* 2019. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_photovoltaic_power_stations. Acesso em: 26/07/2023.
- LODI, C. *Perspectivas para a Geração de Energia Elétrica no Brasil Utilizando a Tecnologia Solar Térmica Concentrada*. 2011. 142 pag. Dissertação de Mestrado - Programa de Planejamento Energético, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: http://antigo.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/cristiane_lodi.pdf. Acesso em: 16/08/2023;
- LOVATO, T., PEANO, D., 2020. *CMCC CMCC-CM2-SR5 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20200616*. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3825>
- MARQUES, G. dos S.; PIMENTEL, P. E. O.; VIANNA, J. N. de S. *The role of solar energy in mitigation and adaptation to climate change: perspectives for Brazil 2030*.

Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 3, p. 13039-13059, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-242>.

Marshall Solar Physics. NASA. 2015, Disponível em: <https://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml>. Acesso em: 16/08/2023.

MARTIN, N.; RUIZ, J. M. *Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model*. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 70, n. 1, p. 25-38, dez. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00408-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00408-6).

MAVROMATAKIS, F. *et al. Modeling the photovoltaic potential of a site*. Renewable Energy, v. 35, n. 7, p. 1387-1390, jul. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.010>.

MCGUFFIE, K. *Hystory of climate model. 986-1 WCRP and ICTP Interpreting Climate Change Simulations: Capacity Building for Developing Nations Seminar, 2007*. Disponível em: <https://indico.ictp.it/event/a07125/session/4/contribution/3/material/0/0.pdf>. Acesso em: 26/07/2023.

MEEUS, J. *More mathematical astronomical morsels*. Willmann-Bell, 2002. 429 p.

Meteociel - Modèle Numérique AROME Meteo-France pour la France. *Meteociel.fr*. Disponível em: <https://www.meteociel.fr/modeles/arome.php>. Acesso em: 22/06/2023.

MFONGANG E. A. *et al. Potential impacts of climate change on global solar radiation and PV output using the CMIP6 model in West Africa*. Cleaner Engineering and Technology, v. 13, 100630, 1 abr. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100630>.

NOAA Launches First National Rip Current Forecast Model. NOAA. Disponível em: <https://oceanservice.noaa.gov/news/apr21/rip-current-forecast.html>. Acesso em: 16/08/2023.

Nobel Prize in Physics 2021. *Lindau Nobel Laureat Meetings*. 5 de outubro de 2021. Disponível em: <https://www.lindau-nobel.org/nobel-prize-in-physics-2021/>. Acesso em: 26/07/2023.

NUNES, C. R. P. *Climate Change and the Challenges of Aneel to Review the Brazilian Regulatory Regulation of Solar Energy Self-Production and Distribution*. Arel Faar - Amazon's Research and Environmental Law, v. 10, n. 2, p. 70-85, 2023. Disponível em <https://www.faar.edu.br/portal/revistas/ojs/index.php/arel-faar/article/view/437/314>. Acesso em 22/06/2023.

O'GORMAN, P. A. *Precipitation Extremes Under Climate Change*. Current Climate Change Reports, v. 1, n. 2, p. 49-59, 22 abr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0009-3>.

OSMANBASIC, E. *engineering.com*. 2019. *Challenges of Making Solar Energy Economical*. Disponível em: <https://www.engineering.com/story/challenges-of-making-solar-energy-economical>. Acesso em: 03/08/2023.

Overview - CDO - Project Management Service. CDO. Disponível em: <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/>. Acesso em: 21/08/2023.

- PACHAURI, R.K.; MEYER, L. A.; CORE WRITING TEAM. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf. Acesso em: 26/07/2023.
- PEINADO GONZALO, A.; PLIEGO MARUGÁN, A.; GARCÍA MÁRQUEZ, F. P. A review of the application performances of concentrated solar power systems. *Applied Energy*, v. 255, 113893, dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113893>.
- PEREIRA, E. B. *et al. Atlas brasileiro de energia solar*. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. DOI: <https://doi.org/10.34024/978851700089>.
- PERLIN, J. Seven of the Greatest Solar Stories Over the Millennia. *National Geographic*. 23 de setembro de 2013. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/seven-of-the-greatest-solar-stories-over-the-millennia>. Acesso em: 05/05/2023.
- PHILLIPS, N. A. *The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 82, n. 352, p. 123-164, abr. 1956. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.49708235202>.
- Photovoltaic park in NW China's Qinghai boosts development of clean energy. *People's Daily Online*. 22 de junho de 2021. Disponível em: <http://en.people.cn/n3/2021/0622/c90000-9863776.html>. Acesso em 22/06/2023.
- Photovoltaics. *Wikipedia* Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>. Acesso em: 16/08/2023.
- PINKERTON, L. A. Technica. Willoughby Smith and photo conductivity of selenium. *Technica*. 2010. Disponível em: <https://technica.inc/cleantech/willoughby-smith/>. Acesso em: 05/05/2023.
- PINTO, J. T. M.; AMARAL, K. J.; JANISSEK, P. R. Deployment of photovoltaics in Brazil: Scenarios, perspectives and policies for low-income housing. *Solar Energy*, v. 133, p. 73-84, ago. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.048>.
- Placa Solar: modelos, preços e onde comprar. *Portal Solar*. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/placa-solar>. Acesso em 20/08/2023.
- Placa Solar Fotovoltaica: Tudo Sobre. *Neosolar*. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/placa-solar-fotovoltaica>. Acesso em 20/08/2023.
- PLANCK, M. *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum*. Annalen der Physik, v. 309, n. 3, p. 553-563, 1901. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19013090310/>.
- Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat. *Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional*. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/habitacao/pbqp-h>. Acesso em: 22/06/2023.
- Qinghai Gonghe Talatan (Qinghai Green Power) solar farm. *Global Energy Monitor Wiki*. Disponível em: [https://www.gem.wiki/Qinghai_Gonghe_Talatan_\(Qinghai_Green_Power\)_solar_farm](https://www.gem.wiki/Qinghai_Gonghe_Talatan_(Qinghai_Green_Power)_solar_farm). Acesso em: 26/07/2023.

- RAJAVI, Y. *Concentrating Solar Power*. 2013. Disponível em: <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph240/rajavi1/>. Acesso em: 22/06/2023.
- RICHARDSON, L. F. *Weather Prediction by Numerical Process* (Classic Reprint). Forgotten Books, 2016. 250 p.
- RITA, R. et al. *Circulação Geral da Atmosfera 8 Meteorologia*. Grupo Apoio Técnico-Pedagógico, Licenciatura em Ciências - USP/Univesp - Módulo 2. Disponível em https://midia.atp.usp.br/plc/plc0009/impressos/plc0009_08.pdf. Acesso em: 05/05/2023.
- ROGERS, H. Current Thinking. *The New York Times Magazine*, 03/06/2007. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2007/06/03/magazine/03wwln-essay-t.html>. Acesso em 16/08/2023.
- ROSAS LUNA, M. A. et al. *Solar Photovoltaic Distributed Generation in Brazil: The Case of Resolution 482/2012*. Energy Procedia, v. 159, p. 484-490, fev. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.12.036>.
- ROZELOT, J. P.; KOSOVICHEV, A. G.; KILCIK, A. *A brief history of the solar diameter measurements: a critical quality assessment of the existing data*. In: ROZELOT, J. P.; BABAYEV, E. S. *Variability of the Sun and Sun-like Stars: from Asteroseismology to Space Weather* Les Ulis: EDP Sciences, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2196-9>. Disponível em: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1609/1609.02710.pdf>. Acesso em: 26/07/2023.
- SANTAMARTA, J. Helio SCSP. *Noor Ouarzazate Solar Complex in Morocco, World's Largest Concentrated Solar Power Plant*. Disponível em: <https://helioscsp.com/noor-ouarzazate-solar-complex-in-morocco-worlds-largest-concentrated-solar-power-plant/>. Acesso em 22/06/2023.
- SANTOS, A.J.L., “*Impacto de Mudanças Climáticas no Potencial de Energia Fotovoltaica no Setor Residencial Brasileiro*”, Dissertação de Mestrado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, 426 pág. 2020.
- SARAIVA, M de F. O.; SARAIVA, K. de S. O.; MÜLLER A. M. *Aula 16: Teoria da Radiação*. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~fatima/fis2010/Aula16-132.pdf>. Acesso em: 03/08/2023.
- SAWADOGO, W.; ABIODUN, B. J.; OKOGBUE, E. C. *Impacts of global warming on photovoltaic power generation over West Africa*. Renewable Energy, v. 151, p. 263-277, maio 2020.
- SAWADOGO, W. et al. *Current and future potential of solar and wind energy over Africa using the RegCM4 CORDEX-CORE ensemble*. Climate Dynamics, volume 57, pages 1647-1672, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05377-1>.
- SETCHELL, H. ECMWF Reanalysis v5. Disponível em: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>. Acesso em 20/08/2023.
- Shared Socioeconomic Pathways. *Wikipedia*. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Shared_Socioeconomic_Pathways. Acesso em: 16/08/2023.
- SHUKA, P. R., et al. *Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change*. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel

on Climate Change. *IPCC*. 2022. Disponível em:
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf.

SILVA, M.S. *Grandezas e unidades radiométricas*. Rev. Ciência Elem., V3(3):043, 2015. DOI: <https://doi.org/10.24927/rce2015.04>.

SIMON *et al.* *Numerical expression for precession formulae and mean elements for the Moon and planets*. Astronomy and Astrophysics, 282, 663-683, 1994. Disponível em:

<https://articles.adsabs.harvard.edu/full/1994A%26A...282..663S/0000665.000.html>. Acesso em: 05/05/2023.

SMITH, W. *Effect of Light on Selenium During the Passage of An Electric Current*. Nature, v. 7, n. 173, p. 303-303, fev. 1873. DOI: <https://doi.org/10.1038/007303e0>.

SNURR, R.; FREUDE, D. *Energy Fundamentals. Historical Development of the Word "Energy"*. Disponível em: <https://home.uni-leipzig.de/energy/energy-fundamentals/01.htm>. Acesso em 22/06/2023.

SOBRINHO, F. J. C. *Modelos para estimativa da radiação de onda longa atmosférica no cerrado Mato-Grossense*, 2011. Tese (Doutorado em Física Ambiental). Universidade Federal do Mato Grosso.

SOFIU, V. *et al.* *Implemation of Solar Led Lightninging in Shtime*. Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering., v. XX (X), 2011/1, n. 1, 2011. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/338633506_IMPLEMENTATION_OF_SOLAR_LED_LIGHTING_IN_SHTIME. Acesso em: 26/07/2023.

SOLAR, C. *Módulos com wafers de 182 mm são ideais para reduzir o LCOE em usinas*. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/modulos-com-wafers-de-182-mm-sao-ideais-para-reduzir-o-lcoe-em-usinas/>. Acesso em: 20 ago. 2023.

Solar cell. *Wikipedia* Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell. Acesso em: 22/06/2023.

Solar constant. *Wikipedia* 2021. Disponível em:

https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_constant. Acesso em: 12/07/2023.

Solar panels on spacecraft. *Wikipedia* Disponível em:

https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_panels_on_spacecraft. Acesso em: 26/07/2023.

Solar PV. *iea*. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>. Acesso em: 05/05/2023.

Solar Spectrum. *NASA*. 30 de novembro de 2017. Disponível em:

<https://solarsystem.nasa.gov/resources/390/the-solar-spectrum/>. Acesso em: 12/07/2023.

Solar Structure - Lesson. *Help teaching*. Disponível em:

<https://www.help-teaching.com/lessons/58/solar-structure>. Acesso em: 03/08/2023.

Solar timeline. U.S. *Department of Energy*. Disponível em:

https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf. Acesso em: 16/08/2023

SPENCER, J. W. *Fourier series representation of the position of the sun* Disponível em:

<https://www.mail-archive.com/sundial@uni-koeln.de/msg01050.html>. Acesso em: 12/07/2023.

STALEY, D. O.; JURICA, G. M. *Effective Atmospheric Emissivity under Clear Skies*. Journal of Applied Meteorology. v. 11, n. 2, p. 349-356, 1 mar. 1972. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1972\)0110349:EAEUCS2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1972)0110349:EAEUCS2.0.CO;2);

STEFAN, J. *Über die Beziehung der Wärmestrahlung und der Temperatur*. Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Mathematische-Naturwissenschaftliche Classe Abteilung II, 79, pp.391-428, 1879. Disponível em: <http://www.ing-buero-ebel.de/strahlung/Original/Stefan1879.pdf>. Acesso em: 16/08/2023.

STOCKER, T. *Introduction to Climate Modeling*. Physikalisches Institut. Universität Bern. 2016. Disponível em: <https://climatehomes.unibe.ch/~stocker/papers/stocker16icm.pdf>. Acesso em: 05/05/2023.

STUDART, N. *A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck*. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, no. 4, 523-535, Dezembro 2000. Disponível em: https://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_523.pdf. Acesso em: 26/07/2023.

STULL, R. B. *Practical meteorology : an algebra-based survey of atmospheric science*. University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 2017. 940 p.

Sun's Spectrum. *UCAR Center for Science Education*. Disponível em: <https://scied.ucar.edu/image/sun-spectrum>. Acesso em: 12/07/2023.

SZABO, L. *The history of using solar energy*. The 7th International Conference on Modern Power Systems (MPS 2017), 6-9 June 2017, Cluj-Napoca, Romania. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS41260.2017>.

TAMIZHMANI, G. *et al. Photovoltaic Module Thermal/Wind Performance: Long-Term Monitoring and Model Development for Energy Rating. NCPV and Solar Program Review. Meeting Proceedings, 24-26 March 2003, Denver, Colorado (CD-ROM)*. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/35645.pdf>. Acesso em: 16/08/2023.

TAYLOR K. E., *et al. CMIP6 Guidance for Data Users. PCMDI*. Disponível em: <https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/Guide/dataUsers.html>. Acesso em: 26/07/2023.

TAYLOR, K. E. *Scispace*. Disponível em: <https://typeset.io/authors/karl-e-taylor-4pbk9q87px>. Acesso em: 12/07/2023.

The Nobel Prize in Physics 2021. *The Nobel Prize*. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/summary/>. Acesso em: 26/07/2023.

The PALM model system. *PALM*. Disponível em: <https://palm.muk.uni-hannover.de/trac>. Acesso em: 05/05/2023.

The Solar Project. *Wikipedia*. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/The_Solar_Project. Acesso em: 16/08/2023.

The SSP Scenarios. *DKRZ*. Disponível em: <https://www.dkrz.de/en/communication/climate-simulations/cmip6-en/the-ssp-scenarios>. Acesso em: 16/08/2023.

The Sun Motor. *Hot Air Engines*. Disponível em: <http://hotairengines.org/solar-engine/ericsson-1868>. Acesso em: 12/07/2023.

Timeline of Climate Models. *Canadian Cryospheric Information Network*. Disponível em: <https://ccin.ca/ccw/modelling/timeline>. Acesso em: 16/08/2023.

TIWARI, G. N. *et al.* Improved Hottel-Whillier-Bliss equation for N-photovoltaic thermal-compound parabolic concentrator (N-PVT-CPC) collector. *Solar Energy*, v. 166, p. 203-212, maio 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.058>.

TONUI, J. K.; TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renewable Energy*, v. 32, n. 4, p. 623-637, abr. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.03.006>.

TOUZÉ-PEIFFER, L.; BARBEROUSSE, A.; LE TREUT, H. *The Coupled Model Intercomparison Project: History, uses, and structural effects on climate research*. WIREs Climate Change, 20 abr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.648>.

TRENBERTH, K. *Changes in precipitation with climate change*. *Climate Research*, v. 47, n. 1, p. 123-138, 31 mar. 2011. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr00953>.

Uso de energia solar térmica no Brasil cresce 28%. *Abrasol*. Disponível em: <https://conteudo.abrasol.org.br/index.php/2022/12/02/uso-de-energia-solar-termica-no-brasil-cresce-20/>. Acesso em: 05/05/2023.

VIANA, T. S. *et al.* Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation. *Solar Energy*, v. 85, n. 3, p. 486-495, mar. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.015>.

VIHMA, T. *Effects of Arctic Sea Ice Decline on Weather and Climate: A Review*. *Surveys in Geophysics*, v. 35, n. 5, p. 1175-1214, 9 mar. 2014. DOI 10.1007/s10712-014-9284-0

WCRP Coupled Model Intercomparison Project (Phase 6). *WCRP*. Disponível em: <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>. Acesso em: 12/07 2023.

WEISS, W.; SPÖRK-DÜR, M. *Solar Heat Worldwide 2023*. Global Market Development and Trends 2022 Detailed Market Figures 2021. June 2023. DOI: <https://doi.org/10.18777/ieashc-shw-2022-0001>.

WIDÉN, J.; MUNKHAMMAR, J. *Solar Radiation Theory*. Uppsala: Uppsala University, 2019. DOI: <https://doi.org/10.33063/diva-381852>.

WIEN, W. *Über die Energievertheilung im Emissionsspectrum eines schwarzen Körpers*. *Annalen der Physik und Chemie*, 294, pp. 662-669. 1896. Disponível em: http://myweb.rz.uni-augsburg.de/~eckern/adp/history/historic-papers/1896_294_662-669.pdf. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786449708620983>.

Wien's displacement law. *Wikipedia* Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Wien%27s_displacement_law. Acesso em: 05/05/2023.

Wien's Law vs. Stefan-Boltzmann Law. *study.com*. Disponível em: <https://study.com/learn/lesson/wiens-stefan-boltzmann-law-formulas-overview-uses-functions.html>. Acesso em: 12/07/2023.

WILD, M. *Solar Radiation Versus Climate Change*. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, p. 9731-9740, 2012. Disponível em: https://iacweb.ethz.ch/doc/publications/Encyclopedia_Springer_MartinWild.pdf, Acesso em: 12/07/2023.

WILLIAMS, D. R. *Earth Fact Sheet*. Disponível em: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>. Acesso em: 26/07/2023.

WILLSON, R. C. *et al. Observations of Solar Irradiance Variability*. *Science*, v. 211, n. 4483, p. 700-702, 13 fev. 1981. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.211.4483.700>.

WILLSON, R.C. *Measurements of solar total irradiance and its variability*. *Space Science Reviews*, v. 38, n. 3-4, 1984. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00176830>.

World Climate Research Programme. *WCRP*. Disponível em: <https://www.wcrp-climate.org/>. Acesso em: 12/07/2023.

World Energy Resources: Solar World Energy Council 2013, *Solar*, JJ1264_WEC_Resources_solar_111013_JS .indd. Disponível em: https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/10/WER_2013_8_Solar_revised.pdf. Acesso em 12/11/2023.,

YANG, R. L. *et al. Photovoltaic Cell Temperature Estimation for a Grid-Connect Photovoltaic Systems in Curitiba*. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 62, 25 nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-smart-2019190016>.

YIN, J.; MOLINI, A.; PORPORATO, A. *Impacts of solar intermittency on future photovoltaic reliability*. *Nature Communications*, v. 11, n. 1, p. 4781, 22 set. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18602-6>.

ZHANG, J.; YOU, Q.; ULLAH, S. *Changes in photovoltaic potential over China in a warmer future*. v. 17, n. 11, p. 114032, 1 nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac9e0b>.