



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Mecânica

- Mestrado - Doutorado

VARIABILIDADE CLIMÁTICA E PRODUÇÃO DE ÁGUA QUENTE POR UM COLETOR SOLAR EM JOÃO PESSOA - PB

por

José Moreira da Silva Júnior

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do grau de Mestre.*

JOSÉ MOREIRA DA SILVA JÚNIOR

**VARIABILIDADE CLIMÁTICA E PRODUÇÃO DE
ÁGUA QUENTE POR UM COLETOR SOLAR EM
JOÃO PESSOA - PB**

Dissertação apresentada ao curso de
Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às exigências
para obtenção do Grau de Mestre.

Orientadora: Prof^a PhD Monica Carvalho.

Coorientador: Prof^o PhD Raphael Abrahão.

S586v Silva Júnior, José Moreira da.

VARIABILIDADE CLIMÁTICA E PRODUÇÃO DE ÁGUA QUENTE POR
UM COLETOR SOLAR EM JOÃO PESSOA - PB / José Moreira da
Silva Júnior. - João Pessoa, 2020.

88 f. : il.

Orientação: Monica Carvalho.

Coorientação: Raphael Abrahão.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Variabilidade climática. 2. energia solar térmica.
3. água quente. 4. energia renovável. I. Carvalho,
Monica. II. Abrahão, Raphael. III. Título.

UFPB/BC

VARIABILIDADE CLIMÁTICA E PRODUÇÃO DE ÁGUA QUENTE POR UM COLETOR SOLAR EM

JOÃO PESSOA - PB

por

JOSÉ MOREIRA DA SILVA JÚNIOR

Dissertação aprovada em 07 de maio de 2020



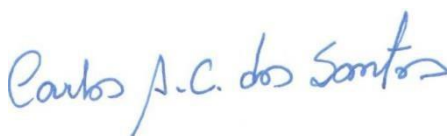
Prof.ª. Dra. MONICA CARVALHO
Orientadora – UFPB



Prof. Dr. RAPHAEL ABRAHAO
Coorientador - UFPB



Prof. Dr. GUSTAVO CHARLES PEIXOTO DE OLIVEIRA
Examinador Externo – UFPB



Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS
Examinador Externo – UFCG

VARIABILIDADE CLIMÁTICA E PRODUÇÃO DE ÁGUA QUENTE POR UM COLETOR SOLAR EM JOÃO PESSOA - PB

RESUMO

A atividade humana já é entendida como fator que influencia o sistema terrestre como um todo, provocando alterações na atmosfera e oceanos, que levam a alterações climáticas. A principal responsável por isso é a presença exagerada de dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa na atmosfera, proveniente, em sua maior parte, da queima de combustíveis fósseis. Isso acarreta em mudanças climáticas, alterando o comportamento de parâmetros climáticos, como temperatura do ar, velocidade do vento, radiação global, nebulosidade e etc. Por esse motivo, há décadas estudos vêm sendo desenvolvidos de maneira a garantir acesso sustentável a combustíveis e energias. O presente trabalho se insere nesse contexto, verificando como as alterações climáticas podem afetar o funcionamento e produção de água quente em um coletor solar. Dados históricos do clima de João Pessoa, Paraíba, foram compilados, tratados e analisados, estabelecendo-se tendências climáticas, utilizando os testes estatísticos não-paramétricos de Mann-Kendall. Esses dados foram aplicados a um modelo de funcionamento de um coletor solar plano, baseado na norma NBR 15569, para que se possa avaliar seu desempenho ao longo da série histórica dos dados climáticos utilizados. Assim, foi possível identificar o nível de impacto da variabilidade climática na produção de energia deste tipo de sistema de energia renovável. As tendências crescentes identificadas na temperatura média do ar resultam em um impacto positivo de 5% na produção de água quente na cidade de João Pessoa, quando comparados os períodos 1961-1970, 2009-2018 e 1961-2018.

Palavras Chave: Variabilidade climática; energia solar térmica; água quente; energia renovável

CLIMATIC VARIABILITY AND HOT WATER PRODUCTION BY A SOLAR COLLECTOR IN JOÃO PESSOA (NORTHEAST – BRASIL)

ABSTRACT

Human activity is already understood as a factor that influences the terrestrial system as a whole, causing changes in the atmosphere and oceans that lead to climate change. The main reason for this is the presence, beyond reasonable levels, of carbon dioxide in the atmosphere, which comes mostly from the use of fossil fuels. For this reason, studies have been carried out for decades in order to guarantee sustainable access to fuels and energies. This leads to climate changes, changing the behavior of climatic parameters, such as air temperature, wind speed, global radiation, cloudiness and so on. The present work is related to this context offering an analysis of how climate changes affect the functioning and production of hot water in a solar collector. Historical climate data from João Pessoa, Paraíba, were compiled, treated and analyzed, establishing climatic trends, using Mann-Kendall's non-parametric statistical tests. These data were applied to a working model of a flat plate solar collector, based on the NBR 15569 standard, so that, jointly with the obtained climatic series, its performance can be evaluated throughout the historical series of climatic data used. Thus, it was possible to identify the level of impact of climatic variability on energy production in this type of renewable energy system. The positive climatic trends identified in the average air temperature leads to a 5% positive impact on the production of hot water in the city of João Pessoa, when comparing the periods 1961-1970, 2009-2018 and 1961-2018.

Keywords - Climatic Variability, thermal solar energy, hot water, renewable energy.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	12
1.1. INTRODUÇÃO	12
1.2. OBJETIVOS	15
1.2.1. Objetivo geral	15
1.2.2. Objetivos específicos.....	15
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
1.4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
1.4.1. Energias renováveis.....	17
1.4.2. Sistema de aquecimento solar (SAS).....	20
1.4.3. Testes de Mann-Kendall e Sen	24
2. COMO REPERCUTEM AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS	28
2.1. INTRODUÇÃO	28
2.2. OBJETIVO	30
2.3. METODOLOGIA	30
2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
2.5. CONCLUSÃO	39
2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39
3. AVALIAÇÃO DE TENDÊNCIAS DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL NA CIDADE DE JOÃO PESSOA, PARAÍBA	43
3.1. INTRODUÇÃO	44
3.2. OBJETIVO	46

3.3. METODOLOGIA	46
3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
3.5. CONCLUSÃO	53
3.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
4. EFEITO DAS TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS NA OPERAÇÃO DE UM COLETOR SOLAR LOCALIZADO EM JOÃO PESSOA (NORDESTE DO BRASIL).....	57
4.1. INTRODUÇÃO	57
4.2. OBJETIVO	59
4.3. METODOLOGIA	59
4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.5. CONCLUSÃO	72
4.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE TODA A DISSERTAÇÃO	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquema de um coletor solar plano	22
Figura 2.1 - Redução da eficiência de geração de eletricidade em módulos fotovoltaicos, devido ao aumento da temperatura externa (Iks refere-se a densidade de corrente, Uok é potencial elétrico e η refere-se a eficiência da geração de eletricidade).	35
Figura 2.2 - Mapa global com a distribuição das tendências (menores, médias e maiores) climáticas entre os anos de 2006 e 2049.....	38
Figura 3.1 – Localização da estação meteorológica automática de João Pessoa	46
Figura 3.2 - Radiação global referente a um dia médio de cada mês do ano para a cidade de João Pessoa (Paraíba).	48
Figura 3.3 - Séries anuais da radiação global referentes a um dia médio de cada mês para a cidade de João Pessoa (Paraíba).	49
Figura 3.4 - Radiação global referente a média da faixa horária de 11-13 horas em um dia médio de cada mês do ano para a cidade de João Pessoa (Paraíba).	51
Figura 4.1 – Localização da estação meteorológica convencional de João Pessoa.....	60
Figura 4.2 – Esquema representativo do sistema de aquecimento solar com coletor plano	60
Figura 4.3 - Caracterização da temperatura do ar máxima, média e mínima mensais para a cidade de João Pessoa (1961-2018).....	63
Figura 4.4 - Caracterização da nebulosidade média mensal para a cidade de João Pessoa (1961-2018).	64
Figura 4.5 - Produção mensal de água quente na cidade de João Pessoa (Nordeste do Brasil) com temperatura de armazenamento de 50°C.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Algumas classificações do sistema de aquecimento solar.....	21
Tabela 1.2 - Tipos de coletores e suas faixas de temperatura de funcionamento.....	22
Tabela 3.1 - Tendências detectadas para a radiação global na cidade de João Pessoa (Paraíba) pelo teste de Mann-Kendall e quantificada pela declividade de Sen entre os anos 2007 e 2018.	50
Tabela 3.2 - Tendências detectadas para a radiação global na cidade de João Pessoa (Paraíba) para a média da faixa horária de 11-13 horas pelo teste de Mann-Kendall e quantificada pela declividade de Sen entre os anos 2007 e 2018.	52
Tabela 4.1 - Valores de irradiação média mensal para João Pessoa, Paraíba.....	62
Tabela 4.2 - Tendências detectadas para a temperatura na cidade de João Pessoa (Paraíba) pelo teste de Mann-Kendall e quantificada pela declividade de Sen entre os anos 1961 e 2018.	65
Tabela 4.3 - Tendências detectadas para a nebulosidade na cidade de João Pessoa (Paraíba) pelo teste de Mann-Kendall e quantificada pela declividade de Sen entre os anos 1961 e 2018.	66
Tabela 4.4 - Produção de água quente na cidade de João Pessoa (Nordeste do Brasil) com temperatura de armazenamento de 50 °C.	69
Tabela 4.5 - Tendências detectadas para a produção de água quente na cidade de João Pessoa (Paraíba) pelo teste de Mann-Kendall e quantificada pela declividade de Sen entre os anos 1961 e 2018.	70

LISTA DE SÍMBOLOS

ABEEÓLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ESTTP – Plataforma Europeia de Tecnologia Solar Térmica

GEE – Gases do Efeito Estufa

IGSM – Modelos Globais Integrados

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC – Painel Internacional Sobre Mudanças Climáticas

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas

PROEÓLICA – Programa Emergencial de Energia Eólica

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

RCM – Modelo Climático Regional

SAS – Sistema de Aquecimento Solar

UNDESA - Departamento das Nações Unidas para Assuntos Econômicos e Sociais

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. INTRODUÇÃO

Há uma forte relação entre mudança climática, matriz energética, crescimento populacional e desenvolvimento econômico, o que torna claro o papel que a energia tem no crescimento econômico. O crescimento populacional e o desenvolvimento econômico resultam no aumento das demandas energéticas da sociedade, o que acaba aumentando também os níveis de poluição, já que a produção de energia mundialmente está baseada em fontes fósseis (APPIAH, 2018; LIN, BENJAMIN, 2018; LIU, HAO, 2018; GOZGOR, LAU, LU, 2018).

O Departamento das Nações Unidas para Assuntos Econômicos e Sociais em seu relatório *World Population Prospects* (UNDESA, 2019) indicou que a população mundial chegou a 7,7 bilhões de pessoas, tendo saído do número de 1,6 bilhões para 6,1 bilhões, entre 1900-2000. Esse grande crescimento populacional em apenas um século implicou também num crescimento de 12 vezes das emissões de gases do efeito estufa (GEE) para o período (Scientific American, 2009). A projeção de se chegar a 11,2 bilhões de pessoas até 2100 (UNDESA, 2017) agrava ainda mais a preocupação de como atender a demanda crescente de energia e não intensificar os efeitos climáticos que a matriz energética atual produz. Em relatório de 2018, o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) destacou a necessidade de limitar o aquecimento global até 1,5°C acima da época pré-industrial, reduzindo drasticamente a emissão de GEE, até 45% em 2030 e 100% em 2050 (IPCC, 2018). O que deixa o mundo com poucos anos para atingir essa meta, que pode prevenir consequências mais extremas das mudanças climáticas.

A matriz energética brasileira é razoavelmente diversificada e com forte lastro em energia renovável de fonte hidráulica, que são as usinas e centrais hidrelétricas, portanto sensíveis às variabilidades e mudanças climáticas. De toda energia produzida no Brasil, cerca de 61% provém de usinas hidrelétricas, o que corresponde à geração de 102.964 MW ao ano, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2019). No ano de 2019, o país acrescentou 7.246 MW à matriz energética, o que o levou a atingir a marca de 170.071 MW de potência fiscalizada. Dos 7.246 MW incrementados, 4.839 são de fonte hidráulica, 971 MW de eólica, 776 MW de termelétrica e 551 MW de fotovoltaica (ANEEL, 2020). O somatório de incrementos da produção a partir de fontes fotovoltaica e eólica resulta em quase o dobro do que foi incrementado por fonte termelétrica, mostrando desenvolvimento da exploração de energia limpa, em detrimento do uso de combustíveis fósseis. A fonte eólica passa a contribuir, então, com 9,0% de toda energia elétrica produzida, enquanto a fonte fotovoltaica fornece 1,5%. Esses números arredondam a fração de 75% de participação de fontes renováveis na matriz energética nacional (ANEEL, 2020).

O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) (AMBRIZZI e ARAUJO, 2014) prevê para a região Nordeste na Mata Atlântica um aumento de temperatura de 0,5° a 1,0°C e decréscimo da precipitação em torno de 10% até 2040. Essas tendências são mantidas para o meio do século, 2041-2070, com aquecimento de 2° a 3°C e diminuição pluviométrica de 20% a 25%. No fim do século, 2071-2100, é esperada a intensificação do aquecimento, aumento de 3° a 4°C e redução dos padrões de chuva de 30% a 35% (AMBRIZZI e ARAUJO, 2014).

Alguns estudos já têm investigado o potencial dos impactos das possíveis mudanças climáticas na produção de energias renováveis, chegando a diferentes resultados em diferentes regiões do mundo. Enquanto alguns estudos projetam que as mudanças climáticas podem aumentar a produção energética, outros indicam que pode diminuir, a depender de região e tipo de fonte renovável. Por exemplo, para fonte hidráulica, Lucena *et al.* (2009) projetam uma redução da faixa de 1-7% da produção hidrelétrica brasileira em um dos cenários de emissões de poluentes, comparando 2006 com o período 2071-2100. Enquanto Boehlert *et al.* (2015) projetam que a produção hidrelétrica sofreria impacto médio positivo de 6,5% nos Estados Unidos até 2050 comparado com 2005. Parques eólicos, por sua vez, também são afetados de maneira a depender de sua localização. Koch *et al.* (2015) para dado cenário de emissões estima um decréscimo da produção de potência eólica no Norte da

Alemanha de 3% e um crescimento de 2% para o Sul alemão, ambos no comparativo entre os períodos 1981-2010 e 2015-2050. De Jong *et al.* (2019) indica que a produção eólica em algumas localidades do Nordeste do Brasil sofreria impacto positivo de mais de 40% até 2080. A energia solar fotovoltaica também apresenta resultados variáveis de acordo com a localidade, pois depende diretamente tanto da temperatura, por diminuir a eficiência dos painéis solares, como da radiação global, por aumentar a potência produzida (NOTTON *et al.*, 2010). Panagea *et al.* (2014), avaliando o caso da Grécia, estima um acréscimo de 1-2% na produção de energia fotovoltaica nas regiões Oeste e Sudoeste daquele país em 2050, ocasionada pelo incremento de radiação global no local. No Leste Europeu o potencial fotovoltaico de energia sofreria decréscimo de 7% em 2030, como prognosticam Gaetani *et al.* (2014).

Essa dissertação examina o desenvolvimento da energia renovável, no sentido de utilizar uma ferramenta de análise para melhorar o emprego de recursos naturais e, por consequência, a aplicação das tecnologias de aproveitamento de energia solar térmica. O texto procura quantificar o impacto climático na produção final dos sistemas tratados, conhecendo seu desempenho e levando em consideração as alterações de parâmetros climáticos ao longo dos anos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Avaliar o impacto das tendências climáticas no desempenho de coletores solares na cidade de João Pessoa, Paraíba.

1.2.2. Objetivos específicos

- Compilar e interpretar dados climáticos da estação meteorológica da cidade de João Pessoa;
- Determinar a presença ou não de tendências climáticas;
- Modelar um sistema de energia solar térmica, baseado em um coletor solar comercialmente disponível;
- Aplicar os dados climáticos no modelo, estudando o desempenho do arranjo de coletores em comparação com os dados utilizados;
- Interpretar o impacto climático no desempenho do coletor solar, avaliando como as tendências climáticas podem ser utilizadas no auxílio à tomada de decisão.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação está estruturada no formato de compêndio de artigos, dividida em cinco capítulos e organizada da seguinte maneira:

- Capítulo 1: responsável pela organização do trabalho, contendo introdução, objetivos gerais e específicos, e referencial teórico necessário ao desenvolvimento desse trabalho, fornecendo informações que ajudarão na compreensão do estudo. Os capítulos seguintes, 2, 3 e 4 possuem introdução e metodologia próprias, focadas no tema central de cada um;
- Capítulo 2: o artigo “Como repercutem as mudanças climáticas na produção de energias renováveis?” faz uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte da temática do estudo. Avalia o potencial de impacto das mudanças climáticas na produção de energia renovável no mundo, no intuito de identificar se é um fenômeno replicável e se apresenta comportamento padronizado. Esse trabalho foi publicado e apresentado no Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade (CONGESTAS), realizado em João Pessoa – Paraíba, em 2018.
- Capítulo 3: apresenta o artigo “Avaliação de tendências do parâmetro radiação solar global na cidade de João Pessoa” que se propõe a avaliar o parâmetro de energia solar em que se baseia a produção de energia renovável térmica e fotovoltaica. Testes de Mann-Kendall são aplicados para identificar tendências climáticas na série histórica estudada. O trabalho foi publicado e apresentado no Congresso Internacional de Meio Ambiente e Sociedade (CONIMAS), realizado em Campina Grande – Paraíba, em 2019.
- Capítulo 4: esse capítulo apresenta o artigo final da dissertação, intitulado “Efeito das tendências climáticas na operação de um coletor solar localizado em João Pessoa (Nordeste do Brasil)”. Esse trabalho avalia séries históricas de temperatura média do ar e nebulosidade e desenvolve análise sobre o impacto das mudanças climáticas na produção de energia solar térmica de um coletor plano na cidade de João Pessoa. O artigo passa por processo de tradução e será submetido a um periódico internacional.

- Capítulo 5: esse último capítulo é composto pelas considerações finais da dissertação e sugestão de trabalhos futuros, apresentando alternativas para análises mais profundas levando em consideração cenários climáticos futuros, maior abrangência de localidades e outros tipos de fontes renováveis.

E por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

1.4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.4.1. Energias renováveis

As energias renováveis são energias cujas fontes são naturalmente repostas, mas com fluxo limitado. As fontes renováveis são tidas como virtualmente inexauríveis do ponto de vista de duração, porém limitadas pela quantidade de energia disponível por tempo. As fontes renováveis mais comumente aproveitadas são hidráulica, solar, eólica e biomassa, segundo a *Energy Information Administration* (EIA, 2019).

A fonte da energia hidrelétrica se origina no sol, que impulsiona o ciclo das águas do planeta. Resumidamente, é aproveitada a energia mecânica da água, potencial e cinética, usando turbinas de água e geradores elétricos. Essa tecnologia é considerada madura e sem alterações fundamentais nas últimas décadas, porém com otimizações em turbinas mais eficientes, melhores construções de túneis e reservatórios (BALMER, SPRENGE e LETCHER, 2008). Também é característica forte dessa modalidade de energia renovável a eficiência, que varia entre 75 e 90%. Destacando-se perante as demais tecnologias de produção de eletricidade, como turbinas a gás, com 57% de eficiência, usinas a carvão, com 37 a 42%, usinas nucleares, 40%, usinas fotovoltaicas entre 5 e 15% e as turbinas eólicas na faixa de 19 a 33% de eficiência (BALMER, SPRENGE e LETCHER, 2008).

Dois esquemas de usinas hidrelétricas prevalecem como mais comuns e básicos, o de fio de água e o de armazenamento. Esses diferem na capacidade de seu reservatório em armazenar água anualmente (BALMER, SPRENGE e LETCHER, 2008). O tipo fio de água funciona com descarga contínua de água, não tendo capacidade de armazenamento além da lagoa principal. Já os esquemas de armazenamento possuem reservatórios que permitem mudar o fluxo de entrada de água de maneira controlada, fazendo assim uma adaptação para

momentos de baixa ou alta demanda de eletricidade, se adequando melhor ao perfil horário e diário da matriz energética (BALMER, SPRENGE e LETCHER, 2008).

O potencial eólico mundial é grande e pode contribuir significativamente com a produção de eletricidade. O vento é causado pelo aquecimento da superfície terrestre pelo sol, resultando numa variação de temperatura e pressão ao longo da atmosfera, fazendo com que massas de ar se movimentem (STAUDT e LETCHER, 2008).

O funcionamento das turbinas eólicas se dá pelo vento que aciona um rotor de três pás conectado a um eixo de baixa velocidade. Esse eixo transmite movimento para a parte interna da turbina eólica, passando pela transmissão, que é responsável pelo aumento da velocidade de rotação do eixo para acionar o gerador. Além disso, é montado um sistema de freio, que proporciona segurança e melhor funcionamento para o equipamento (STAUDT e LETCHER, 2008).

O sistema possui movimento de rotação, de maneira que o rotor fique melhor posicionado, conforme varie a direção do vento. Motores elétricos são responsáveis por essa otimização de orientação da turbina eólica, combinados com um conjunto de sensores de velocidade e direção de vento, montados na parte traseira da turbina, que alimentam o sistema de controle responsável pela atuação e correção da posição (STAUDT e LETCHER, 2008). As caixas de engrenagens, ou transmissão, são responsáveis pelas maiores taxas de falha do sistema. Por isso, há também turbinas eólicas de acionamento direto, que funcionam sem a caixa de engrenagem, fazendo uso de um motor síncrono controlado via eletrônica de potência (STAUDT e LETCHER, 2008).

Há de se destacar que as condições de vento em todas as localidades são de difícil previsão para períodos de tempo mais longos. Isso agrega intermitência e vulnerabilidade a esses sistemas de produção de eletricidade, por não ser capaz de fornecer uma base estável produtiva. Portanto, uma solução pode ser a combinação da energia eólica com outras fontes renováveis, como a solar e a hidráulica (DUNLAP, 2015).

O primeiro aerogerador instalado para fins comerciais em solo brasileiro teve sua operação iniciada em 1992. Instalada em Fernando de Noronha, no Estado de Pernambuco, a primeira turbina eólica do Brasil tinha potência de 225 kW. De lá pra cá, foram criadas iniciativas como o PROEÓLICA, Programa Emergencial de Energia Eólica, e o PROINFA, Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (MAUAD *et al.*, 2017).

Tais iniciativas alavancaram o desenvolvimento da produção de energia eólica no Brasil, que em 2019 alcançou a marca de 9% de participação na matriz energética nacional, com 86% da capacidade instalada localizada no nordeste, segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA, 2019).

A biomassa é uma fonte de matéria orgânica derivada de plantas, seja direta ou indiretamente, abrangendo uma variedade de tipos, como resíduos florestais e agrícolas, subprodutos de resíduos orgânicos, biossólidos, plantas lenhosas e etc. Sua utilização pode se dar tanto para produção de energia, mais comumente calor, quanto como matéria prima de outros produtos biológicos (CHAMPAGNE e LETCHER, 2008). A energia da biomassa pode ser aproveitada por processos termoquímicos, bioquímicos e mecânicos, que convertam a biomassa em um combustível líquido ou gasoso, a exemplo da gaseificação. Essa fonte pode ser considerada renovável, uma vez que seu volume consumido no processo de aproveitamento de energia é restabelecido pelo crescimento de uma quantidade equivalente de biomassa (CHAMPAGNE e LETCHER, 2008).

No Brasil, em função da grande produção de cana-de-açúcar, o bagaço cumpre papel importante na produção energética usando biomassa, se mostrando alternativa competitiva ao setor sucroalcooleiro, que tende então a aumentar sua receita (MAUAD *et al.*, 2017). O Brasil (2019) também fortalece esse fato, apontando que não só o aumento da oferta de biomassa residual da cana fortalece o cenário energético nacional, mas também ajuda no processo de modernização das usinas de álcool no quesito de produção de energia.

O efeito fotovoltaico é a conversão direta da radiação solar em eletricidade. A tecnologia, que tem grande potencial, é tida como robusta e confiável e vem sendo desenvolvida de maneira constante desde a década de 1960, passando por um alargamento comercial proeminente nos últimos anos (INFIELD e LETCHER, 2008).

Os equipamentos fotovoltaicos baseiam seu funcionamento na conversão de fótons incidentes para cargas livres no processo de absorção. Parte importante do dispositivo fotovoltaico é a malha de semicondutores de junção do tipo p-n, que é responsável pela constituição de corrente elétrica (INFIELD e LETCHER, 2008). O fóton recebido promove um elétron de valência para a banda de condução do semicondutor, criando um campo elétrico que ordenará o sentido que os elétrons percorrerão na corrente (INFIELD e LETCHER, 2008).

A energia solar tem potencial gigantesco, a ponto de parecer inesgotável. Ela é capaz de satisfazer a demanda energética mundial. Na atmosfera terrestre o nível de incidência de radiação solar é da faixa de $1,8 \times 10^{17}$ W, cerca de metade disso é absorvido pela atmosfera e o restante alcança a superfície terrestre, o que corresponde a cerca de $9,0 \times 10^{16}$ W (DUNLAP, 2015). Estipulando uma eficiência média de 15% de um painel fotovoltaico, seria possível aproveitar $1,3 \times 10^{16}$ W. Mas, sabe-se, que a demanda energética mundial tem potencial de consumo de $1,8 \times 10^{13}$ W, o que representa apenas 0,14% de conteúdo energético aproveitável pela radiação solar.

A participação da energia solar na matriz energética mundial é ainda pequena. No entanto, entre os anos de 1996 e 2006, houve um crescimento de 2000% nessa modalidade de produção de energia (MAUAD *et al.* 2017), atingindo a marca de capacidade instalada total de 505 GW em 2018 (REN21, 2019). Desses 505 GW de energia solar fotovoltaica presentes na matriz energética mundial, a China é quem mais contribui com 176 GW desse todo, enquanto o Brasil aparece com apenas 2,5 GW.

Outro fato a ser assinalado é o caso da Alemanha, um dos países líderes na produção de energia solar fotovoltaica, com 45 GW, com insolação média de cerca de 3500 Wh/m²/dia (REN21, 2019). O Brasil possui participação muito menor nesse tipo de energia na matriz mundial, mesmo tendo recurso solar da ordem média de 4500 a 6000 Wh/m²/dia. Isso denota que o país se encontra em um baixo nível de exploração de seu potencial (MAUAD *et al.*, 2017).

1.4.2. Sistema de aquecimento solar (SAS)

Para a *European Solar Thermal Technology Platform*, ESTTP (2009), a energia solar térmica se configura como uma fonte conveniente de aquecimento, com a característica de não depender de combustíveis fósseis, que são escassos, finitos e agressivos ao meio ambiente. O sistema solar de aquecimento de água, quando comparado a outros sistemas de aquecimento solar, (SOWMY *et al.*, 2017) possui baixa complexidade técnica na sua construção e permite extrair boa parte da energia solar incidente e transformá-la em calor, demonstrando assim boa eficiência. O sistema é composto basicamente por três partes: o coletor solar, os reservatórios térmicos e o circuito hidráulico.

O coletor solar é um dispositivo projetado para absorver o máximo de radiação solar e reduzir perdas de calor (WANG *et al.*, 2015). Para tanto, há configurações e classificações diferentes para cada aplicação e capacidade. O sistema pode ser tanto ativo quanto passivo, no que diz respeito à introdução de bomba no circuito hidráulico ou ao efeito termo sifão, respectivamente. Assim como também pode ser classificado quanto a forma de troca de calor do fluido aquecido, em que o sistema direto é aquele que o fluido troca calor diretamente no coletor, enquanto o indireto apresenta um trocador de calor para o aquecimento do fluido em um reservatório. O armazenamento é classificado de acordo com a distância do reservatório, sendo acoplado quando o reservatório é compreendido na mesma estrutura do coletor, convencional quando separados e integrado quando a radiação e o armazenamento são realizados pelo mesmo dispositivo. A alimentação se relaciona com a entrada de água no sistema, sendo exclusiva caso só haja uma para o SAS e não-exclusiva para o caso de compartilhamento da entrada de água entre o SAS e outros pontos de consumo (ABNT NBR 15569: 2020). Por fim, são classificados segundo a temperatura de operação: são os de baixa temperatura, coletores planos, utilizados mais para necessidades domésticas, em aplicações que o fluido deve ser aquecido até cerca de 80°C; e de alta temperatura, que são os de tubo evacuado, *line-focus collector* e *point-focus collector*, esses apresentam uma capacidade maior de absorver calor e funcionar a temperaturas mais altas, sendo o primeiro devido ao vácuo nos tubos que diminui as perdas térmicas e os últimos dois utilizados para geração de vapor devido a concentração dos raios solares por suas superfícies absorvedoras (KALOGIRU, 2013). Essas classificações são resumidas na tabela 1.1 e os tipos de coletores por temperatura de operação são organizados na tabela 1.2.

Tabela 1.1 - Algumas classificações do sistema de aquecimento solar

Tipo	I	II	III
Arranjo	Solar mais auxiliar	Somente solar	Preaquecimento solar
Circulação	Termossifão	Forçada	-
Armazenamento	Convencional	Acoplado	Integrado
Alimentação	Exclusiva	Não Exclusiva	-

Fonte: NBR 15569 (ABNT, 2020)

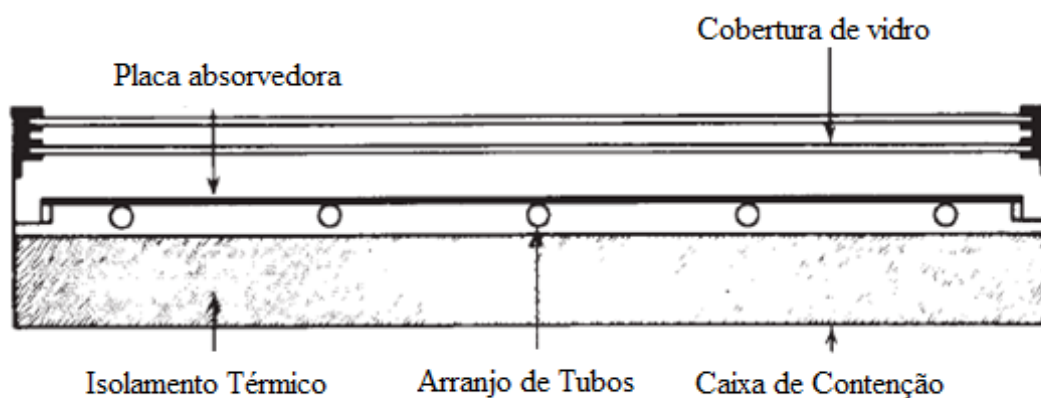
Tabela 1.2 - Tipos de coletores e suas faixas de temperatura de funcionamento

Atributo	Aplicação	Temperatura de Funcionamento (°C)
Planos	Setor residencial, comercial e industrial	30-80
Tubo evacuado	Setor residencial, comercial e industrial	50-200
Calha Parabólica	Setor energético e industrial	60-400
Fresnel	Setor industrial	60-250
Refletor Parabólico	Setor energético	100-1500

Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013) e Kalogiru (2013)

Para Kluppel (1985), o coletor solar é o principal elemento de qualquer sistema de aquecimento solar de água. É nele em que a radiação solar é interceptada e, por fim, transferida como energia térmica para o fluido de trabalho. O modelo mais difundido no mundo é o coletor plano, devido a sua facilidade construtiva, operação simples e baixo custo. A água é o fluido mais comumente usado para remoção da energia solar captada no coletor, de modo a cumprir seu motivo de utilização ou ser armazenada. A figura 1.1 mostra um esquema de um coletor solar plano.

Figura 1.1 - Esquema de um coletor solar plano



Fonte: Adaptado de Duffie; Beckman (2013)

Duffie e Beckman (2013) definem as partes de um coletor plano como formado basicamente por: placa absorvedora, que tem a função de absorver a energia solar em sua superfície e transfere para o fluido a ser aquecido que passa pelos condutos; o arranjo de tubos, que é por onde o fluido a ser aquecido deve circular e ganhar calor; a cobertura de vidro, que para alguns casos serve para promover um efeito estufa e melhorar o funcionamento desse tipo de coletor em locais que possuam temperaturas baixas; isolante térmico, que atua reduzindo os efeitos de perda de calor por condução e convecção para a periferia do coletor; e a caixa de contenção, que cumpre a função de junção dos elementos construtivos do coletor.

O desempenho de um coletor solar plano, em regime permanente, é quantificado pelo balanço de energia que leva em consideração o ganho de energia útil pela radiação, perdas térmicas e perdas ópticas. A taxa de calor útil absorvido por um coletor solar plano é dado pela equação 1.1, Onde A_c é a área do coletor, S é a radiação solar absorvida pelo coletor, U_L é o coeficiente de transferência de calor, T_{pm} e T_a são as temperaturas, respectivamente, média do coletor e do ambiente (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$Q_u = A_c[S - U_L(T_{pm} - T_a)] \quad (1.1)$$

A eficiência de um coletor é dada pela equação 1.2, sendo definida como a razão entre a energia útil absorvida no coletor pela energia incidente em sua área pelo mesmo período de tempo, em que G_t é a radiação máxima incidente sobre o coletor (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$\eta = \frac{\int \dot{Q}_u dt}{A_c \int G_t dt} \quad (1.2)$$

Para o caso de as condições serem constantes por um período de tempo, a eficiência será dada pela equação 1.3. Onde I_T é a radiação total no coletor (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T A_c} \quad (1.3)$$

1.4.3. Testes de Mann-Kendall e Sen

Para aplicação dos testes de Mann-Kendall e Sen, foi utilizado o programa livre Makesens, baseado em Excel, desenvolvido pelo Instituto Finlandês de Meteorologia, em 2002. O Makesens produz dois tipos de análises estatísticas. Inicialmente, checa a presença de tendência monotônica crescente ou decrescente com o teste não-paramétrico de Mann-Kendall, indicado para tendências monotônicas e não sazonais, e depois estima a inclinação de uma tendência linear com o teste não paramétrico de Sen, quantificando a tendência (Gilbert, 1987).

Esses métodos apresentam algumas vantagens, como a ausência de alguns dados ainda permitirem seus funcionamentos, os dados não precisam ter nenhuma distribuição particular e a quantificação da tendência pela inclinação de Sen não é grandemente impactada pela falta pontual de dados na série analisada (SALMI *et al.*, 2002).

As informações desta seção baseiam-se no manual do Makesens, produzido por Salmi *et al.* (2002) e no livro “*Statistical methods for environmental pollution monitoring*” de Gilbert (1987), descrevendo o funcionamento dos testes Mann-Kendall e Sen.

O teste de Mann-Kendall pode ser aplicado nos casos em que os dados x_i de uma série temporal obedecem ao modelo:

$$x_i = f(t) + \varepsilon \quad (1.4)$$

em que $f(t)$ é uma função monotônica do tempo crescente ou decrescente e ε o valor residual, podendo ser assumido como em zero em média para a mesma distribuição. É assumido então que a variância da distribuição é constante no tempo.

A análise do teste de Mann-Kendall é feita comparando-se valores de uma série sequencialmente um a um, quantificando as vezes em que um número posterior da série é maior que um anterior. É definida então a variável estatística S, denominada função sinal, que é a somatória dos sinais de diferença entre o valor observado, x_i , e o outro valor da série, x_j , para uma série com n termos, com $i, j \leq n$ com $i \neq j$.

São testadas duas hipóteses, a hipótese nula H_0 e a hipótese alternativa H_1 . No caso de H_0 , as variáveis aleatórias são independente e identicamente distribuídas. E, em H_1 , se assume que há uma tendência crescente ou decrescente monotônica no tempo. O que produz:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sin}al(x_i - x_j) \quad (1.5)$$

A função $\text{sin}al(x_i - x_j)$ é dada pela equação 1.6. Conforme n cresce, S converge para uma distribuição normal, com média do sinal constante e igual a zero.

$$\text{sin}al = \begin{cases} 1, se (x_i - x_j) > 0; \\ 0, se (x_i - x_j) = 0; \\ -1, se (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (1.6)$$

A variância é dada pela equação 1.7.

$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (1.7)$$

Com n sendo o número de observações, t_p o número de dados em dado grupo p e q o número de grupos com valores iguais em um grupo p .

Os valores de S e $VAR(S)$ são usados para calcular o teste estatístico Z :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}}, se S > 0; \\ 0, se S = 0; \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}}, se S < 0 \end{cases} \quad (1.8)$$

O valor de Z tem distribuição normal e indicará o comportamento da tendência, seja ele negativo ou positivo. Para valores de Z positivos, a tendência é crescente. Enquanto que para valores de Z negativos, a tendência se mostra decrescente.

A hipótese nula H_0 será rejeitada caso $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, α é o nível de significância e $Z_{1-\alpha/2}$ é o valor da distribuição normal padrão que pode ser obtido nas tabelas da distribuição cumulativa.

O teste de Sen é utilizado para estimar a inclinação de determinada tendência, produzindo um resultado médio de mudança por tempo, por exemplo. Esse método pode ser aplicado para os casos em que a tendência pode ser assumida como linear, estando na forma:

$$f(t) = Qt + B \quad (1.9)$$

em que Q é a inclinação e B uma constante.

Para definir a inclinação Q, é necessário calcular primeiro a inclinação de todos os valores em pares Q_i , com a seguir:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (1.10)$$

x_j é um valor x no tempo j e x_k é um valor x no tempo k , com $j > k$.

Para um dado valor n de x_j na série temporal, tem-se $N = n(n-1)/2$ Q_i . A estimativa da inclinação de Sen é a média desses N valores de Q_i . Os N valores de Q_i são classificados em ordem crescente ($Q_1 \leq Q_2 \leq \dots \leq Q_{N-1} \leq Q_N$) e então calcula-se a média de Q_i :

$$Q = \begin{cases} Q_{[(N+1)/2]}, & \text{se } N \text{ é ímpar} \\ \frac{1}{2} (Q_{[N/2]} + Q_{[N/2+1]}), & \text{se } N \text{ é par} \end{cases} \quad (1.11)$$

Um intervalo de confiança $100(1 - \alpha)\%$ da inclinação é obtido pela técnica não paramétrica baseada na distribuição normal. O método é válido para os casos em que n é tão pequeno quanto 10, a não ser que haja muitos valores repetidos.

O programa Makesens calcula o intervalo de confiança em dois níveis de confiança diferentes: $\alpha = 0.01$ e $\alpha = 0.05$.

Primeiro, é calculado:

$$C_\alpha = Z_{1-\alpha/2} \sqrt{\text{VAR}(S)} \quad (1.12)$$

em que $\text{VAR}(S)$ é definido pela equação 1.7 e $Z_{1-\alpha/2}$ é obtido pela distribuição normal.

Em seguida os limites superior e inferior do intervalo de confiança são calculados:

$$M_1 = (N - C_\alpha)/2 \quad (1.13)$$

$$M_2 = (N + C_\alpha)/2 \quad (1.14)$$

em que M_1 é o maior Q_i e M_2 o $(M_2 + 1)$ maior Q_i . Caso M_1 e M_2 não sejam números inteiros, os limites inferior e superior, respectivamente, são interpolados.

CAPÍTULO II

2. COMO REPERCUTEM AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

RESUMO

As ações antrópicas têm gerado uma preocupação universal devido aos seus efeitos na natureza, como por exemplo, as alterações climáticas no decorrer dos anos. Os estudos apresentados e avaliados neste artigo revelam as tendências climáticas em determinadas regiões do planeta e os impactos causados na produção de energia utilizando fontes renováveis. Foi identificado que alterações na temperatura do ar e da radiação solar podem reduzir a eficiência dos módulos fotovoltaicos. Para a geração de energia por meio de fonte eólica, as inconstantes mudanças na velocidade do vento também podem afetar a produção de energia. Entretanto, verificou-se que em determinadas regiões as mudanças no clima não influenciam a produção de energia, pois os principais fatores dominantes, quando modificados, entram em equilíbrio e geram neutralidade dos seus efeitos. Dessa forma, é importante destacar a necessidade do estudo de áreas específicas.

Palavras-chave: Tendências climáticas; Produção energética; Energias renováveis.

2.1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica se tornou um ingrediente essencial para a manutenção da vida humana. Os avanços nos índices de desenvolvimento socioeconômico, como o desemprego, a taxa de alfabetização e de mortalidade em um país, têm uma relação direta com o consumo de energia elétrica (GOLDEMBERG, 2006). Na era primitiva, a principal fonte para se obter energia era proveniente da lenha. A partir da Revolução Industrial, houve um crescimento da demanda, e a utilização de combustíveis fósseis ficou mais evidente. O aumento do consumo desses combustíveis na geração de energia elétrica tem contribuído para que o setor

de energia se tornasse o maior emissor de gases que provocam o efeito estufa (IPCC, 2015). Estudos do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014) apontam que o CO₂, emitido por fontes industriais e por combustão para aproveitamento energético, contribuiu com cerca de 78% no aumento das emissões entre 1970 e 2010. Caso a tendência atual de emissões se perpetue, a temperatura média do ar poderá chegar a ser 4,8 °C maior no período 2081-2100 do que no período 1986-2005 (IPCC, 2014).

Segundo o *Met Office UK* (2018), ao longo das últimas décadas foi possível verificar uma crescente associação entre as mudanças climáticas como uma ameaça para o planeta como um todo. O ano de 2017 se apresentou como o ano mais quente da história sem o fenômeno natural *El Niño*, sendo o terceiro mais quente dos registros históricos, atrás apenas de 2015 e 2016. Quando comparado com momentos anteriores, antes das operações industriais, 1850- 1900, o ano de 2017 mostra um aumento em sua temperatura média de $1,1 \pm 0,1$ °C, e um aumento de $0,38 \pm 0,1$ °C em relação ao período 1981-2010 (MET OFFICE UK, 2018).

Neste contexto, surge a necessidade de buscar fontes alternativas de energia. A principal vantagem na utilização dessas fontes é a redução dos impactos ambientais, que, apesar de não os eliminar totalmente, os prejuízos são bem menores. Esse fato é facilmente comprovado, uma vez que 85,52% da energia consumida no mundo em 2016 teve como fonte combustíveis fósseis (derivados do petróleo, gás natural e carvão mineral), contra 3,19% em fontes renováveis, 6,86% hidroelétrica e 4,46% nuclear (GLOBAL, 2017). Mesmo que ainda tenha pequena participação na matriz energética mundial, as fontes renováveis apresentaram um crescimento de 17% em relação ao ano de 2016, atingindo a marca de 69 Mtoe (milhões de toneladas equivalentes de petróleo) (GLOBAL, 2017)

A utilização de energias renováveis apresenta uma boa saída para a mitigação dos efeitos do aquecimento global. Segundo Liu *et al.* (2011), as fontes renováveis têm grande potencial de mitigação de CO₂ e cumprem um papel importante na regulação dos gases do efeito estufa no setor de eletricidade da China. Esses autores projetam que em 2050 haverá um potencial de mitigação de 4000 Mt CO₂ por meio do uso de fontes renováveis. Chiu e Chang (2009) avaliaram em quanto as fontes renováveis devem participar na produção de energia mundial, chegando à conclusão de que o crescimento econômico global irá acelerar a emissão de CO₂, que seria vinculado a um aumento na demanda de combustíveis fósseis. É então sugerido às autoridades que, para que haja uma mitigação inicial das emissões de

CO₂, a parcela de energia fornecida por fontes renováveis no mundo deve chegar a marca de 8,39% (CHIU; CHANG, 2009).

No sentido de otimizar a utilização dessas energias renováveis e poder fazer previsões, análises do impacto das mudanças climáticas devem ser feitas. As variações climáticas também podem afetar o equilíbrio da fauna e da flora. Naturalmente, os seres vivos têm a capacidade de se adaptarem ao meio em que vivem. Porém, quando as mudanças no clima são repentinas e com uma maior intensidade, há uma maior dificuldade de adaptação, e por esse motivo, muitas espécies têm entrado em extinção. De forma equivalente acontece com as fontes renováveis de energia, onde seu desempenho é sensível às mudanças no clima local. Portanto, é importante avaliar que tipo de informação pode ser proporcionada pelas tendências climáticas e como estas podem impactar na produção de energias renováveis.

2.2. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é produzir uma revisão de literatura, buscando estruturar informações sobre como se comporta a produção de energias renováveis no mundo levando em consideração as mudanças climáticas.

2.3. METODOLOGIA

Uma busca sistemática de artigos científicos foi feita no Portal CAPES de Periódicos e no Google Acadêmico, tanto na língua inglesa quanto na portuguesa. Foram usados os descritores: *Climatic Trend*, *Impact of Climate Change* e *Renewable Energy*, assim como seus sinônimos correspondentes em português, além do operador booleano *AND* para encontrar os trabalhos que relacionassem discussões dos impactos climáticos em energias renováveis.

- Critérios de Inclusão

Incluíram-se estudos que avaliassem especificamente o impacto da mudança de variáveis climáticas na produção de eletricidade em sistemas energéticos renováveis. Só foram considerados artigos referentes a energia solar fotovoltaica, eólica e térmica.

- Critérios de Exclusão

Foram excluídos da revisão artigos que avaliaram outros tipos de sistemas energéticos renováveis.

- Análise

Inicialmente, foi realizada uma triagem a partir da análise dos títulos e resumos localizados na busca. Posteriormente, todos os estudos que se apresentaram pertinentes ao tema foram obtidos na íntegra e analisados separadamente. Por fim, os artigos analisados e selecionados, seguindo os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos, foram incluídos na sistematização dos dados após reunião de consenso. As listas de referências de todos os artigos foram consultadas, na tentativa de encontrar novos estudos para esta revisão.

2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os estudos realizados nos artigos lidos e avaliados neste trabalho convergem com relação à identificação de alterações climáticas que o planeta vem apresentando, provocados, sobretudo, pela ação humana. As regiões pesquisadas envolveram, em sua maioria, os países considerados desenvolvidos, onde a utilização de energias renováveis está mais disseminada. Foram avaliadas as tendências climáticas para os próximos anos, bem como seus efeitos na geração de energia.

A estratégia de busca elaborada forneceu um total de 48 estudos. Após a triagem pela leitura dos títulos e resumos, 22 estudos foram considerados potencialmente elegíveis e lidos na íntegra pelos avaliadores. Ao término das análises, 16 artigos preencheram todos os critérios de inclusão para o estudo: Cutforth (2007), de Lucena (2010), Crook (2011), Cradden (2012), Nolan (2012), Pereira (2013), Pašičko (2012), Burnett (2014), Fant (2015), Jerez (2015), Tobin (2015), Invidiata (2016), Souza (2016), Wild (2015), Abrahão (2017), e Silva (2018). Os estudos selecionados foram publicados entre os anos de 2007 e 2018.

Dentre os estudos selecionados, oito foram realizados em países desenvolvidos (Canadá, Reino Unido, Irlanda, Estados Unidos, China, Austrália, Alemanha, Espanha) e sete em países em desenvolvimento (Brasil, Croácia, Argentina, Arábia Saudita, Argélia,

África do Sul, Índia). Os objetivos dos autores tiveram em comum avaliar o desempenho do sistema implementado.

A continuação serão apresentados brevemente cada estudo, juntamente com as particularidades de cada estrutura, e os parâmetros de desempenho.

O estudo de Cutforth e Judiesch (2007) realizado na região das pradarias do Canadá, utilizando os parâmetros de radiação solar, luz do sol e de dados climáticos identificou as tendências de energia solar no período entre 1955 e 2005. Os resultados obtidos detectaram uma tendência de queda na radiação solar média anual recebida. Já a temperatura média anual e o número anual de precipitação sofreu uma tendência de crescimento. Não houve nenhuma tendência na média anual de horas de sol diárias. Além disso, a pesquisa verificou que, quando há um aumento do número anual de precipitações e chuvas, reduz-se a radiação solar média diária recebida. Porém, quando consideramos a média anual da intensidade da precipitação, há um aumento da insolação diária. Desde os anos 1951, a temperatura do ar na região das pradarias do Canadá vem sofrendo aumentos consecutivos. Os dados apontam que, a temperatura média máxima e mínima tem aumentado cerca de 0,23 e 0,27 °C, respectivamente, a cada década. A radiação solar média anual passou por uma redução de 8% entre os anos de 1958 e 2005, passando de 13,5 para 12,4 MJ/m².d.

As nuvens tem a capacidade de absorver comprimentos de ondas particulares (infravermelho), como também de refletir e difundir uma parcela da radiação solar (IQBAL, 2012). Com isso, elas são consideradas como o fator que exerce maior influência na modificação da radiação solar de superfície (LIEPERT, 2002; STANHILL; COHEN, 2005). Além da nebulosidade, os componentes atmosféricos de vapor de água e aerossóis também interferem na transmissividade atmosférica e, por consequência, no valor médio da radiação solar global (STANHILL, 2005). As cargas de aerossol disseminam e absorvem as radiações que atravessam até as nuvens, reduzindo a energia solar que alcançam a superfície (LIEPERT, 2002; PINKER *et al.*, 2005).

De Lucena *et al.* (2010) analisaram impactos climáticos no potencial eólico no Brasil, usando os cenários do IPCC A2 e B2. O modelo de circulação geral utilizado foi o HadCM3, promovendo um resultado que indica que o potencial brasileiro não será prejudicado, segundo os cenários estudados, mas sim apresentará melhoras, especialmente na costa

Nordeste do país. As velocidades médias de vento aumentarão nas regiões costeiras e nas regiões Norte e Nordeste.

Crook *et al.* (2011) examinaram, ao longo do século 21, como a temperatura e a insolação afetariam a produção de energia fotovoltaica e de concentração solar, em um cenário projetado de mudanças climáticas, IPCC SRES A1B. Obtendo-se que, para o período entre 2010 e 2080, a produção fotovoltaica na Europa e na China crescerá poucos pontos percentuais devido aos fatores climáticos estudados, enquanto países como Argélia e Austrália apresentariam poucas mudanças e Estados Unidos e Arábia Saudita teriam decréscimo em poucos pontos percentuais. Já para as plantas de concentração solar, no mesmo período avaliado, a produção apresenta possível acréscimo de cerca de 10% na Europa, um aumento menos significativo na China, Argélia e Austrália, e por outro lado, um decréscimo no oeste dos Estados Unidos e Arábia Saudita. Verificou-se que a concentração solar tem variação mais sensível às mudanças climáticas que a energia fotovoltaica.

Cradden *et al.* (2012) utilizaram um método para obter perspectivas sobre como o vento no Reino Unido se comportará com a influência do clima e como se relaciona com os padrões atuais de ventos na região, que tem alto potencial eólico por ter uma das maiores médias de velocidade de vento na Europa. Contudo, as mudanças climáticas têm o potencial de alterar essa capacidade eólica, pois reduções na velocidade média do vento provocam uma queda da produção de potência. O modelo de previsão utilizado leva em consideração a velocidade geostrófica, ou seja, usa a velocidade do vento teórico sem atrito, e que os dados climáticos de vento possuem baixa resolução, assim não representando fielmente dados em locais específicos. Apresentando impactos mais significativos no verão, em todos os cenários climáticos considerados, com diminuição de 10% a 20% da velocidade do vento entre os meses de Julho e Agosto. No entanto, no inverno, há uma compensação com um acréscimo de 3% a 12% no mês de Janeiro. O resultado para todos os cenários reforça um agravamento nas condições já existentes relativas às estações do ano no padrão de ventos do Reino Unido, há um decréscimo no verão e um crescimento no inverno.

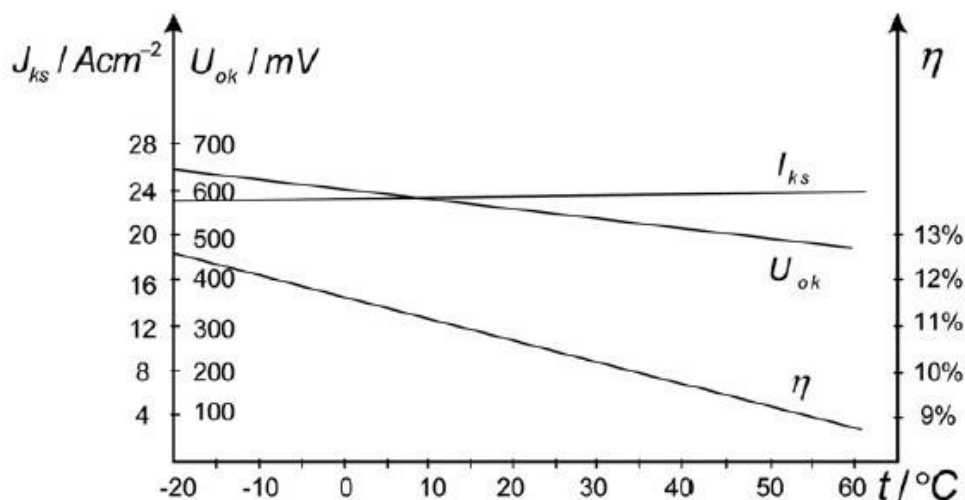
Nolan *et al.* (2012) usaram um conjunto de modelos *Regional Climate Model* (RCM) para avaliar o impacto das mudanças climáticas na produção eólica na Irlanda. As simulações foram feitas para dois períodos 1961-2000 e 2021-2060, usando os cenários de emissão do IPCC A1B, A2, B1 e B2. O resultado obtido foi a percepção do aumento de potencial de vento futuro no inverno e decréscimo no verão, com significância estatística,

mostrando uma performance futura 4% a 10% superior no inverno e 5% a 14% inferior no verão.

Pereira *et al.* (2013) avaliaram os impactos das mudanças climáticas na densidade de energia eólica no Brasil, através da aplicação de modelo de previsão climática, Eta-HadCM3, e análise de tendências sobre séries temporais climatológicas. Os resultados indicaram que, para o cenário A1B do IPCC, há uma tendência de crescimento de 15% a 30% do potencial eólico, mais acentuado no outono (entre Março e Maio) para grande parte da região Nordeste do país, exceto na costa da Bahia. A região Sul apresentou um crescimento de cerca de 10%, com alta variabilidade entre estações, atingindo um mínimo no verão (entre Dezembro e Fevereiro) e um crescimento durante o restante do ano. Por fim, o estudo aponta uma tendência de crescimento favorável tanto no Nordeste como no Sul.

Pašičko *et al.* (2012) avaliaram a interferência das mudanças do clima na produção de energia elétrica fotovoltaica na Croácia. Eles constataram que a irradiação global possui um vínculo importante com a porcentagem de nuvens e, com isso, perceberam que onde houver um menor volume de nuvens, haverá uma maior capacidade de absorção dos módulos fotovoltaicos e, por conseguinte, uma maior geração de eletricidade. O estudo identificou uma redução de 1 a 3 % da cobertura média de nuvens na parte Sul da Croácia. Essa redução provocou um aumento da irradiância e na produção de energia em até 2%. Já os resultados de temperatura média do ar indicaram um aumento geral no futuro, principalmente no verão. O valor esperado para esse crescimento no período de 2041 a 2070 é de 3,5°C. Assumindo uma temperatura de 25 °C, se houver um incremento no valor da temperatura média em 1°C, a eficiência do painel reduziu 0,5%. Na figura 2.1 é possível verificar o comportamento da eficiência dos módulos fotovoltaicos (η , em %) em decorrência da elevação da temperatura do ar (t , em °C). Diante disso, o estudo concluiu que não há impacto significativo causado por essas modificações climáticas na região analisada, tendo em vista que os principais fatores dominantes, quando modificados, entram em equilíbrio e geram neutralidade dos seus efeitos.

Figura 2.1 - Redução da eficiência de geração de eletricidade em módulos fotovoltaicos, devido ao aumento da temperatura externa (I_{ks} refere-se a densidade de corrente, U_{ok} é potencial elétrico e η refere-se a eficiência da geração de eletricidade).



Fonte: Adaptado de Pašičko (2012).

Burnett *et al.* (2014) investigaram a irradiação solar no Reino Unido em situações climáticas atuais e futuras. A situação atual foi avaliada baseada na observação de 30 anos de dados climáticos históricos de médias mensais de irradiação, e promoveu um resultado de $101,2 \text{ W/m}^2$ até $128,4 \text{ W/m}^2$ no sul da Inglaterra e $71,8 \text{ W/m}^2$ no noroeste da Escócia. A tendência apontada foi que nas regiões de maior irradiação terá um aumento desse recurso solar, enquanto a região de menor irradiação experimentará um decréscimo desse recurso. Estipulando um cenário futuro de altas emissões, o Reino Unido terá um aumento de irradiação solar de cerca de 3,6% em 2050 (numa faixa de -0,9% a 8,5%) e 4,4% em 2080 (numa faixa de -1,9% a 11,2%). Proporcionando um lado positivo para a viabilidade de tecnologias solares, porém uma crescente necessidade de refrigeração devido ao aumento de temperatura.

Fant *et al.* (2015) apresentaram um método estimativo, combinando modelos climáticos do *Integrated Global Systems Model* (IGSM) e *Coupled Model Intercomparison Project phase 3* (CMIP- 3), de quanto pode impactar as mudanças climáticas na produção de energia eólica e solar, mostrando que, no sul da África, a velocidade do vento e irradiação global horizontal não apresentarão mudanças médias significativas em 2050.

Jerez *et al.* (2015) estudaram o impacto futuro das mudanças climáticas na Europa na geração de energia fotovoltaica, fazendo uso de modelos climáticos, e mostraram que, em

certas partes mais ao norte do continente haveria uma diminuição da produção energética, enquanto a porção mais ao sul teria um aumento, não sendo então uma ameaça para esse setor. Porém isso evidencia que localmente haverá alterações.

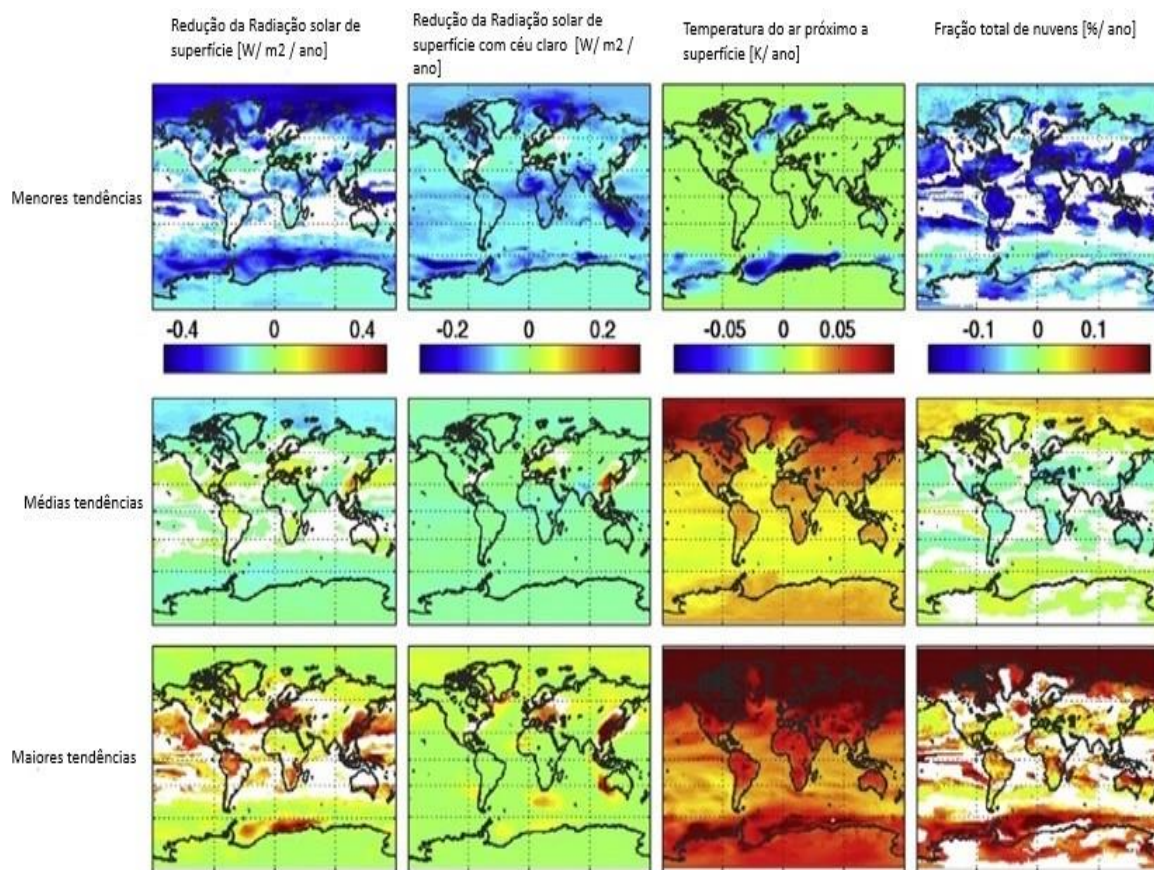
Tobin *et al.* (2015) avaliaram o potencial de produção de energia elétrica eólica na Europa e a efetividade dos parques eólicos já em atividade até o fim de 2012 e os planejados até 2020, levando em consideração futuras alterações climáticas. Exibindo, com alto nível de confiança, para um cenário climático IPCC A1B, o potencial eólico será alterado de ± 15 e $\pm 20\%$ no meio e fim do século, respectivamente. É percebida então uma tendência de diminuição de potencial eólico nas regiões do Mediterrâneo e uma tendência de aumento de potencial no Norte Europeu. De maneira geral, levando em conta a média dos efeitos, as alterações climáticas não provocarão prejuízos ou favorecimento da produção eólica europeia como um todo, porém levanta o fato de possibilidade de otimização do potencial eólico, visto que algumas regiões apresentam tendências negativas.

Invidiata e Ghisi (2016) estudaram os impactos climáticos futuros em edificações nas cidades de Curitiba, Florianópolis e Belém, e especularam que em 2080 o desconforto térmico ao longo de um ano em uma residência popular, comparado ao ano de 2016, crescerá em 219%, 218% e 106%, respectivamente, assinalando uma necessidade futura de gastos com energia térmica acima dos praticados atualmente. Souza *et al.* (2016) investigou o comportamento das variações média mensais da radiação solar e o coeficiente de transmissividade atmosférico (Kt) em 16 regiões do estado do Mato Grosso. O Kt é obtido pela razão entre a irradiação solar global e a irradiação atmosférica no topo. Os dados obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) entre os anos de 2008 e 2014 demonstraram que na estação seca da região, que corresponde aos meses de Abril a Setembro, houve a constatação dos maiores índices desse coeficiente. Esse fato se deve a baixa interferência na radiação solar pelos elementos atmosféricos. Já no período chuvoso, onde os constituintes atmosféricos atuam de forma mais contundente, através do aumento do teor de vapor de água e concentração de nuvens, ocorreu uma redução do Kt. No entanto, mesmo no período da seca, alguns municípios apresentaram uma redução da transmissividade atmosférica comparada com a média da região, o que pode ser explicado pela influencia dos aerossóis presentes na atmosfera, especialmente, em virtude da ocorrência de incêndios ambientais comuns nesse período do ano.

Wild *et al.* (2015) examinaram as principais alterações nos elementos climáticos relacionados com a produção de energia solar fotovoltaica através de modelos climáticos criados usados no último relatório do IPCC. A Fig. 2, representa as projeções de mudanças globais entre os anos de 2006 e 2049 da radiação solar de superfície total e clara, temperatura do ar e nebulosidade, tomando como referência 39 modelos climáticos. Os dados climáticos encontrados juntamente com as tendências climáticas foram determinados a partir dos seus valores extremos. As áreas brancas indicam que as tendências encontradas para essas regiões através do teste t, com nível de significância de 0,05, são estatisticamente não-significativos. A temperatura do ar considerando as médias tendências, mostra um aquecimento de 0,05 K/ano na latitude norte sobre o continente e cerca de 0,02 K/ano sobre os oceanos. Essa diferença é explicada pela maior capacidade térmica dos oceanos.

O modelo aponta para um resfriamento por volta de 0,1 K/ano nas regiões da Antártica e do Atlântico Norte. Nesse estudo, as regiões apontadas como sendo as mais favoráveis a produção solar foram: Argélia, Austrália, Califórnia, Noroeste da China, Alemanha, Índia, África do Sul e Espanha. Para essas regiões a projeção é de um aquecimento de 0,05 K/ano nas décadas seguintes. Considerando constante a radiação nessa mesma região, teríamos uma redução da energia solar utilizadas por placas fotovoltaicas, devido a sua relação negativa com a temperatura. A tendência média de radiação solar com o céu claro é de decréscimo em praticamente todo o mundo. Duas principais regiões possuem uma projeção de aumento, a saber: Leste e Centro da Europa e o Sudeste da China. Esse resultado é proveniente de uma possível redução na concentração de aerossóis. A porcentagem total de nuvens tende a diminuir cerca de 0,5%/ano, especialmente nos subtrópicos entre 20 e 40 de latitude nos dois hemisférios.

Figura 2.2 - Mapa global com a distribuição das tendências (menores, médias e maiores) climáticas entre os anos de 2006 e 2049.



Fonte: Adaptado de WILD (2015).

Abrahão *et al.* (2017) avaliaram o desempenho de aerogeradores e sistemas fotovoltaicos na cidade de Patos e Sousa, no Sertão Paraibano. Levando em consideração as tendências climáticas dos locais, confrontando dados do período 1970-1980 versus 2004-2014, foram verificadas produções elétricas a partir de fontes eólicas mais baixas no último período, em magnitudes de -38% em Patos e -88% em Sousa. A temperatura média anual na cidade de Patos aumentou cerca de 0,04 °C/ano, entretanto, esse crescimento se restringiu aos meses de Abril e Agosto. A redução da velocidade média do vento durante nos meses de Junho a Setembro e ainda, em Janeiro e Dezembro, provocou uma queda considerável na geração elétrica pelo método eólico. Para o sistema fotovoltaico, não houve alterações significativas, visto que o aumento da temperatura média foi compensado pela diminuição da nebulosidade.

Silva *et al.* (2018) verificaram que na Zona da Mata Paraibana, observando mudanças climáticas históricas de 1961 até 2014, a produção de energia elétrica fotovoltaica foi muito pouco afetada. Os valores da temperatura média mensal sofreram uma tendência de aumento em todo o período, porém, não houve alterações bruscas ao longo do período analisado, e por isso não houve uma modificação significativa na eficiência dos dois modelos de painéis fotovoltaicos testados.

2.5. CONCLUSÃO

Após a análise dos artigos apresentados, constatou-se que há um comportamento diferente nas regiões estudadas de interferência das mudanças climáticas na produção de energias renováveis. Porém, ainda não há um comportamento padrão, embora os resultados apontem para influências mais acentuadas em certos períodos do ano na maioria das regiões do planeta. Percebeu-se que em algumas localidades a produção de eletricidade tende a permanecer inalterada, ou com pouca alteração, devido aos efeitos de compensação dos fatores e dos elementos climáticos. Esses efeitos apontam para o fato de que a otimização da matriz energética renovável deve passar por uma análise de impactos climáticos em locais mais específicos, visando aproveitar ou evitar os efeitos climáticos em parâmetros que influenciam na produção energética.

Trabalhos futuros dos autores buscarão aprofundar conhecimento nas tendências climáticas de localidades específicas da Paraíba, por meio da obtenção de dados climáticos, e estimar a produção de eletricidade por meio de sistemas energéticos renováveis para verificar a vulnerabilidade destes sistemas às mudanças climáticas detectadas.

2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHÃO, R.; PEIXOTO, I. M. B. M.; CARVALHO, M. Solar or wind energy for the Brazilian semiarid - Climatic characterization and future trends. p. 1–12, 2017. INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS, 30., 2017,

San Diego. **Anais...** San Diego: [s.n.], 2017.

BURNETT, D.; BARBOUR, E.; HARRISON, G. P. The UK solar energy resource and the impact of climate change. **Renewable Energy**, v. 71, p. 333-343, 2014.

CHIU, C. L.; CHANG, T. H. What proportion of renewable energy supplies is needed to initially mitigate CO₂ emissions in OECD member countries? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 6/7, p. 1669-1674, 2009.

CRADDEN, L. C.; HARRISON, G. P.; CHICK, J. P. Will climate change impact on wind power development in the UK? **Climatic change**, v. 115, n. 3-4, p. 837-852, 2012.

CROOK, J. A.; JONES, L. A.; FORSTER, P. M.; CROOK, R. Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. **Energy & Environmental Science**, v. 4, n. 9, p. 3101-3109, 2011.

CUTFORTH, H. W.; JUDIESCH, D. Long-term changes to incoming solar energy on the Canadian Prairie. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 145, n. 3-4, p. 167-175, 2007.

DE LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A. S.; SCHAEFFER, R.; DUTRA, R. M. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v. 35, n. 5, p. 904-912, 2010.

FANT, C.; SCHLOSSER, C. A.; STRZEPEK, K. The impact of climate change on wind and solar resources in southern Africa. **Applied Energy**, v. 161, p. 556-564, 2015.

GLOBAL, British Petroleum. BP statistical review of world energy June 2017. Relatório. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>>. Acesso em: 20 jul. 2018)

GOLDEMBERG, J. The promise of clean energy. **Energy Policy**, v. 34, n. 15, p. 2185-2190, 2006.

INVIDIATA, A.; GHISI, E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 20-32, 2016.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

IPCC. 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, 2014.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2014: Mitigation of climate change. Cambridge University Press, 2015.

IQBAL, M. An introduction to solar radiation. **Elsevier**, 2012.

JEREZ, S.; TOBIN, I.; VAUTARD, R.; MONTÁVEZ, J. P.; LÓPEZ-ROMERO, J. M.; THAIS, F.; BARTOK, B.; CHRISTENSEN, O. B.; COLETTE, A.; DÉQUÉ, M.; NIKULIN, G.; KOTLARSKI, S.; VAN MEIJGAARD, E.; TEICHMANN, C.; WILD, Martin. The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. **Nature communications**, v. 6, p. 10014, 2015.

LIEPERT, B. G. Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990. **Geophys. Res. Lett.**, v. 29, n. 10, p. 1421, 2002.

LIU, T.; XU, G.; CAI, P.; TIAN, L.; HUANG, Q. Development forecast of renewable energy power generation in China and its influence on the GHG control strategy of the country. **Renewable Energy**, v. 36, n. 4, p. 1284-1292, 2011.

MET OFFICE - Meteorological Office, Weather and Climate Change, 2018. Disponível em: <<https://www.metoffice.gov.uk/news/releases/2018/2017-temperature-announcement>>. Acesso em: 17 jul. 2018.

NOLAN, P.; LYNCH, P.; MCGRATH, R.; SEMMLER, T.; WANG, S. Simulating climate change and its effects on the wind energy resource of Ireland. **Wind Energy**, v. 15, n. 4, p. 593- 608, 2012.

PAŠIČKO, R.; BRANKOVIĆ, Č.; ŠIMIĆ, Z. Assessment of climate change impacts on energy generation from renewable sources in Croatia. **Renewable Energy**, v. 46, p. 224-231, 2012.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; PES, M. P.; DA CRUZ SEGUNDO, E. I.; LYRA, A. D. A. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, v. 49, p. 107-110, 2013.

SILVA, L. P.; MEDEIROS, S. E. L.; SILVA, W. K. M.; ABRAHÃO, R. Tendências climáticas na mesorregião da Mata Paraibana e sua influência na produção de energia fotovoltaica. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, p. 90-101, 2018.

SOUZA, A. P. D.; ZAMADEI, T.; MONTEIRO, E. B.; CASAVECCHIA, B. H. Transmissividade Atmosférica da Radiação Global na Região Amazônica de Mato Grosso.

Rev. Bras. Meteorol., v. 31, n. 4, suppl. 1, p. 639-648, 2016.

STANHILL, G.; COHEN, S. Solar radiation changes in the United States during the Twentieth century: evidence from sunshine duration measurements. **J. Clim.**, v. 18, p. 1503-1512, 2005

TOBIN, I.; VAUTARD, R.; BALOG, I.; BRÉON, F.; JEREZ, S.; RUTI, P. M.; THAIS, F.; VRAC, M.; YIOU, P. Assessing climate change impacts on European wind energy from ensembles high-resolution climate projections. **Climatic Change**, v. 128, n. 1/2, p. 99-112, 2015.

WILD, M.; FOLINI, D.; HENSCHER, F.; FISCHER, N.; MÜLLER, B. Projections of longterm changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 116, p. 12-24, 2015.

CAPÍTULO III

3. AVALIAÇÃO DE TENDÊNCIAS DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL NA CIDADE DE JOÃO PESSOA, PARAÍBA

RESUMO

Já é comprovado que a atividade humana influencia no sistema terrestre como um todo, provocando alterações na atmosfera e oceanos que levam a alterações climáticas. Sendo o principal responsável por isso a presença de dióxido de carbono na atmosfera, proveniente, em sua maior parte, da queima de combustíveis fósseis. A radiação global é um parâmetro importante para a geração de energia renovável, e portanto é imprescindível o estudo de seu comportamento ao longo dos anos. O presente estudo estabelece o comportamento e a evolução do parâmetro radiação global para a cidade de João Pessoa, na Paraíba, por meio da análise estatística de tendências de séries temporais. Dados históricos da radiação global de João Pessoa foram obtidos da estação meteorológica automática do INMET A-320 e foram compilados, tratados e analisados, e suas tendências climáticas investigadas. Com auxílio do programa Makesens, foram aplicados os testes de Mann-Kendall e Sen para a análise de tendências. Nenhuma tendência anual estatisticamente significativa foi identificada no período estudado, 2007-2018, embora para o mês de novembro haja um crescimento estatisticamente significativo de $1,2 \text{ W/m}^2/\text{ano}$ no parâmetro radiação global, apontando para necessidade de um espaço amostral maior.

Palavras chave: Mudanças climáticas; energia renovável; tendência climática

3.1. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, discussões sobre mudanças climáticas e seus impactos obtiveram centralidade no mundo, mostrando crescente associação entre essas mudanças e o risco que submetem ao planeta. Para o *Met Office UK* (2018), o ano de 2017 foi o ano mais quente da história sem o fenômeno natural *El Niño*, o que o elenca como terceiro mais quente dos registros históricos, atrás apenas de 2015 e 2016. Estabelecendo um comparativo entre o período de 1850-1900 e o ano de 2017, nota-se uma evolução da temperatura média do ar de $1,1 \pm 0,1$ °C, sendo de $0,38 \pm 0,1$ °C o aumento em relação ao período de 1981-2010 (MET OFFICE UK, 2018). Já o ano de 2018 foi o quarto mais quente já registrado. O período 2015-2018 apresenta os quatro anos mais quentes, sendo 2018 o mais frio entre eles, com estimativa de $0,99 \pm 0,1$ °C acima da era pré-industrial, 1850-1900 (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2019).

Um fator preponderante nesse aumento da temperatura do ar do planeta Terra são os gases de efeito estufa, tais como dióxido de carbono e metano. O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC, 2014) aponta para a ampliação da participação desses gases na atmosfera no último século. O CO₂ emitido por fontes industriais e produção de energia contribuiu com cerca de 78% no aumento das emissões entre 1970 e 2010. No caso de conservação do atual cenário de emissões, a temperatura média do ar poderá chegar a ser 4,8 °C maior no final do século atual, 2081-2100, que no final do século anterior, 1986-2005 (IPCC, 2014).

No ano de 2016, 85,52% da energia consumida no mundo originou-se de combustíveis fósseis (sejam derivados do petróleo, gás natural e carvão mineral), enquanto 6,86% eram gerados por hidroelétricas, 4,46% nuclear e 3,19% fontes renováveis (BRITISH PETROLEUM, 2018). As fontes renováveis apresentaram um crescimento de 17% em relação ao ano de 2016, atingindo a marca de 69 Mtoe. Nesse sentido, surge a necessidade de buscar a utilização de fontes de energia que tenham potencial de mitigar consideravelmente os impactos ambientais.

A alteração de parâmetros climáticos leva a mudanças climáticas, gerando problemas ambientais de ordem mundial, também podendo interferir na produção de energias

renováveis, como mostraram Farias Neto *et al.* (2018). Em alguns locais, as mudanças climáticas beneficiam a produção de energia e, em outros, prejudicam. Isso indica que a avaliação das tendências é ferramenta de importância no processo de decisão para determinar a localização de usinas de energias renováveis.

Silva *et al.* (2018) verificaram que na Zona da Mata Paraibana, observando dados climáticos históricos de 1961 até 2014, a produção de energia elétrica fotovoltaica foi pouco afetada. Os valores da temperatura média mensal sofreram uma tendência de aumento em todo o período, porém, não houve alterações bruscas ao longo do período analisado, e por isso não houve uma modificação significativa na produção dos dois modelos de painéis fotovoltaicos testados.

Ao interagir com a atmosfera terrestre, a radiação solar sofre algumas alterações de direção e magnitude, dividindo-se basicamente em duas parcelas: direta e difusa. A direta é uma parcela que sofre poucas alterações de direção, enquanto a difusa tem sua direção modificada pelo espalhamento causado pela atmosfera. A radiação global corresponde a totalidade dessas duas parcelas, sendo o fluxo de radiação solar total em uma superfície horizontal (Duffie e Beckman, 2013). Bartók *et al.* (2017) compararam as projeções de quatro modelos climáticos regionais da Europa (CCLM, RCA4, WRF, ALADIN) com os modelos globais CMIP5, avaliando o impacto climático no parâmetro radiação global. Os autores obtiveram resultados discrepantes entre os modelos regionais e os globais. Os modelos regionais apresentaram média de decréscimo no parâmetro de $-0,60 \text{ W/m}^2$ por década, enquanto a média relacionada aos modelos globais provocaria aumento de $+0,39 \text{ W/m}^2$ por década, no período de 2006-2100. Essa diferença é atribuída à nebulosidade, visto que tal parâmetro apresenta tendência negativa de $-0,24\%$ por década nos modelos globais e nos modelos regionais nenhuma tendência significativa aparece. Impacto no parâmetro radiação global também pode ser verificado em Ruosteenoja *et al.* (2019) que avaliaram seu comportamento na Índia, usando modelos climáticos globais CMIP5, e concluíram que quando comparado com o período 1971-2000, o período 2030-2059 terá redução na radiação global entre $0,5\%$ e 4% . Conforme exposto, se mostra importante o entendimento da dinâmica do clima, avaliando tendências e fazendo projeções de parâmetros climáticos.

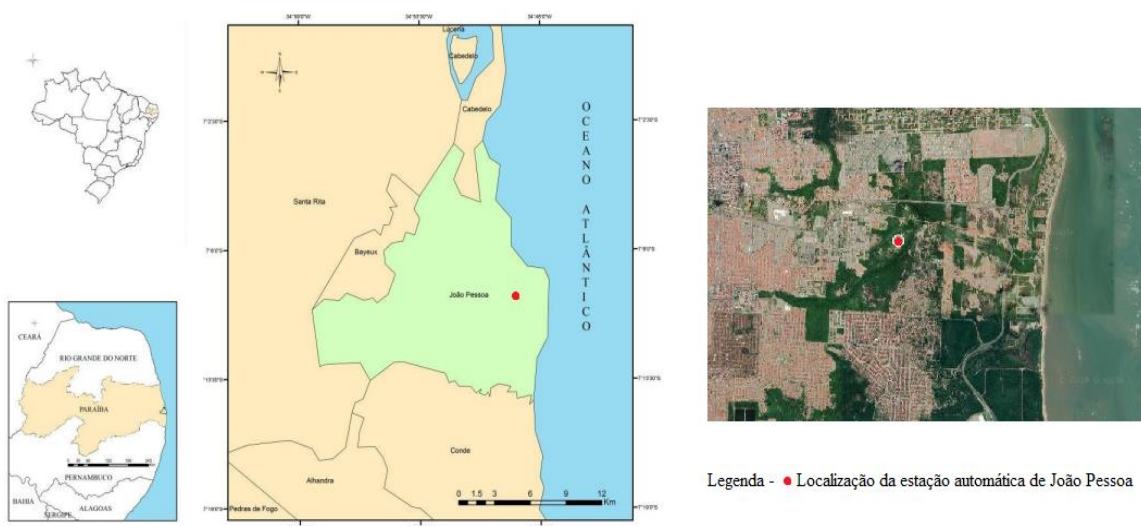
3.2. OBJETIVO

O presente estudo teve como objetivo entender o comportamento e a evolução do parâmetro radiação solar global para a cidade de João Pessoa (Paraíba), por meio da análise estatística de tendências de séries temporais desse indicador.

3.3. METODOLOGIA

A área de estudo selecionada foi a cidade de João Pessoa, capital e mais importante município do estado da Paraíba. Dados foram obtidos da estação meteorológica automática de João Pessoa, João Pessoa-A320, (código: OMM: 81918; latitude: -7.17° ; longitude: -34.82° ; altitude: 34 m), com localização apresentada na figura 3.1, referentes a todo seu período de registro do parâmetro radiação global, isto é, 2007 a 2018. Os dados dessa estação meteorológica foram fornecidos por meio de consulta ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Figura 3.1 – Localização da estação meteorológica automática de João Pessoa



Fonte: Adaptado de Silva (2014) e Google (2020)

A rede de estações meteorológicas automáticas do INMET emprega piranômetros da marca Kipp & Zonen, nos modelos CM6B e CPM6, com características técnicas similares. Seu funcionamento consiste numa aferição a cada cinco segundos, gerando 12 amostras ao longo de um minuto, dessas 12 amostras uma média é tomada e atribuída ao minuto. Ao fim

de cada hora, são somadas as médias referentes aos minutos e obtém-se assim a radiação global desse período.

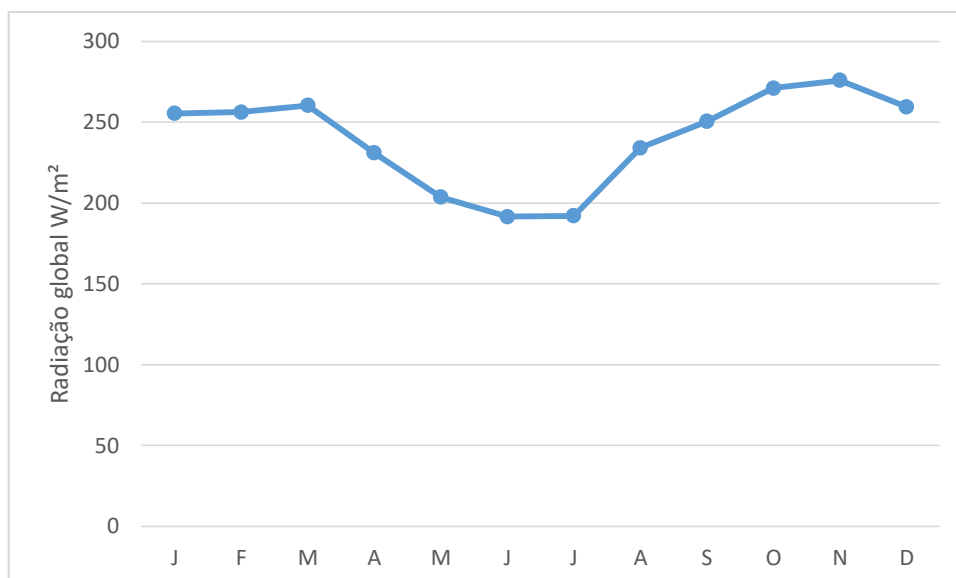
Os dados brutos recebidos do INMET passaram por um tratamento, em que foram dispostos em planilhas e organizados, tendo sido então submetidos a uma inspeção visual, que visava eliminar erros gerados por problemas técnicos de equipamentos da estação meteorológica.

Para a análise de tendências foram usados testes não paramétricos, pois os dados tanto mensais como sazonais não apresentaram distribuição normal. A aplicação dos testes estatísticos foi feita utilizando o programa Makesens, versão 1.0, considerando probabilidades de erro entre 0,1% e 10%. Os testes escolhidos para a análise foram o de Mann-Kendall e Sen, tendo o primeiro sido proposto inicialmente por Sneyers (1975), possibilitando avaliar a tendência estatística de uma série temporal. Mann-Kendall é tido como o modelo mais adequado para análise de mudanças climáticas em séries temporais (GOOSSENS; BERGER, 1986), enquanto o de Sen estima quantitativamente uma tendência pelo cálculo do declive de Sen (SALMI *et al.*, 2002).

3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

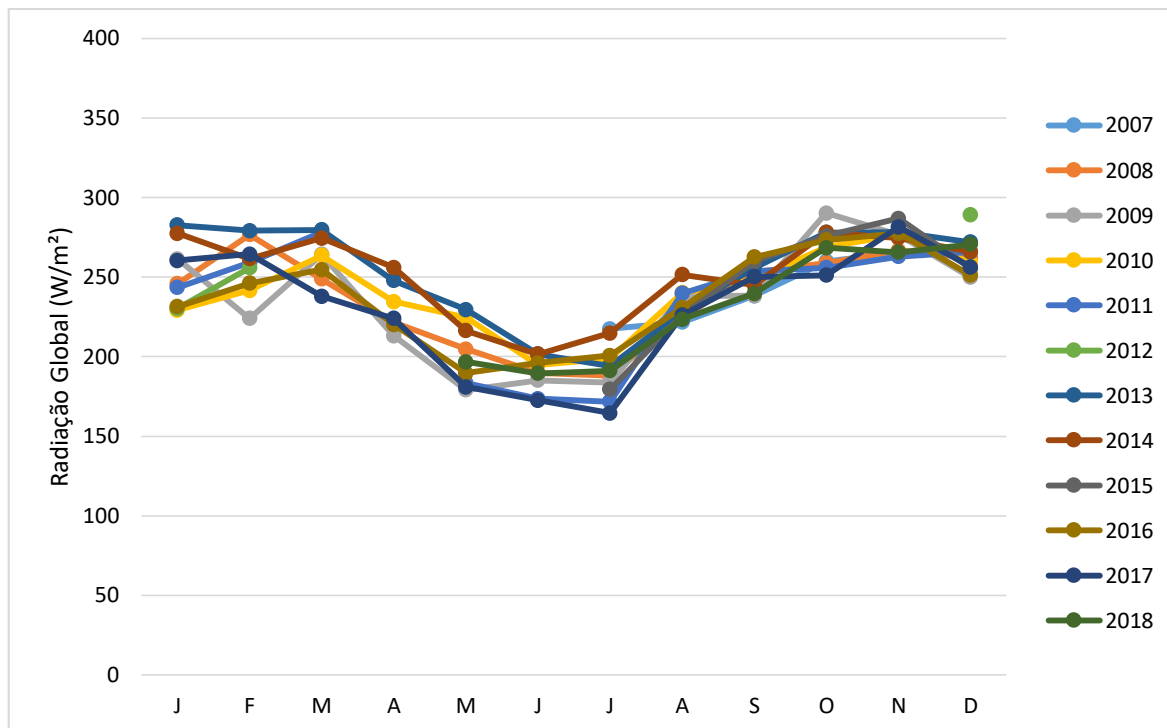
A análise dos dados, após tratamento, permitiu a caracterização da radiação global e a avaliação do comportamento e das tendências por meio das séries temporais. Com relação à caracterização, é possível perceber, conforme mostra a figura 3.2, valores máximos em meses de verão e mínimos em meses de inverno, com média anual de 240 W/m². Tal observação corresponde ao clima típico da cidade de João Pessoa, com invernos mais chuvosos. Verifica-se ainda que a média de radiação global chega ao valor máximo médio de 276 W/m² no mês de novembro e mínimo de 192 W/m² no mês de junho.

Figura 3.2 - Radiação global referente a um dia médio de cada mês do ano para a cidade de João Pessoa (Paraíba).



A dispersão das séries temporais do parâmetro pode ser verificada na figura 3.3, além da confirmação do padrão de comportamento ao longo do ano, com maiores valores no verão e menores no inverno. Também são apresentadas na figura 3.3 algumas séries incompletas, pelo motivo de não funcionamento do equipamento durante meses em alguns dos anos, com pico máximo de 290 W/m^2 no mês de outubro de 2009 e vale mínimo de 164 W/m^2 no mês de julho de 2017.

Figura 3.3 - Séries anuais da radiação global referentes a um dia médio de cada mês para a cidade de João Pessoa (Paraíba).



A tabela 3.1 apresenta a análise de tendências do parâmetro radiação global, usando o teste de Mann-Kendall e a declividade de Sen. Embora a avaliação visual dos gráficos das séries temporais indique uma dispersão, confirmada também pela declividade de Sen que indica uma alteração no parâmetro ao longo dos anos estudados, só um dos meses exibiu tendência estatisticamente significativa. O período observado apresentou tendência de decréscimo $0,6 \text{ W/m}^2/\text{ano}$ no parâmetro radiação global anualmente, porém não sendo estatisticamente significativo. A maior tendência de decréscimo foi a do mês de maio, $4,0 \text{ W/m}^2/\text{ano}$, enquanto o mês de abril apresentou o maior crescimento, $2,2 \text{ W/m}^2/\text{ano}$, ambos, entretanto, não estatisticamente significativos.

É possível notar um crescimento estatisticamente significativo ($p < 0,1$) do parâmetro apenas no mês de novembro, de $1,2 \text{ W/m}^2/\text{ano}$, o que aponta para dois cenários: o parâmetro radiação global parece ser pouco afetado por alterações climáticas ou a amostra de dados se mostrou insuficientemente grande para distinguir algum tipo de tendência. Essa última hipótese é a mais provável, já que a série disponível (2007 - 2018) foi excessivamente curta.

Tabela 3.1 - Tendências detectadas para a radiação global na cidade de João Pessoa (Paraíba) pelo teste de Mann-Kendall e quantificada pela declividade de Sen entre os anos 2007 e 2018.

Período	Radiação Global (W/m ² /ano)
Janeiro	0,7 ns
Fevereiro	1,5 ns
Março	-1,8 ns
Abril	2,2 ns
Maiο	-4,0 ns
Junho	0,4 ns
Julho	2,1 ns
Agosto	0,2 ns
Setembro	1,9 ns
Outubro	-2,3 ns
Novembro	1,2 +
Dezembro	-0,7 ns
Anual	-0,6 ns

ns = não significativo; +p<0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001

Ainda assim, o resultado está de acordo com Silva *et al.* (2018), que consideraram uma série temporal de 1961 – 2014 para a cidade de João Pessoa, e que, mesmo detectando aumento significativo na nebulosidade nos meses de Janeiro, Fevereiro e Dezembro, não apresentou tendência anual significativa para nebulosidade, usando dos mesmos testes estatísticos aplicados no presente estudo.

Quando feita a análise para a faixa horária de 11:00 às 13:00 horas, considerada pela grande contribuição de insolação no dia, apresentada na figura 3.4, percebe-se um comportamento similar ao dia médio completo, com média anual de 33 W/m². Tendo seu pico no mês de outubro com 37 W/m² e vale em junho com 28 W/m².

As tendências para a radiação global referente à média da faixa horária de 11-13 horas são apresentadas na tabela 3.2. Todos os meses mostraram tendência de crescimento, apontando tendência de crescimento anual de 0,4 W/m²/ano, embora sem significância

estatística. A maior tendência verificada ocorreu no mês de novembro, com crescimento de $0,8 \text{ W/m}^2/\text{ano}$, sendo a única estatisticamente significativa da análise ($p < 0,05$).

Esse recorte possibilita visualizar que, embora o dia médio completo tenha tendência anual negativa, a faixa horária estudada, responsável por grande parte dos maiores valores de radiação do dia, apresentou tendência de crescimento.

Figura 3.4 - Radiação global referente a média da faixa horária de 11-13 horas em um dia médio de cada mês do ano para a cidade de João Pessoa (Paraíba).

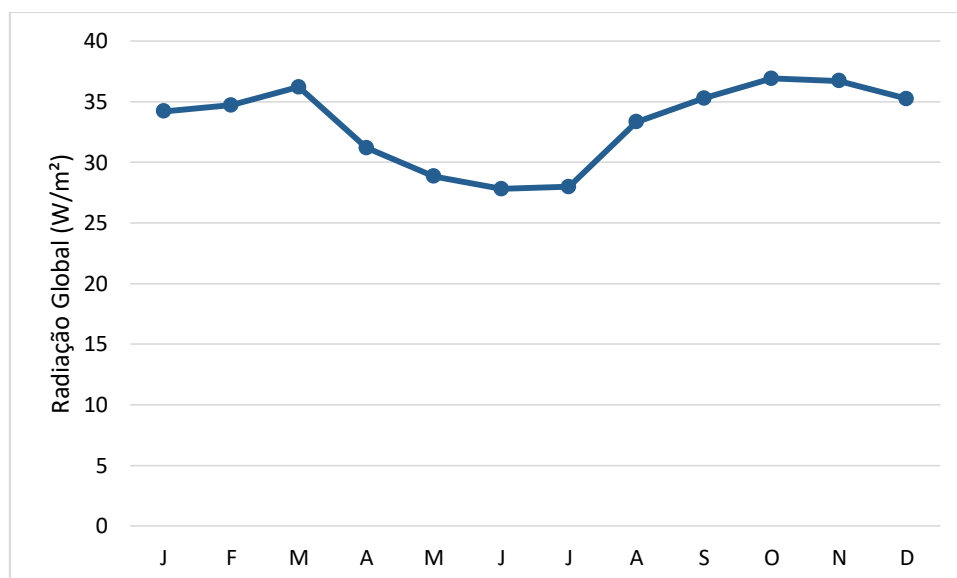


Tabela 3.2 - Tendências detectadas para a radiação global na cidade de João Pessoa (Paraíba) para a média da faixa horária de 11-13 horas pelo teste de Mann-Kendall e quantificada pela declividade de Sen entre os anos 2007 e 2018.

Período	Radiação Global (W/m ² /ano)
Janeiro	0,4 ns
Fevereiro	0,4 ns
Março	0,3 ns
Abril	0,6 ns
Maio	0,1 ns
Junho	0,2 ns
Julho	0,1 ns
Agosto	0,4 ns
Setembro	0,6 ns
Outubro	0,3 ns
Novembro	0,8 *
Dezembro	0,2 ns
Anual	0,4 ns

ns = não significativo; +p<0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001

Resultados de investigações feitas por outros grupos de estudo do mundo chegaram a resultados levemente diferentes. Remund e Müller (2010), utilizando de dados climáticos históricos globais do IPCC, com séries de 1950-2010, avaliaram as tendências da radiação global de diversos lugares no mundo, chegando a um valor estatisticamente significativo de -1,4 W/m²/década. Foram aplicados também 18 modelos climáticos do IPCC, considerando três cenários de emissões B1, A1B e A2, pôde-se estimar o parâmetro até 2100. A previsão é de que a radiação solar tenha decréscimo, chegando a -1,9% no período 2089-2099. Enquanto Allen *et al.* (2013), a partir de dados observacionais, calcularam as tendências de radiação na Europa para dois períodos, 1971-1986 e 1987-2007. O primeiro apresentou decréscimo de $-3,3 \pm 3,3$ W/m²/década, enquanto o segundo um aumento de $3,5 \pm 1,9$ W/m²/década.

Já as pesquisas que usam modelos climáticos para projeção da variação do parâmetro de radiação global apresentam resultados que indicam pouca alteração no futuro, como Wild *et al.* (2015) que, usando modelos climáticos globais CMIP5, estudaram as tendências de radiação global de céu limpo no planeta, prevendo para o período 2006-2049 uma tendência média ligeiramente negativa ou próxima de zero, variando entre $-0,1 \text{ W/m}^2/\text{ano}$ e $0,05 \text{ W/m}^2/\text{ano}$. Sendo atribuído ao declínio da massa de aerossóis na atmosfera. Estudo semelhante fizeram Bartók *et al.* (2017), comparando projeções de modelos globais e regionais com respeito ao parâmetro radiação global. Os modelos regionais apresentaram média de decréscimo no parâmetro de $-0,60 \text{ W/m}^2$ por década, enquanto a média relacionada aos modelos globais provocaria aumento de $+0,39 \text{ W/m}^2$ por década, no período de 2006-2100, apontando a tendência negativa de $-0,24\%$ por década na nebulosidade nos modelos globais como responsável. Usando também os modelos CMIP5, Ruosteenoja *et al.* (2019) avaliaram na Índia o mesmo parâmetro, indicando uma redução na faixa de $0,5\%$ a 4% , quando comparado o período 1971-2000 com 2030-2059.

Vale ressaltar que alguns estudos (DE LUCENA *et al.*, 2010; CROOK *et al.*, 2011; JEREZ *et al.*, 2015; FANT *et al.*, 2015; TOBIN *et al.*, 2015), que avaliam tendências climáticas e seus impactos sobre parâmetros meteorológicos e na produção de energias renováveis, aplicam abordagem diferente, uma vez que estes usam de modelos climáticos regionais ou globais para prognósticos futuros em diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa. A abordagem utilizada neste trabalho lança mão de séries históricas observacionais para a verificação de tendências já ocorridas para, a partir dessa informação, entender o impacto futuro na produção energética.

3.5. CONCLUSÃO

O estudo avaliou o comportamento do parâmetro radiação global na cidade de João Pessoa, no estado da Paraíba, investigando sobre a presença de tendências climáticas nas séries temporais estudadas, com dados provenientes de uma estação meteorológica automática local. Contribuindo para a compreensão do comportamento de um parâmetro meteorológico importante para a produção de energia solar, cujo impacto será investigado futuramente pelo grupo de pesquisa.

Nenhuma tendência anual significativa foi encontrada para o período de 2007 a 2018, nem quando considerado o dia médio completo nem em uma faixa horária do dia médio, embora o mês de novembro aponte para um crescimento estatisticamente significativo ($p < 0,1$) de $1,2 \text{ W/m}^2/\text{ano}$ para o dia médio e em novembro ($p < 0,05$) de $0,8 \text{ W/m}^2/\text{ano}$ para a faixa horária, resultado que corrobora com Silva *et al.* (2018). Isso, basicamente, levanta duas hipóteses: a pouca sensibilidade do parâmetro a alterações climáticas e o possível pequeno espaço amostral para realização satisfatória do estudo. É importante ressaltar a recente criação da estação automática de João Pessoa como fator preponderante, visto que a observação de efeitos climáticos necessita de um intervalo de tempo maior para avaliações mais exatas.

Há ainda escassez na produção científica desse tipo de estudo, por se tratar de um tópico pouco difundido e atual. Além disso, muitos dos estudos existentes costumam apresentar uma abordagem diferente da aplicada no presente trabalho, considerando modelos climáticos regionais e globais, em contraste com a utilização de dados reais observados.

3.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. J.; NORRIS, J. R.; WILD, Martin. Evaluation of multidecadal variability in CMIP5 surface solar radiation and inferred underestimation of aerosol direct effects over Europe, China, Japan, and India. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 12, p. 6311-6336, 2013.

BARTÓK, Blanka *et al.* Projected changes in surface solar radiation in CMIP5 global climate models and in EURO-CORDEX regional climate models for Europe. **Climate Dynamics**, v. 49, n. 7-8, p. 2665-2683, 2017.

BRITISH PETROLEUM. BP statistical review of world energy June 2018. Relatório. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-reviewof-world-energy.html>>. Acesso em: 04 jun. 2019)

CROOK, J. A.; JONES, L. A.; FORSTER, P. M.; CROOK, R. Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. **Energy & Environmental Science**, v. 4, n. 9, p. 3101-3109, 2011.

DE LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A. S.; SCHAEFFER, R.; DUTRA, R. M. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v. 35, n. 5, p. 904-912, 2010.

DELGADO, Rafael Coll *et al.* Cenários climáticos da radiação solar global baseados no modelo regional HadRM3 para o Estado do Acre. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 417-428, 2014.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar engineering of thermal processes**. John Wiley & Sons, 2013.

FANT, C.; SCHLOSSER, C. A.; STRZEPEK, K. The impact of climate change on wind and solar resources in southern Africa. **Applied Energy**, v. 161, p. 556-564, 2015.

FARIAS NETO; SILVA JUNIOR, J. M.; ABRAHÃO, RAPHAEL; CARVALHO, M. . Como repercutem as mudanças climáticas na produção de energias renováveis? In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade - Congestas 2018, 2018, João Pessoa. **Anais do Congestas 2018**, 2018.

GOOGLE, INC. Google Maps. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/7%C2%B009'55.5%22S+34%C2%B048'56.3%22W/@-7.1689881,-34.8169907,5918m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x0:0x0!8m2!3d-7.165409!4d-34.815627>

GOOSSENS, C.; BERGER, A. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. In: **Annales geophysicae. Series B. Terrestrial and planetary physics**. Berlin, v. 4, n, B4, p. 385-400, 1986.

IPCC. **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**, 2014.

JEREZ, S.; TOBIN, I.; VAUTARD, R.; MONTÁVEZ, J. P.; LÓPEZ-ROMERO, J. M.; THAIS, F.; BARTOK, B.; CHRISTENSEN, O. B.; COLETTE, A.; DÉQUÉ, M.; NIKULIN, G.; KOTLARSKI, S.; VAN MEIJGAARD, E.; TEICHMANN, C.; WILD, Martin. The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. **Nature communications**, v. 6, p. 10014, 2015.

MET OFFICE - Meteorological Office, Weather and Climate Change, 2018. Disponível em: <<https://www.metoffice.gov.uk/about-us/press-office/news/weather-and-climate/2018/global-climate-2017>>. Acesso em: 04 jun. 2019.

REMUND, Jan; MÜLLER, Stefan C. Trends in global radiation between 1950 and 2100. In: **10th EMS Annual Meeting, 10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM) Abstracts, held Sept.** 2010. p. 13-17.

RUOSTEENOJA, Kimmo *et al.* Future Changes in Incident Surface Solar Radiation and Contributing Factors in India in CMIP5 Climate Model Simulations. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 58, n. 1, p. 19-35, 2019.

SALMI, T. A. M.; ANTTILA, P.; RUOHO-AIROLA, T.; AMNELL, T. Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates- the Excel template application Makesens. **Air Qual. Res.**, p. 7-35, 2002.

SILVA, Natieli Tenório. Precipitações diárias intensas na cidade de João Pessoa, Paraíba. 2014.

SILVA, L. P.; MEDEIROS, S. E. L.; SILVA, W. K. M.; ABRAHÃO, R. Tendências climáticas na mesorregião da Mata Paraibana e sua influência na produção de energia fotovoltaica. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, p. 90-101, 2018.

SNEYERS, Raymond. **Sur l'analyse statistique des séries d'observations**. Secrétariat de l'Organisation Météorologique Mondiale, 1975.

TOBIN, I.; VAUTARD, R.; BALOG, I.; BRÉON, F.; JEREZ, S.; RUTI, P. M.; THAIS, F.; VRAC, M.; YIOU, P. Assessing climate change impacts on European wind energy from ensembles high-resolution climate projections. **Climatic Change**, v. 128, n. 1/2, p. 99-112, 2015.

WILD, Martin *et al.* Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 116, p. 12-24, 2015.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **WMO Statement on the State of the Global Climate in 2018**. World Meteorological Organization (WMO), 2019.

CAPÍTULO IV

4. EFEITO DAS TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS NA OPERAÇÃO DE UM COLETOR SOLAR LOCALIZADO EM JOÃO PESSOA (NORDESTE DO BRASIL)

RESUMO

As alterações climáticas provocadas pela humanidade implicam na necessidade de aplicação de energias de fontes renováveis para mitigação dos efeitos climáticos no planeta. A disponibilidade e confiabilidade da produção de energias renováveis são fatores indispensáveis para o controle do clima e seus impactos na natureza. Para isso, estudos sobre a intermitência e otimização dessas fontes de energia são fundamentais, de maneira a potencializar sua utilização e aproveitamento. O presente trabalho determina o impacto climático na produção de água quente de um coletor solar plano, em João Pessoa, por meio da análise estatística de tendências de séries temporais. Dados históricos, do período de 1961-2018, de temperatura e nebulosidade de João Pessoa foram obtidos da estação meteorológica do INMET OMM: 82798 e foram compilados, tratados e analisados, e suas tendências climáticas investigadas. Foram aplicados os testes de Mann-Kendall e Sen para a análise de tendências, utilizando o programa Makesens. A série temporal foi avaliada quanto à produção de água quente em três períodos: 1961-1970 (dez primeiros anos da série), 2009-2018 (últimos dez anos da série) e da série completa (57 anos). A produção de água quente dos dois períodos foram comparados à produção da série completa. Chegou-se que o período 1961-1970 produziria volume de 97% da série completa e o período 2009-2018 de 102% da série completa. O que significa, quando comparado os períodos 1961-1970 versus 2009-2018, um impacto climático que aumentaria o volume produzido de água quente em 5%.

Palavras chave: Mudanças climáticas; energia solar térmica; aquecimento solar; energia renovável.

4.1. INTRODUÇÃO

A radiação solar é uma fonte de energia abundante e ainda relativamente pouco explorada. Pondo em perspectiva sua capacidade energética, estima-se que toda radiação solar incidente na superfície terrestre durante 84 minutos atenderia toda a demanda energética mundial, cerca de 900 EJ (KALOGIROU, 2013). O sol constitui elemento fundamental das energias renováveis, seja direta ou indiretamente. Do ponto de vista do

consumo energético mundial, o aquecimento demanda cerca de 50% de toda energia produzida, figurando então como principal destino final das matrizes energéticas (*International Energy Agency – IEA*, 2018). A energia destinada ao aquecimento divide-se em processos industriais (pouco mais de 50%), aplicações residenciais e comerciais (46%), e o restante na agricultura - porém, em 2017, apenas 10% dessa energia utilizada com finalidade de aquecimento derivava de fontes renováveis (IEA, 2018).

A produção de água quente depende do nível de insolação, assim também como da variação da temperatura do local, ambos os parâmetros, como estudos já confirmaram, suscetíveis a variação por mudanças climáticas. Remund e Müller (2010) avaliaram a variação da radiação global de diversos lugares do mundo, no período 1950-2010, com base em dados do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), chegando a um valor estatisticamente significativo de $-1,4 \text{ W/m}^2/\text{década}$ no planeta. Os autores também projetaram, considerando diferentes cenários de emissão do IPCC, uma variação de $-1,9\%$ neste parâmetro para o período 2089-2099 no mundo. A *World Meteorological Organization* (WMO, 2019) confirma a alteração climática da temperatura global ao reportar que o ano de 2018 foi o quarto mais quente já registrado, com estimativa de $0,99 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ acima da era pré-industrial (1850-1900), com o período 2015-2018 composto pelos quatro anos mais quentes da história.

Sendo passível de mudança, a variação dos parâmetros climáticos acaba influenciando a produção de energias renováveis. Como mostraram Cradden *et al.* (2012), que apresentaram resultado de decréscimo da capacidade de produção eólica no Reino Unido no verão, com um acréscimo compensatório no inverno. Enquanto Tobin *et al.* (2015) previram uma alteração de $\pm 20\%$ na produção de energia eólica na Europa até o fim do século. Já o impacto na energia solar térmica foi avaliado por Crook *et al.* (2011), que estimaram um aumento de 10% da produção de potência em plantas de concentração solar na Europa, devido a fatores climáticos, para o período 2010-2080. Já Wild *et al.* (2017) usaram modelos climáticos CMIP5¹ e também indicaram potencial para acréscimos futuros na maior parte do globo na produção de energia por concentração solar. Fant *et al.* (2012) avaliaram a interferência das mudanças do clima na produção de energia elétrica fotovoltaica em países do Sul da África, verificando, para cenários mais extremos, uma variação na produção de $\pm 15\%$ até 2050. Já Jerez *et al.* (2015) apresentaram resultado com menor

¹ *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* são modelos climáticos futuros desenvolvido pelo IPCC

impacto para a produção de energia fotovoltaica na Espanha, indicando que haverá uma variação negativa média de 2% até a virada do século.

A mitigação das mudanças climáticas baseia-se principalmente pela redução de emissões de gases do efeito estufa (GEE). A produção energética tem papel central nessa mitigação, já que 78% do aumento das emissões desses gases, entre 1970 e 2010, são provenientes de fontes industriais e produção de energia (IPCC, 2014), à medida que somente 3,19% da energia é produzida por fontes renováveis (BRITISH PETROLEUM, 2018). Para que haja uma mitigação inicial das emissões de GEE, Chiu e Chang (2009) sugerem que a parcela de energia fornecida por fontes renováveis no mundo chegue à marca de 8,39%, sendo assim necessário mais que dobrar o patamar atual.

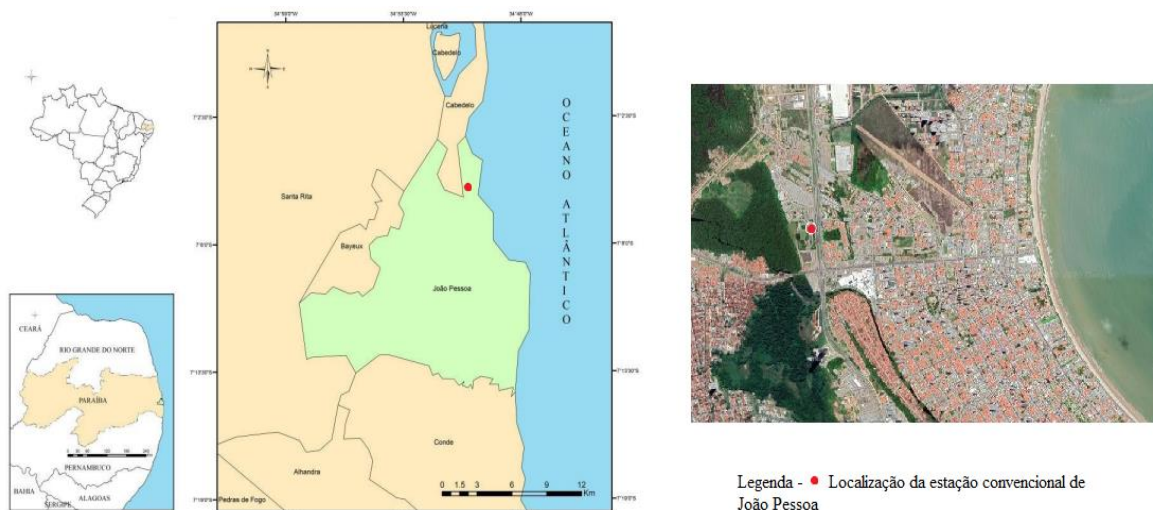
4.2. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o impacto das tendências climáticas no desempenho de coletores solares na cidade de João Pessoa (Nordeste do Brasil) usando séries climáticas históricas e suas tendências.

4.3. METODOLOGIA

A área de estudo selecionada foi a capital do estado da Paraíba, João Pessoa, no Nordeste do Brasil. Dados climáticos foram obtidos da estação meteorológica convencional de João Pessoa, com localização apresentada na figura 4.1, (código: OMM: 82798; latitude: -7.1°; longitude: -34.8°; altitude: 9,7 m), referentes a todo seu período de registro de temperatura e nebulosidade (1961-2018). Os dados dessa estação meteorológica foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019).

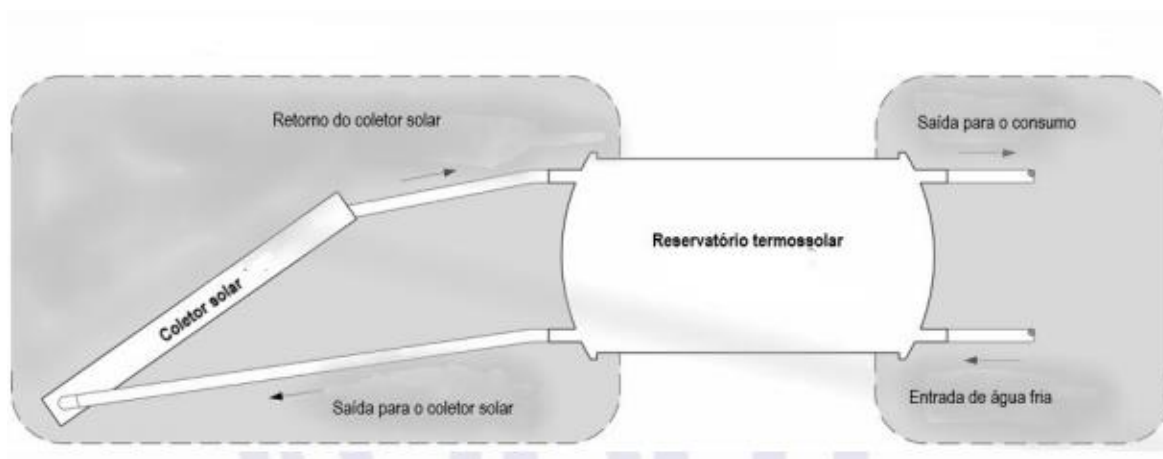
Figura 4.1 – Localização da estação meteorológica convencional de João Pessoa



Fonte: Adaptado de Silva (2014) e Google (2020)

O sistema de aquecimento solar escolhido para o estudo, representado pelo esquema da figura 4.2, é composto por coletor solar da marca Thermotini, modelo TH-PS 10-22 –V, com área externa de 1 m², pressão de funcionamento de 398 kPa, $Fr_{\tau\alpha}$ de 0,83 e Fr_{ul} de 7,11 (INMETRO, 2016). Os seguintes parâmetros foram fixados: área coletora de 10 m², temperatura de armazenamento de 50°C, temperatura de consumo de 45°C, e inclinação do coletor de 7° com relação ao solo e de 0° em relação ao norte geográfico.

Figura 4.2 – Esquema representativo do sistema de aquecimento solar com coletor plano



Fonte: Fonte: NBR 15569 (ABNT, 2020)

A modelagem do sistema seguiu a memória de cálculo sugerida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 15569 (2020), que trata dos sistemas de aquecimento solar de água em sistema direto, em que a energia útil é definida pela equação 4.1.

$$E_{\text{útil}} = \frac{V_{\text{armaz}} \times \rho \times Cp \times (T_{\text{armaz}} - T_{\text{amb}})}{3600} \quad (4.1)$$

em que V_{armaz} é o volume de armazenamento (variável de interesse); ρ é a massa específica da água, dada em kg/m³; Cp é o calor específico da água, dado em kJ/kg/K; e $T_{\text{armaz}} - T_{\text{amb}}$ corresponde à diferença de temperatura entre o armazenamento e o ambiente.

A equação 4.2 determina a área necessária de coletores solares e a equação 4.3 estima as perdas do sistema.

$$A_{\text{col}} = \frac{(E_{\text{útil}} + E_{\text{perdas}}) \times FC_{\text{instal}} \times 4,901}{PMDEE \times I_g} \quad (4.2)$$

$$E_{\text{perdas}} = 0,15 \times E_{\text{útil}} \quad (4.3)$$

em que A_{col} já é fixada em 10 m²; FC_{instal} que é um fator de correção para inclinação e orientação do coletor (equação 4.4); $PMDEE$ é a produção média diária de energia específica do coletor solar (kWh/m²), e I_g que é o valor médio de irradiação para o local, dado em (kWh/m²/dia) (Tabela 4.1).

$$PMDEE = 4,901 \times (Fr\tau\alpha - 0,0249 \times Fr_{ul}) \quad (4.4)$$

Em que β e $\beta_{\text{ótimo}}$ referem-se a inclinação do coletor e inclinação ótima, respectivamente, que seria 10° a mais que β , e γ sendo o ângulo de orientação do coletor com respeito ao norte geográfico.

$$FC_{\text{instal}} = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4} \times (\beta - \beta_{\text{ótimo}})^2 + 3,5 \times 10^{-5} \times \gamma^2]} \quad (4.5)$$

Em que $Fr\tau\alpha$ é um coeficiente adimensional do coletor, relativo ao ganho solar e Fr_{ul} é relativo às perdas, ambos encontrados em catálogo.

Tabela 4.1 - Valores de irradiação média mensal para João Pessoa, Paraíba.

Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² /dia]											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
5,86	6,00	6,01	5,37	4,82	4,36	4,47	5,26	5,76	6,05	6,24	6,15

Fonte: Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito - CRESESB (2019)

Para o estudo, a temperatura considerada foi a temperatura média compensada, conforme práticas do INMET (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007), que utiliza a equação 4.6.

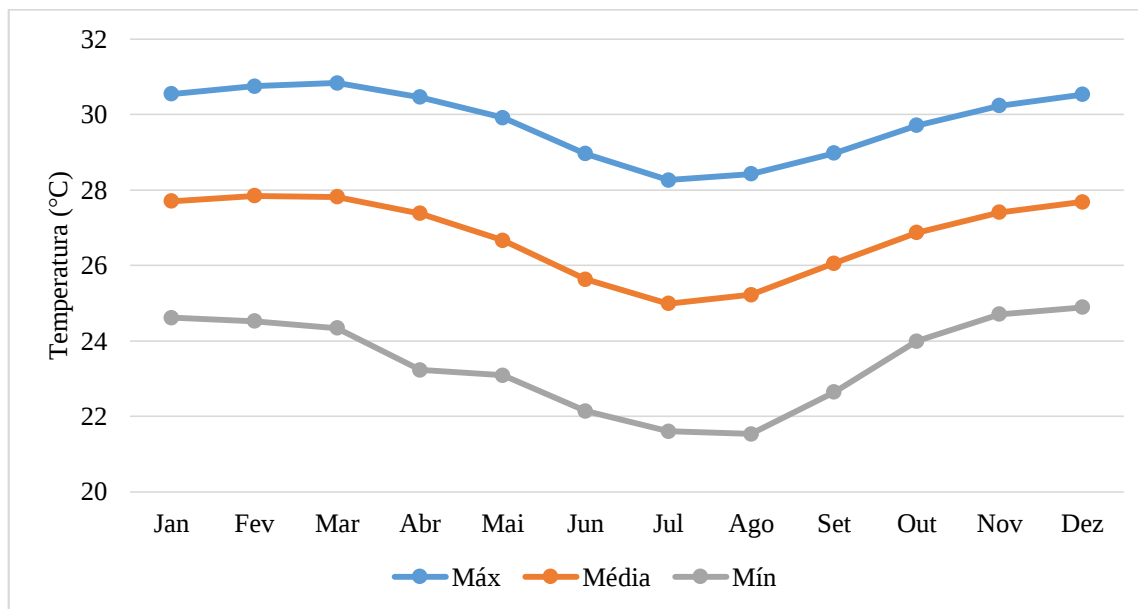
$$T_{MC} = \frac{T_{max} + T_{min} + T_{12UC} + 2T_{24UC}}{5} \quad (4.6)$$

T_{MC} é a temperatura média, T_{max} é a temperatura máxima registrada, T_{12UC} é a temperatura registrada às 12 UTC (tempo universal coordenado) e T_{24UC} temperatura registrada às 24 UTC.

Como os dados mensais e sazonais utilizados não apresentam distribuição normal, foram usados testes não-paramétricos para a análise de tendências. Para a aplicação dos testes estatísticos, fez-se uso do programa Makesens (SALMI *et al.*, 2002), versão 1.0, considerando probabilidades de erro entre 0,1% e 10%. Os testes de Mann-Kendall, inicialmente proposto por Sneyres (1975), e de Sen foram escolhidos para a avaliação de tendências estatísticas das séries temporais estudadas. Mann-Kendall é o modelo mais adequado para análise de mudanças climáticas em séries temporais (GOOSSENS; BERGER, 1986) e a declividade de Sen é uma importante ferramenta que fornece uma grandeza quantitativa associada à tendência estudada (SALMI *et al.*, 2002).

4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Figura 4.3 - Caracterização da temperatura do ar máxima, média e mínima mensais para a cidade de João Pessoa (1961-2018).



A Figura 4.3 apresenta o comportamento da temperatura do ar na cidade de João Pessoa. As temperaturas médias mensais se mantêm numa faixa de pouca variação entre 25,0°C (Julho) e 27,8°C (Fevereiro), enquanto a temperatura máxima chega a seu valor mais alto no verão, 30,8°C no mês de Março, e mais baixo no inverno, em Julho com 28,3°C. Já a temperatura mínima terá seu maior valor em Dezembro, 24,9°C, e menor em Agosto, 21,5°C. Todas as temperaturas seguem o mesmo padrão de maiores valores no verão e menores no inverno, com amplitude térmica anual muito baixa, caracterizando assim o tipo climático Tropical Litorâneo (STRAHLER e STRAHLER, 1991).

A nebulosidade é mostrada na Figura 4.4, apresentando pouca variação ao longo do ano, com maior intensidade em Junho, com 6,55 décimos, e menor intensidade em Outubro, com 5,41 décimos. A Tabela 4.2 apresenta a análise de tendências para a temperatura média compensada, usando o teste de Mann-Kendall e a declividade de Sen.

Figura 4.4 - Caracterização da nebulosidade média mensal para a cidade de João Pessoa (1961-2018).

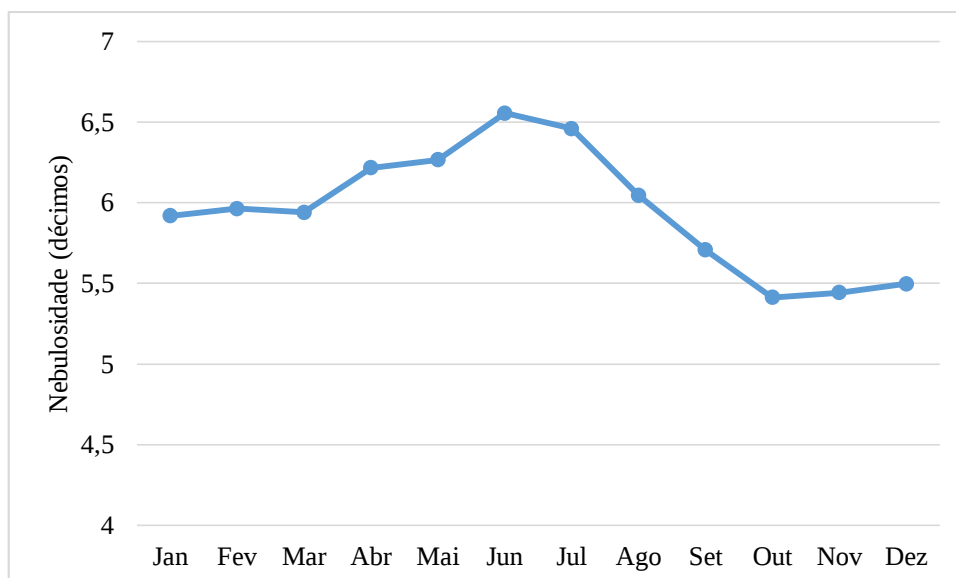


Tabela 4.2 - Tendências detectadas para a temperatura na cidade de João Pessoa (Paraíba) pelo teste de Mann-Kendall e quantificada pela declividade de Sen entre os anos 1961 e 2018.

Período	Temperatura Média (°C/ano)	Temperatura Mínima (°C/ano)	Temperatura Máxima (°C/ano)
Janeiro	0,026***	0,056***	0,036***
Fevereiro	0,036***	0,056***	0,045***
Março	0,047***	0,062***	0,045***
Abril	0,044***	0,048***	0,046***
Maio	0,028*	0,040***	0,041***
Junho	0,023**	0,033***	0,038***
Julho	0,030***	0,041***	0,047***
Agosto	0,036**	0,045***	0,052***
Setembro	0,032***	0,058***	0,046***
Outubro	0,039***	0,058***	0,042***
Novembro	0,040***	0,058***	0,034***
Dezembro	0,033***	0,054***	0,039***
Anual	0,033***	0,050***	0,042***

ns = não significativo; +p<0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001

As tendências apresentadas são expressivas, tanto mês a mês, quanto anualmente, sendo todas estatisticamente significativas e crescentes. Avaliando a temperatura média compensada, a tendência anual do período observado foi de crescimento de 0,033°C/ano, com $p < 0,001$. Março foi o mês mais impactado, com acréscimo de 0,047°C/ano ($p < 0,001$) e Junho o menos impactado, com acréscimo de 0,023°C/ano ($p < 0,01$). De uma maneira geral, as tendências para a temperatura média exibiram alta significância estatística. As temperaturas máximas e mínimas também demonstram tendências expressivas, todas altamente estatisticamente significativas.

O resultado corrobora com Melo *et al.* (2018) que indicam a existência de tendência climática crescente e significativa na cidade de Bebedouro (Pernambuco) para o aumento de máxima temperatura máxima, mínima temperatura máxima, máxima temperatura mínima e mínima temperatura mínima, com valores de 0,019; 0,033; 0,028 e 0,023 °C/ano. Para a cidade de Campina Grande (Paraíba), Dantas *et al.* (2015) apontam tendência significativa

e crescente no valor máximo de temperatura máxima diária, 0,05 °C/ano, e no valor máximo de temperatura mínima diária, 0,018 °C/ano. Collins *et al.* (2009) comprovam alteração nos padrões climáticos de regiões da América do Sul, com tendências significativas crescentes de temperatura no Brasil, também verificado por Dubreuil *et al.* (2019), ambos salientando o impacto climático na região Nordeste. Como decorrência da alteração climática, fenômenos como ondas de calor se tornarão mais frequentes no Brasil, especialmente nas cidades de São Paulo, Manaus e Recife, segundo Geirinhas *et al.* (2018).

No caso da nebulosidade, as tendências detectadas estão apresentadas na Tabela 4.3. Apesar de indicar um crescimento anual de 0,009 décimos por ano, a tendência anual não é estatisticamente significativa. A maioria dos meses não apresentou tendência significativa de alteração, destacando apenas os meses de Janeiro e Dezembro, ambos com crescimento de 0,019 décimos/ano, como os únicos a exibirem tendências significativas ($p < 0,1$), indicando um aumento da nebulosidade nos primeiros meses de verão.

Tabela 4.3 - Tendências detectadas para a nebulosidade na cidade de João Pessoa (Paraíba) pelo teste de Mann-Kendall e quantificada pela declividade de Sen entre os anos 1961 e 2018.

Período	Nebulosidade (décimos/ano)
Janeiro	0,019+
Fevereiro	0,012ns
Março	-0,005ns
Abril	-0,006ns
Maio	0,013ns
Junho	0,004ns
Julho	0,008ns
Agosto	0,001ns
Setembro	0,007ns
Outubro	0,014ns
Novembro	0,009ns
Dezembro	0,019+
Anual	0,009ns

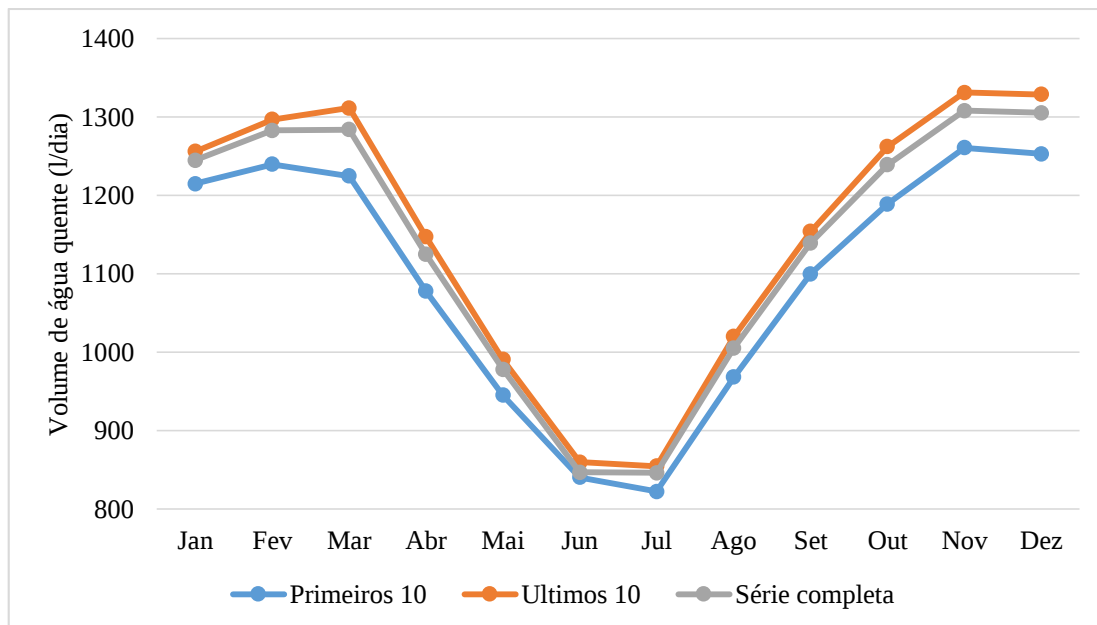
ns = não significativo; + $p < 0,1$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

A produção de água quente por sistemas solares de aquecimento depende, principalmente, dos níveis de radiação global e temperatura do ar local. Os resultados analisados demonstraram que a temperatura média do ar na cidade de João Pessoa apresentou tendências de aquecimento, no entanto, a nebulosidade não teve alteração estatisticamente significativa para a maioria dos meses do ano.

Trabalhos como os de Wild (2009) e Bartók *et al.* (2017) atribuem a sensibilidade da radiação global à variação da nebulosidade. Entretanto, no presente trabalho, descartada a influência climática da nebulosidade, conforme verificado na Tabela 4.3, por ausência de tendência anual significativa e também para a maioria dos meses do ano. Portanto, para a verificação do impacto climático na produção de água quente, somente a temperatura foi considerada variável, enquanto a radiação solar foi representada por valores mensais fixos ao longo dos anos, conforme Tabela 4.1. As séries de temperaturas foram divididas em três períodos distintos, os dez primeiros anos de dados, que correspondem a 1961-1970, os dez últimos, 2009-2018, e a série completa, 1961-2018. Isso proporcionou avaliar como o mesmo sistema de aquecimento se comportaria em diferentes momentos.

Para as condições aplicadas ao estudo, foi percebida uma variação da produção de água quente ao longo do período estudado, como pode ser verificado graficamente pela Figura 4.5.

Figura 4.5 - Produção mensal de água quente na cidade de João Pessoa (Nordeste do Brasil) com temperatura de armazenamento de 50°C.



Os primeiros dez anos estudados produziram menos água quente, com o mesmo sistema, que os dez últimos anos, tendo esse último período produzido mais que a média da série completa (Tabela 4.4). Esse resultado é proveniente das tendências detectadas na Tabela 4.2, tendo então sua produção alterada devido ao aumento da temperatura. Fica então constatado que as tendências climáticas atuam na produção de água quente, na cidade de João Pessoa, aumentando sua capacidade.

O resultado do volume de água quente produzido por dia a cada mês está representado na Tabela 4.4, com as colunas das três séries estudadas, primeiros dez anos, últimos dez anos e a série completa.

Tabela 4.4 - Produção de água quente na cidade de João Pessoa (Nordeste do Brasil) com temperatura de armazenamento de 50 °C.

Período	Primeiros 10 anos (L/dia)	Últimos 10 anos (L/dia)	Série completa (L/dia)
Janeiro	1215	1256	1245
Fevereiro	1240	1297	1283
Março	1225	1311	1284
Abril	1078	1147	1125
Mai	945	991	978
Junho	840	860	847
Julho	823	855	846
Agosto	968	1020	1005
Setembro	1100	1154	1139
Outubro	1189	1262	1239
Novembro	1261	1331	1308
Dezembro	1253	1329	1305
Anual	1095 (97%)	1151 (102%)	1134 (100%)

Para as três séries, o valor máximo produzido se dá no mês de Novembro e o mínimo em Julho. Novembro é o mês de maior insolação, conforme Tabela 4.1, enquanto Julho tem a segunda menor insolação do ano, atrás de Junho, porém compensando por ser mais frio. A média anual de produção diária é de 1095 litros para os primeiros dez anos, 1151 litros para os últimos dez anos e 1134 para a série completa. Quando comparados com a série completa, os dez primeiros anos produzem menos água quente, 97%, ao passo que os dez últimos produzem mais, 102%, sugerindo que a produção de água quente atual foi impactada num acréscimo de 5,1% na sua produção em relação ao passado referente ao início da série.

Quando analisadas as tendências referentes à produção de água quente (Tabela 4.5), é possível constatar comportamento similar às tendências detectadas para a temperatura, Tabela 4.2.

Tabela 4.5 - Tendências detectadas para a produção de água quente na cidade de João Pessoa (Paraíba) pelo teste de Mann-Kendall e quantificada pela declividade de Sen entre os anos 1961 e 2018.

Período	Tendência na produção diária de água quente (L/ano)
Janeiro	1,44***
Fevereiro	2,06***
Março	2,68***
Abril	2,16***
Maio	1,17*
Junho	0,81**
Julho	1,01***
Agosto	1,46**
Setembro	1,48***
Outubro	2,03***
Novembro	2,31***
Dezembro	1,93***
Anual	1,66***

ns = não significativo; +p<0,1; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001

Um crescimento de 1,66 L/ano estatisticamente significativo ($p < 0,001$) foi verificado para cada dia de produção de água quente a 50°C. Março foi o mês mais impactado, com crescimento de 2,68 L/ano ($p < 0,001$) e Junho o menos impactado, com crescimento de 0,81 L/ano ($p < 0,01$). Assim como para as tendências de temperatura, as tendências para a produção de água quente apresentaram alta significância estatística. Isso reforça a relação direta entre a produção de água quente e a temperatura, ambos demonstrando mesmo comportamento de tendências, indicando então a sensibilidade do sistema a aumentos de temperatura do ar.

Ao levar em conta que o consumo típico de água quente em um banho é de 45 L/banho/pessoa, conforme mostra estudo de Degen *et al.* (2016), e considerando que a cidade de João Pessoa tem população de 723.515 habitantes, segundo o censo de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), estimou-se a quantidade de sistemas de aquecimento necessários para atender a demanda de metade da população da cidade de João Pessoa. Observou-se que, para atender aproximadamente as 361.757 habitantes, seriam necessários 14887 sistemas de aquecimento, como o estudado, no primeiro período (1961 – 1970) e 14131 unidades do mesmo sistema para o segundo período (2009 – 2018). O aumento da temperatura do ar faria com que a mesma demanda fosse satisfeita com 756 sistemas de aquecimento a menos no período 2009 – 2018 que no período 1961 – 1970. Esses 756 sistemas de aquecimento poderiam atender então 19353 pessoas a mais no período 2009 – 2018.

Não foram localizados estudos similares para efeito de comparação, tratando especificamente sobre o impacto climático na produção de água quente, conferindo ao presente estudo a capacidade de contribuir para uma linha de pesquisa de literatura ainda escassa. Há, porém, no que se refere ao aproveitamento solar térmico, alguns poucos estudos sobre os impactos climáticos na geração de eletricidade por concentração solar, como Crook *et al.* (2011) e Wild *et al.* (2017). A avaliação dessa modalidade, todavia, possui a limitação de os modelos climáticos utilizados para gerar parâmetros climáticos futuros, em diferentes cenários de emissão, geralmente fornecerem apenas a radiação global, e não a direta, que é necessidade específica da concentração solar.

Como os já mencionados Crook *et al.* (2011) e Wild *et al.* (2017) projetam, haverá uma alteração futura na produção de energia por usinas de concentração solar, com crescimento estimado de 10% na Europa entre 2010 e 2080 e 0,2%/ano na Alemanha entre 2006 e 2049. Pondo em perspectiva com o resultado deste trabalho, que verificou acréscimo de 5% no período 1961-2018, equivalendo a 0,09%/ano de crescimento, há a indicação de uma intensificação ainda maior no futuro do que o já observado. Então, a previsão é de aumento de temperatura e, por consequência, mais interferência ainda na produção desses sistemas de energias renováveis.

Há de se pontuar, necessariamente, a diferença entre as abordagens aplicadas no presente estudo e os principais estudos para entendimento da influência de mudanças climáticas em diferentes fontes de energia renovável. Enquanto neste trabalho são utilizadas

séries históricas observacionais para a verificação de tendências já ocorridas para, a partir dessa informação, entender o impacto na produção energética, os demais usam de modelos climáticos globais ou regionais de comportamento futuro estimado de parâmetros climáticos, assim fazendo prognósticos em diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa, como em De Lucena *et al.* (2010), Nolan *et al.* (2012) Pereira *et al.* (2013), Tobin *et al.* (2015) e Invidiata e Ghisi (2016).

4.5. CONCLUSÃO

O estudo apresentou avaliações sobre os parâmetros climáticos temperatura do ar e nebulosidade para a cidade de João Pessoa (Paraíba) durante o período 1961-2018, detectando tendências de crescimento significativo para a temperatura anualmente e durante todos os meses do ano. Para a nebulosidade, as tendências somente foram significativas nos meses de janeiro e dezembro (também positivas). A partir disso, foi verificada a influência dessas tendências na produção solar térmica de água quente no local de estudo.

Tendências de produção diária média de água quente pelo sistema proposto foram detectadas, com crescimento anual significativo de 1,66 L/ano ($p < 0,001$). O comportamento dessas tendências de produção foi similar ao apresentado pela temperatura do ar, por causa da dependência direta do sistema à variação de temperatura.

Três períodos foram avaliados com respeito à série temporal de temperatura: dez primeiros anos da série, dez últimos anos da série e a série completa. A produção média diária calculada para esses períodos foi de 1095 L nos dez primeiros anos, 1151 L nos dez últimos anos e 1134 L para a série completa. Isso implica num impacto positivo das mudanças climáticas para esse sistema, causando um aumento da produção ao longo do tempo, em que o primeiro momento produziria 97% da série completa e o momento final 102% da série completa.

O presente trabalho soma-se a outros que confirmam a influência dos parâmetros climáticos na variabilidade da produção por meio de fontes de energia renovável, acrescentando esse aspecto a discussões sobre sua sensibilidade e intermitência. Os resultados levantam a necessidade de uma avaliação do local a ser instalada uma usina que

se aproveite de fontes renováveis, não só considerando o estado dos parâmetros climáticos atuais, mas também seu comportamento passado e suas projeções em vários cenários climáticos de emissão de gases de efeito estufa.

4.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e Instalação. Rio de Janeiro, 2020.

BARTÓK, Blanka *et al.* Projected changes in surface solar radiation in CMIP5 global climate models and in EURO-CORDEX regional climate models for Europe. **Climate Dynamics**, v. 49, n. 7-8, p. 2665-2683, 2017.

BRITISH PETROLEUM. BP statistical review of world energy June 2018. Relatório. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-reviewof-world-energy.html>>. Acesso em: jun. 2019)

CHIU, C. L.; CHANG, T. H. What proportion of renewable energy supplies is needed to initially mitigate CO2 emissions in OECD member countries? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 6–7, p. 1669–1674, 2009.

COLLINS, Jennifer M.; CHAVES, Rosane Rodrigues; DA SILVA MARQUES, Valdo. Temperature variability over South America. **Journal of climate**, v. 22, n. 22, p. 5854-5869, 2009.

CRADDEN, L. C.; HARRISON, G. P.; CHICK, J. P. Will climate change impact on wind power development in the UK? **Climatic change**, v. 115, n. 3-4, p. 837-852, 2012.

CRESESB: Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. **Potencial Energético: Potencial Solar - SunData**. Disponível em:<<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: fev. 2019.

CROOK, J. A.; JONES, L. A.; FORSTER, P. M.; CROOK, R. Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. **Energy & Environmental Science**, v. 4, n. 9, p. 3101-3109, 2011.

DANTAS, Leydson Galvíncio; SANTOS, Carlos Antonio Costa dos; OLINDA, Ricardo Alves de. Tendências anuais e sazonais nos extremos de temperatura do ar e precipitação em Campina Grande-PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 4, p. 423-434, 2015.

DEGEN, Kathrin et al. **Overcoming Salience Bias: How Real-Time Feedback Fosters Resource Conservation**. CEPR Discussion Papers, 2016.

DE LUCENA, André Frossard Pereira *et al.* The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v. 35, n. 5, p. 904-912, 2010.

DUBREUIL, V. *et al.* Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 3, p. 1446-1456, 2019.

FANT, C.; SCHLOSSER, C. A.; STRZEPEK, K. The impact of climate change on wind and solar resources in southern Africa. **Applied Energy**, v. 161, p. 556-564, 2015.

GEIRINHAS, João L. *et al.* Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 4, p. 1760-1776, 2018.

GOOGLE, INC. Google Maps. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-7.0954412,-34.8488028,370m/data=!3m1!1e3>

GOOSSENS, C.; BERGER, A. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. In: **Annales geophysicae. Series B. Terrestrial and planetary physics**. Berlin, v. 4, n. B4, p. 385-400, 1986.

I. B. G. E, CENSO. Disponível em: < <http://www.censo2010.ibge.gov.br/> >, 2010.

IEA – International Energy Agency, Renewables 2018, 2018, <https://www.iea.org/renewables2018/> (acessado em 10.2019)

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de dados meteorológicos para o ensino e pesquisa**. 2019. Disponível em: <www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. (acessado em 04.2019)

INMETRO, A. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. 2016.

INVIDIATA, A.; GHISI, E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 20–32, 2016.

IPCC. **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**, 2014.

JEREZ, S.; TOBIN, I.; VAUTARD, R.; MONTÁVEZ, J. P.; LÓPEZ-ROMERO, J. M.; THAIS, F.; BARTOK, B.; CHRISTENSEN, O. B.; COLETTE, A.; DÉQUÉ, M.; NIKULIN, G.; KOTLARSKI, S.; VAN MEIJGAARD, E.; TEICHMANN, C.; WILD, Martin. The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. **Nature communications**, v. 6, p. 10014, 2015.

KALOGIROU, Soteris A. **Solar energy engineering: processes and systems**. Academic Press, 2013.

MELO, Maria Monalisa Mayara Silva et al. Trends in Temperature and Rainfall Extremes near the Artificial Sobradinho Lake, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 426-440, 2018.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. 1a ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

NOLAN, P. *et al.* Simulating climate change and its effects on the wind energy resource of Ireland. **Wind Energy**, v. 15, n. 4, p. 593-608, 2012.

PEREIRA, E. B. *et al.* The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, v. 49, p. 107-110, 2013.

REMUND, Jan; MÜLLER, Stefan C. Trends in global radiation between 1950 and 2100. In: **10th EMS Annual Meeting, 10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM) Abstracts, held Sept.** 2010. p. 13-17.

SALMI, T. A. M.; ANTTILA, P.; RUOHO-AIROLA, T.; AMNELL, T. Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates-the Excel template application Makesens. **Air Qual. Res**, p. 7-35, 2002.

SILVA, Natieli Tenório. Precipitações diárias intensas na cidade de João Pessoa, Paraíba. 2014.

SNEYERS, Raymond. **Sur l'analyse statistique des séries d'observations**. Secrétariat de l'Organisation Météorologique Mondiale, 1975.

STRAHLER, Arthur N.; STRAHLER, Alan H. Geografía física. **Estudios Geográficos**, v. 52, n. 202, p. 187, 1991.

TOBIN, I. *et al.* Assessing climate change impacts on European wind energy from ENSEMBLES high-resolution climate projections. **Climatic Change**, v. 128, n. 1-2, p. 99-112, 2015.

WILD, Martin. Global dimming and brightening: A review. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. D10, 2009.

WILD, Martin; FOLINI, Doris; HENSCHHEL, Florian. Impact of climate change on future concentrated solar power (CSP) production. In: **AIP Conference Proceedings**. AIP Publishing, 2017. p. 100007.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **WMO Statement on the State of the Global Climate in 2018**. World Meteorological Organization (WMO), 2019.

CAPÍTULO V

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Constatou-se que há um comportamento divergente nas regiões estudadas de interferência das mudanças climáticas na produção de energias renováveis. Ainda não há um comportamento padrão, com efeitos variados por região, além de os resultados apontarem para influências mais acentuadas em certos períodos do ano na maioria das regiões do planeta. Percebeu-se que em algumas localidades a produção de eletricidade tende a permanecer inalterada, ou com pouca alteração, devido aos efeitos de compensação dos fatores e dos elementos climáticos, a exemplo do vento, que pode ser potencializado em uma estação e prejudicado em outra. O comportamento identificado de variabilidade dos efeitos sugerem que a otimização da matriz energética renovável deve passar por uma análise de impactos climáticos em locais mais específicos, visando aproveitar ou evitar os efeitos climáticos em parâmetros que influenciam na produção energética.

No estudo que avaliou o comportamento do parâmetro radiação global na cidade de João Pessoa, no estado da Paraíba, nenhuma tendência anual significativa foi encontrada para o período de 2007 a 2018, embora o mês de novembro aponte para um crescimento estatisticamente significativo ($p < 0,1$) de $1,2 \text{ W/m}^2/\text{ano}$ para o dia médio, resultado que corrobora com Silva *et al.* (2018). Duas hipóteses são levantadas sobre o resultado produzido, a pouca sensibilidade do parâmetro a alterações climáticas até o momento e o possível pequeno tempo amostral para realização satisfatória do estudo. É importante ressaltar a recente criação da estação automática de João Pessoa como fator preponderante, visto que a observação de efeitos climáticos necessita de um intervalo de tempo maior para avaliações mais exatas.

Foram identificadas tendências crescentes para temperatura média do ar por todo ano e, para a nebulosidade, apenas para os meses de Janeiro e Dezembro, no período 1961-2018 para a cidade de João Pessoa (Paraíba). A partir disso, foi verificada a influência desses parâmetros e dessas tendências na produção solar térmica de água quente no local de estudo.

A produção solar térmica calculada se relacionou com a série histórica de temperatura com três períodos distintos: dez primeiros anos da série, dez últimos anos da

série e a série completa. A produção média diária calculada para esses períodos foi de 1095 L nos dez primeiros anos, 1151 L nos dez últimos anos e 1134 L para a série completa. Isso implica num impacto positivo das mudanças climáticas no sistema, causando um aumento da produção ao longo do tempo, em que o primeiro momento produziria 97% da série completa e o momento final 102% da série completa. Indicando uma variação crescente de 5% na produção, quando comparados os períodos 1961-1970 e 2009-2018.

O presente trabalho soma-se a outros que confirmam a influência dos parâmetros climáticos na variabilidade da produção por meio de fontes de energia renovável, acrescentando esse aspecto a discussões sobre sua sensibilidade e intermitência. O que levanta a necessidade de uma avaliação do local a ser instalada uma usina que se aproveite de fontes renováveis, não só considerando o estado dos parâmetros climáticos atuais, mas também seu comportamento passado e suas projeções em vários cenários climáticos de emissão de gases de efeito estufa.

Trabalhos futuros que se aprofundem na temática do presente estudo podem utilizar a mesma ferramenta de análise para diferentes tipos de energias renováveis. Seria de grande interesse promover análises sobre o clima futuro, a partir de modelos climáticos regionais e globais, com diferentes cenários de emissões de poluentes, podendo estimar como as energias renováveis se comportarão, além de possibilitar a comparação da evolução do impacto das tendências, das séries históricas com as projeções. A área de investigação também deve ser abrangida, alcançando o estado completo da Paraíba e depois o Nordeste do Brasil, mapeando áreas que apresentem potencial futuro para determinado tipo de fonte de energia renovável e também aquelas localizações em que as projeções indiquem perda de produtividade contraproducente.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE TODA A DISSERTAÇÃO

ABEEÓLICA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br>>. Acesso em: 05/01/2020.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e Instalação. Rio de Janeiro, 2020.

ABRAHÃO, R.; PEIXOTO, I. M. B. M.; CARVALHO, M. Solar or wind energy for the Brazilian semiarid - Climatic characterization and future trends. p. 1–12, 2017. INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS, 30., 2017, San Diego. Anais... San Diego: [s.n.], 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Capacidade de Geração do Brasil. 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-alcanca-170-mil-megawatts-de-capacidade-instalada-em-2019/656877?inheritRedirect=false>. Acesso em: 05/12/2019

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Capacidade de Geração do Brasil. 2019. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 05/12/2019

ALLEN, R. J.; NORRIS, J. R.; WILD, Martin. Evaluation of multidecadal variability in CMIP5 surface solar radiation and inferred underestimation of aerosol direct effects over

Europe, China, Japan, and India. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 12, p. 6311-6336, 2013.

AMBRIZZI, Tércio; ARAUJO, Moacyr. Base científica das mudanças climáticas: v.1 - primeiro relatório de avaliação nacional. [S.l: s.n.], 2014.

APPIAH, Michael Owusu. Investigating the multivariate Granger causality between energy consumption, economic growth and CO2 emissions in Ghana. **Energy Policy**, v. 112, p. 198-208, 2018.

BALMER, Markus; SPRENGE, Daniel; LETCHER, Trevor. Hydroelectric power. In: SPRENGE, Daniel (org.). **Future Energy**. 1. ed. Elsevier Science, 2008

BARTÓK, Blanka *et al.* Projected changes in surface solar radiation in CMIP5 global climate models and in EURO-CORDEX regional climate models for Europe. **Climate Dynamics**, v. 49, n. 7-8, p. 2665-2683, 2017.

BOEHLERT, B., STRZEPEK, K. M., CHAPRA, S. C., *et al.* Climate change impacts and greenhouse gas mitigation effects on US water quality. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 7, n. 3, p. 1326-1338, 2015.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Anuário estatístico de energia elétrica. Brasília: MME; Rio de Janeiro: EPE, 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 05/12/2019.

BRITISH PETROLEUM. BP statistical review of world energy June 2018. Relatório. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>>. Acesso em: 04 jun. 2019)

BURNETT, D.; BARBOUR, E.; HARRISON, G. P. The UK solar energy resource and the impact of climate change. **Renewable Energy**, v. 71, p. 333-343, 2014.

CHAMPAGNE, Pascale; LETCHER, Trevor. Biomass. In: SPRENGE, Daniel (org.). **Future Energy**. 1. ed. Elsevier Science, 2008

CHIU, C. L.; CHANG, T. H. What proportion of renewable energy supplies is needed to initially mitigate CO2 emissions in OECD member countries? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 6-7, p. 1669-1674, 2009.

COLLINS, Jennifer M.; CHAVES, Rosane Rodrigues; DA SILVA MARQUES, Valdo. Temperature variability over South America. **Journal of climate**, v. 22, n. 22, p. 5854-5869, 2009.

CRADDEN, L. C.; HARRISON, G. P.; CHICK, J. P. Will climate change impact on wind power development in the UK? **Climatic change**, v. 115, n. 3-4, p. 837-852, 2012.

CRESESB: Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. **Potencial Energético: Potencial Solar - SunData.** Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: fev. 2019.

CROOK, J. A.; JONES, L. A.; FORSTER, P. M.; CROOK, R. Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. **Energy & Environmental Science**, v. 4, n. 9, p. 3101-3109, 2011.

CUTFORTH, H. W.; JUDIESCH, D. Long-term changes to incoming solar energy on the Canadian Prairie. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 145, n. 3-4, p. 167-175, 2007.

DANTAS, Leydson Galvêncio; SANTOS, Carlos Antonio Costa dos; OLINDA, Ricardo Alves de. Tendências anuais e sazonais nos extremos de temperatura do ar e precipitação em Campina Grande-PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 4, p. 423-434, 2015.

DE JONG, P., BARRETO, T. B., TANAJURA, C. A *et al.* Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. **Renewable energy**, v. 141, p. 390-401, 2019.

DEGEN, Kathrin *et al.* **Overcoming Salience Bias: How Real-Time Feedback Fosters Resource Conservation.** CEPR Discussion Papers, 2016.

DE LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A. S.; SCHAEFFER, R.; DUTRA, R. M. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v. 35, n. 5, p. 904-912, 2010.

DELGADO, Rafael Coll *et al.* Cenários climáticos da radiação solar global baseados no modelo regional HadRM3 para o Estado do Acre. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 417-428, 2014.

DUBREUIL, V. *et al.* Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 3, p. 1446-1456, 2019.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar engineering of thermal processes**. John Wiley & Sons, 2013.

DUNLAP, Richard A. **Sustainable energy**. Nelson Education, 2015.

EIA, Energy information administration. Disponível em: <<https://www.eia.gov/energyexplained/renewable-sources/>>. Acesso em: 05/12/2019.

European Solar Thermal Technology Platform (ESTTP). Solar heating and cooling for a sustainable energy future in Europe 2009. **Relatório. Disponível em: http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/projects/downloads/ESTTP_SRA_Revision_d_Version.pdf**; 2009 (acessado em 20.07.2018).

FANT, C.; SCHLOSSER, C. A.; STRZEPEK, K. The impact of climate change on wind and solar resources in southern Africa. **Applied Energy**, v. 161, p. 556-564, 2015.

FARIAS NETO; SILVA JUNIOR, J. M.; ABRAHÃO, RAPHAEL; CARVALHO, M. . Como repercutem as mudanças climáticas na produção de energias renováveis? In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade - Congestas 2018, 2018, João Pessoa. **Anais do Congestas 2018**, 2018.

GAETANI, M., HULD, T., VIGNATI, E. *et al.* The near future availability of photovoltaic energy in Europe and Africa in climate-aerosol modeling experiments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 706-716, 2014.

GEIRINHAS, João L. *et al.* Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 4, p. 1760-1776, 2018.

GILBERT, Richard O. **Statistical methods for environmental pollution monitoring**. John Wiley & Sons, 1987.

GLOBAL, British Petroleum. BP statistical review of world energy June 2017. Relatório. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>>. Acesso em: 20 jul. 2018)

GOLDEMBERG, J. The promise of clean energy. **Energy Policy**, v. 34, n. 15, p. 2185-2190, 2006.

GOOGLE, INC. Google Maps. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/7%C2%B09'55.5%22S+34%C2%B048'56.3%22>

W/@-7.1689881,-34.8169907,5918m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x0:0x0!8m2!3d-7.165409!4d-34.815627

GOOGLE, INC. Google Maps. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-7.0954412,-34.8488028,370m/data=!3m1!1e3>

GOOSSENS, C.; BERGER, A. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. In: **Annales geophysicae. Series B. Terrestrial and planetary physics**. Berlin, v. 4, n, B4, p. 385-400, 1986.

GOZGOR, Giray; LAU, Chi Keung Marco; LU, Zhou. Energy consumption and economic growth: New evidence from the OECD countries. **Energy**, v. 153, p. 27-34, 2018.

I. B. G. E, CENSO. Disponível em: < <http://www.censo2010.ibge.gov.br/>>, 2010.

IEA – International Energy Agency, Renewables 2018, 2018, <https://www.iea.org/renewables2018/> (acessado em 10.2019)

INFIELD, David; LETCHER, Trevor. Solar Energy: Photovoltaics. In: SPRENGE, Daniel (org.). **Future Energy**. 1. ed. Elsevier Science, 2008

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de dados meteorológicos para o ensino e pesquisa**. 2019. Disponível em: <www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. (acessado em 04.2019)

INMETRO, A. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. 2016.

INVIDIATA, A.; GHISI, E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 130, p. 20–32, 2016.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2014: Mitigation of climate change. Cambridge University Press, 2015.

IPCC 2018. Global Warming of 1.5 C An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change. **Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Acessado em: 05/12/2019.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

IPCC. **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**, 2014.

IPCC. **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**, 2014.

IQBAL, M. An introduction to solar radiation. **Elsevier**, 2012.

JEREZ, S.; TOBIN, I.; VAUTARD, R.; MONTÁVEZ, J. P.; LÓPEZ-ROMERO, J. M.; THAIS, F.; BARTOK, B.; CHRISTENSEN, O. B.; COLETTE, A.; DÉQUÉ, M.; NIKULIN, G.; KOTLARSKI, S.; VAN MEIJGAARD, E.; TEICHMANN, C.; WILD, Martin. The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. **Nature communications**, v. 6, p. 10014, 2015.

KALOGIROU, Soteris A. **Solar energy engineering: processes and systems**. Academic Press, 2013.

KLUPPEL, R. P. **Curso de Especialização em Energia Solar para Agricultura**. João Pessoa: UFPB, 1985.

KOCH, H., VÖGELE, S., HATTERMANN, F. F. *et al.* The impact of climate change and variability on the generation of electrical power. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 24, n. 2, p. 173, 2015.

LIEPERT, B. G. Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990. **Geophys. Res. Lett.**, v. 29, n. 10, p. 1421, 2002.

LIN, Boqiang; BENJAMIN, I. Nelson. Causal relationships between energy consumption, foreign direct investment and economic growth for MINT: Evidence from panel dynamic ordinary least square models. **Journal of cleaner production**, v. 197, p. 708-720, 2018.

LIU, T.; XU, G.; CAI, P.; TIAN, L.; HUANG, Q. Development forecast of renewable energy power generation in China and its influence on the GHG control strategy of the country. **Renewable Energy**, v. 36, n. 4, p. 1284-1292, 2011.

LIU, Yunyang; HAO, Yu. The dynamic links between CO₂ emissions, energy consumption and economic development in the countries along “the Belt and Road”. **Science of the Total Environment**, v. 645, p. 674-683, 2018.

LUCENA, A. F. P., SZKLO, A. S., SCHAEFFER, R., *et al.* The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. **Energy Policy**, v. 37, n. 3, p. 879-889, 2009.

MARENGO, Jose A.; CAMARGO, Claudia C. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 28, n. 7, p. 893-904, 2008.

MAUAD, Frederico Fábio; FERREIRA, L. C.; TRINDADE, Tatiana Costa Guimarães. Energia Renovável no Brasil. **Análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras. Recuperado de: <http://www.livrosabertos.sibi.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/view/168/154/740-1>**, 2017.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. 1a ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MET OFFICE - Meteorological Office, Weather and Climate Change, 2018. Disponível em: <<https://www.metoffice.gov.uk/about-us/press-office/news/weather-and-climate/2018/global-climate-2017>>. Acesso em: 04 jun. 2019.

NOLAN, P.; LYNCH, P.; MCGRATH, R.; SEMMLER, T.; WANG, S. Simulating climate change and its effects on the wind energy resource of Ireland. **Wind Energy**, v. 15, n. 4, p. 593- 608, 2012.

NOTTON, Gilles; LAZAROV, V.; STOYANOV, L. Optimal sizing of a grid-connected PV system for various PV module technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and locations. **Renewable Energy**, v. 35, n. 2, p. 541-554, 2010.

PANAGEA, I. S., TSANIS, I. K., KOUTROULIS, A. G. *et al.* Climate change impact on photovoltaic energy output: the case of Greece. **Advances in Meteorology**, v. 2014, 2014.

PAŠIČKO, R.; BRANKOVIĆ, Č.; ŠIMIĆ, Z. Assessment of climate change impacts on energy generation from renewable sources in Croatia. **Renewable Energy**, v. 46, p. 224-231, 2012.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; PES, M. P.; DA CRUZ SEGUNDO, E. I.; LYRA, A. D. A. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, v. 49, p. 107-110, 2013.

REMUND, Jan; MÜLLER, Stefan C. Trends in global radiation between 1950 and 2100. In: **10th EMS Annual Meeting, 10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM) Abstracts, held Sept. 2010.** p. 13-17.

REN21, Renewables. Global Status Report, 2019. 2019.

ROSSO, Flávia V. *et al.* Trends and decadal variability in air temperature over southern Brazil. **American Journal of Environmental Engineering**, v. 5, n. 1A, p. 85-95, 2015.

RUOSTEENOJA, Kimmo *et al.* Future Changes in Incident Surface Solar Radiation and Contributing Factors in India in CMIP5 Climate Model Simulations. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 58, n. 1, p. 19-35, 2019.

SALMI, T. A. M.; ANTTILA, P.; RUOHO-AIROLA, T.; AMNELL, T. Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates-the Excel template application Makesens. **Air Qual. Res**, p. 7-35, 2002.

SCIENTIFIC AMERICAN, 2009. Does Population Growth Impact Climate Change? [Online]. Scientific American. Disponível: <https://www.scientificamerican.com/article/population-growth-climate-change/> [Acessado 05/12/2019].

SILVA, Natieli Tenório. Precipitações diárias intensas na cidade de João Pessoa, Paraíba. 2014.

SILVA, L. P.; MEDEIROS, S. E. L.; SILVA, W. K. M.; ABRAHÃO, R. Tendências climáticas na mesorregião da Mata Paraibana e sua influência na produção de energia fotovoltaica. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, p. 90-101, 2018.

SNEYERS, Raymond. **Sur l'analyse statistique des séries d'observations**. Secrétariat de l'Organisation Météorologique Mondiale, 1975.

SOUZA, A. P. D.; ZAMADEI, T.; MONTEIRO, E. B.; CASAVECCHIA, B. H. Transmissividade Atmosférica da Radiação Global na Região Amazônica de Mato Grosso. **Rev. Bras. Meteorol.**, v. 31, n. 4, suppl. 1, p. 639-648, 2016.

STANHILL, G.; COHEN, S. Solar radiation changes in the United States during the Twentieth century: evidence from sunshine duration measurements. **J. Clim.**, v. 18, p. 1503-1512, 2005.

STAUDT, Lawrence; LETCHER, Trevor. Wind Energy. *In*: SPRENGE, Daniel (org.). **Future Energy**. 1. ed. Elsevier Science, 2008

STRAHLER, Arthur N.; STRAHLER, Alan H. Geografía física. **Estudios Geográficos**, v. 52, n. 202, p. 187, 1991.

TOBIN, I. *et al.* Assessing climate change impacts on European wind energy from ENSEMBLES high-resolution climate projections. **Climatic Change**, v. 128, n. 1-2, p. 99-112, 2015.

TOBIN, I.; VAUTARD, R.; BALOG, I.; BRÉON, F.; JEREZ, S.; RUTI, P. M.; THAIS, F.; VRAC, M.; YIOU, P. Assessing climate change impacts on European wind energy from ensembles high-resolution climate projections. **Climatic Change**, v. 128, n. 1/2, p. 99-112, 2015.

UNDESA, U. N. D. O. E. A. S. A. 2017. World population projected to reach 9.8 billion in 2050, and 11.2 billion in 2100 [Online]. United Nation Department of Economics and Social Affairs. Disponível: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects2017.html> [Acessado 05/12/2019].

UNDESA, U. N. World Population Prospects 2019: Highlights. **New York (US): United Nations Department for Economic and Social Affairs**, 2019.

WANG, Z. *et al.* Solar water heating: From theory, application, marketing and research. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 68–84, 2015.

WILD, M.; FOLINI, D.; HENSCHER, F.; FISCHER, N.; MÜLLER, B. Projections of longterm changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 116, p. 12-24, 2015.

WILD, Martin. Global dimming and brightening: A review. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. D10, 2009.

WILD, Martin; FOLINI, Doris; HENSCHER, Florian. Impact of climate change on future concentrated solar power (CSP) production. In: **AIP Conference Proceedings**. AIP Publishing, 2017. p. 100007.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **WMO Statement on the State of the Global Climate in 2018**. World Meteorological Organization (WMO), 2019.