



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

- Mestrado - Doutorado

**CARACTERIZAÇÃO E TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS DA CIDADE
DE PATOS (PARAÍBA) E CONSEQUÊNCIAS PARA A ENERGIA
FOTOVOLTAICA**

por

José Ribeiro Farias Neto

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

JOSÉ RIBEIRO FARIAS NETO

**CARACTERIZAÇÃO E TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS DA CIDADE
DE PATOS (PARAÍBA) E CONSEQUÊNCIAS PARA A ENERGIA
FOTOVOLTAICA**

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: Professora Monica Carvalho, PhD.

Coorientador: Professor Raphael Abrahão, PhD.

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFPB

F224c Farias Neto, José Ribeiro.

Caracterização e tendências climáticas da cidade de Patos (Paraíba) e consequências para a energia fotovoltaica / José Ribeiro Farias Neto. - João Pessoa, 2020.

94 f. : il.

Orientação: Monica Carvalho.

Coorientação: Raphael Abrahão.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Mudanças climáticas. 2. Energia solar. 3. Produção energética - eficiência. I. Carvalho, Monica. II. Abrahão, Raphael. III. Título.

UFPB/BC

CARACTERIZAÇÃO E TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS DA CIDADE DE PATOS (PARAÍBA) E CONSEQUÊNCIAS PARA A ENERGIA FOTOVOLTAICA

por

José Ribeiro Farias Neto

Dissertação aprovada em 08 de julho de 2020



Prof.ª Monica Carvalho, PhD
UFPB / CEAR / DEER
SIAPE nº 1991228

Profa. Dra. MONICA CARVALHO
Orientadora – UFPB



Prof. Dr. RAPHAEL ABRAHAO
Coorientador - UFPB



Prof. Dr. CICERO DA ROCHA SOUTO
Examinador Externo – UFPB



Prof. Dr. JOSÉ FELIX DA SILVA NETO
Examinador Externo – UFPB

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, pois sem Ele nada sou e nada posso fazer.

A minha orientadora Prof. Dra. Monica Carvalho, pela confiança, suporte e paciência ao longo de todo o trabalho, contribuindo para minha chegada até aqui. Agradeço também ao meu coorientador Prof. Dr. Raphael Abrahão, pelo acompanhamento, sugestões, recomendações e contribuições em todas as atividades desenvolvidas na pesquisa.

A minha esposa, meu suporte e companhia diária, por todo amor e carinho e por ter estado ao meu lado nesse percurso.

Aos meus pais, meus portos seguros, pelo incentivo e apoio em todas as minhas atividades.

A Lia, que é minha segunda mãe, por todo cuidado e preocupação.

Aos meus irmãos, pela compreensão e apoio.

Ao colega de pesquisa José Moreira, pelo compartilhamento de conhecimentos e pelas valiosas discussões.

“Deus lindinho, eu te amo muito, tu és bom.”

Carolina Farias Gomes

CARACTERIZAÇÃO E TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS DA CIDADE DE PATOS (PARAÍBA) E CONSEQUÊNCIAS PARA A ENERGIA FOTOVOLTAICA

RESUMO

Entre as principais fontes renováveis, a energia fotovoltaica tem alcançado cada vez mais posição de destaque no Brasil, devido ao alto potencial solar do país, especialmente na região Nordeste. A produção energética por meio de fontes de energias renováveis é vulnerável às mudanças climáticas, porém os impactos dessas mudanças não possuem um comportamento padrão. Neste contexto, o presente estudo buscou identificar alterações no potencial da produção fotovoltaica na cidade de Patos-PB, devido a influência de mudanças climáticas entre os anos de 1974 e 2018. Por meio dos testes estatísticos não-paramétricos de Mann-Kendall e Sen obteve-se informação sobre as tendências nos parâmetros climáticos e na produção elétrica fotovoltaica durante o período de estudo. A temperatura média apresentou tendências de aumento significativo em março ($p<0,10$), maio ($p<0,10$), junho ($p<0,05$) e agosto ($p<0,01$). Já a nebulosidade apresentou uma tendência significativa de diminuição em março e setembro ($p<0,05$). As séries de dados disponíveis de radiação solar foram curtas e insuficientes para obtenção de tendências significativas. Os registros desse elemento climático em Patos só iniciaram a partir da instalação da estação automática do INMET, em 2007. Na comparação entre os primeiros 10 anos (1975-1984) e os últimos 10 anos (2009-2018) da série, houve uma redução de 0,34 % na produção de energia elétrica. Os meses mais desfavoráveis para a produção foram junho e julho, e os mais promissores outubro e novembro. Conclui-se que estudos de tendências climáticas estabelecem parâmetros importantes que podem evidenciar alterações regionais e seus impactos nos sistemas energéticos de origem renovável.

Palavras-Chave: Mudanças climáticas, Energia solar, Eficiência, Produção energética.

CHARACTERIZATION AND CLIMATE TRENDS OF THE CITY OF PATOS (PARAÍBA) AND CONSEQUENCES FOR PHOTOVOLTAIC ENERGY

ABSTRACT

Among the main renewable sources, photovoltaic energy is increasingly reaching the prominent position in Brazil, due to the country's high solar potential, especially in the Northeast region. Energy production from renewable energy sources is vulnerable to climate change, but the changes do not affect a pattern of behavior. In this context, the present study sought to identify changes in the potential of photovoltaic production in the city of Patos-PB, due to the influence of climate changes. Through statistical tests non-parametric Mann-Kendall and Sen, users can get information on trends in climate parameters and photovoltaic electricity production during the study period. The average temperature shown in the trends of significant increase in March ($p < 0.10$), May ($p < 0.10$), June ($p < 0.05$) and August ($p < 0.01$). There is already cloudiness that shows a significant tendency to decrease in March and September ($p < 0.05$). The available data series on solar radiation is short and insufficient for reduced trend variations. The records of this scalable element in Patos are initiated from the installation of the INMET automatic station, in 2007. Comparison between the first 10 years (1975-1984) and the last 10 years (2009-2018) of the series, there was a reduction of 0.34 % in the production of electricity. The most unfavorable months for production were in June and July, and the most promising in October and November. It was concluded that studies of determinant climatic trends are important that can demonstrate regional changes and their impacts on energy systems of renewable origin.

Keywords: Climate change, Solar energy, Efficiency, Energy production.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1 INTRODUÇÃO	14
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 OBJETIVO GERAL	16
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS	19
2.2 TESTE DE MANN-KENDALL	21
2.3 REGIÕES SEMIÁRIDAS E O CLIMA EM PATOS	23
2.4 PRODUÇÃO ENERGÉTICA EM REGIÕES SEMIÁRIDAS	25
3. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM REGIÕES SEMIÁRIDAS	31
3.1 INTRODUÇÃO	32
3.2 METODOLOGIA	33
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
3.4 CONCLUSÃO	40
3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
4. CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NA CIDADE DE PATOS, REGIÃO SEMIÁRIDA DA PARAÍBA	44
4.1 INTRODUÇÃO	45
4.2 DESENVOLVIMENTO	46
4.3 METODOLOGIA	48
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.5 CONCLUSÃO	51
4.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

5. IMPACTOS DAS TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE POR PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS EM PATOS-PB	54
5.1 INTRODUÇÃO	55
5.2 METODOLOGIA	57
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
5.4 CONCLUSÃO	69
5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE TODA A DISSERTAÇÃO.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Corte transversal da estrutura básica de uma célula fotovoltaica.....	26
Figura 2.2 - Curvas características corrente-tensão (I-V) para módulos fotovoltaicos.....	27
Figura 2.3 - Curva I-V para diferentes temperaturas.....	28
Figura 3.1 - Variação da eficiência dos módulos fotovoltaicos considerando a temperatura do módulo e a temperatura ambiente.....	35
Figura 3.2 - Relação entre eficiência e temperatura do módulo fotovoltaico.....	36
Figura 4.1 - Caracterização da radiação solar média diária ao longo dos anos estudados e mensalmente para a cidade de Patos-PB no período entre 2007 e 2018.....	48
Figura 5.1 - Geração de eletricidade global.....	53
Figura 5.2 - Localização geográfica da cidade de Patos, região semiárida da Paraíba, utilizada como objeto de estudo.....	56
Figura 5.3 - Média mensal dos valores de temperatura média na cidade de Patos-PB, período entre 1975 a 2018.....	61
Figura 5.4 – Relação da produção de eletricidade utilizando 100 painéis fotovoltaicos da Axitec modelo AC-260P/156-60S, com a temperatura média do período, com base nos dados da série completa, entre 1975 e 2018, para cidade de Patos-PB.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Resumo das expectativas na produção de eletricidade e de variação da temperatura, região, período, modelo climático, e escopo espacial para os artigos analisados.....	37
Tabela 4.1 - Tendências de radiação solar média verificadas por meio da aplicação do teste de Mann-Kendall entre os anos de 2007 a 2018 para a cidade de Patos-PB.....	49
Tabela 5.1 - Informações técnicas do painel solar fotovoltaico.....	58
Tabela 5.2 - Dados estatísticos para temperatura média e nebulosidade na cidade de Patos-PB, no período de 1975 a 2018.....	59
Tabela 5.3 - Dados estatísticos para Radiação Solar ($G(t)$), no período de 2007 a 2018, na cidade de Patos-PB.....	60
Tabela 5.4 - Tendências de temperatura média e nebulosidade verificadas através da aplicação do teste de Mann-Kendall e declividade de Sen, entre os anos de 1984 a 2018, na cidade de Patos-PB.....	62
Tabela 5.5 - Tendências da Produção de eletricidade verificadas através da aplicação do teste de Mann-Kendall e declividade de Sen, entre os anos de 1984 a 2018, na cidade de Patos-PB.....	63
Tabela 5.6 - Dados estatísticos para produção de eletricidade utilizando módulos fotovoltaicos, considerando a média mensal na cidade de Patos-PB, no período de 1975 a 2018.....	63

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CMIP 3- Modelo Acoplado de Projeto de Intercomparação fase 3

CONADIS - Congresso Nacional da Diversidade do Semiárido

CONIMAS - Congresso Internacional de Meio Ambiente e Sociedade

CQNUAC - Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas

CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

DDP - Diferença De Potencial

GEE – Gases do Efeito Estufa

IGSM – Modelos Globais Integrados

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC – Painel Internacional Sobre Mudanças Climáticas

LTP – Programa Luz para Todos

NOCT - *Nominal Operating Cell Temperature*

OMM - Organização Meteorológica Mundial

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas

RSS - Radiação Solar de Superfície

TSM - Temperatura da Superfície do Mar

UNFCCC - *United Nations Framework Convention for Climate Change*

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1 INTRODUÇÃO

Os eventos climáticos, manifestados pela mutação dos seus padrões, normalmente estão associados à atividade antrópica de exploração dos recursos naturais. O processo de industrialização após a revolução industrial acelerou o processo de degradação ambiental, com aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE).

O aumento do consumo dos combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica contribuiu para que esse setor se tornasse o maior emissor de GEE (BRUCKNER *et al.*, 2014). A crise energética não é um problema recente, e a mitigação das mudanças climáticas constitui-se como um dos principais desafios da atualidade (CONEJERO *et al.*, 2015). Há portanto uma preocupação ambiental universal, e, com isso, surge a necessidade de inserir alternativas com tecnologias sustentáveis como base energética, a fim também de conciliar interesses econômicos e sociais (SANTOS *et al.*, 2016).

Segundo Nunes *et al.* (2019), o estudo do clima é complexo devido aos diversos fatores que podem intervir, como a temperatura, radiação, correntes marítimas, precipitação, umidade. Esses fatores interagem entre si e com o balanço de energia do planeta provocam variações em diversas escalas de tempo.

As temperaturas globais estão aumentando e as pessoas, os ecossistemas e até a própria indústria estão vulneráveis às mudanças climáticas, segundo o relatório de 2014 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014a). Devido a interferência danosa dos seres humanos em ambientes mais sensíveis e frágeis do Nordeste Brasileiro, do ponto de vista climático, os efeitos das mudanças climáticas são ainda mais

perceptíveis e intensos (SANTOS; BRITO, 2007). As projeções do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMCI) apontam um aumento de 0,5 a 1°C na temperatura do ar na região do Nordeste até 2040. Já entre 2041 e 2070, espera-se um aquecimento ainda mais intenso, de 2 °C a 3 °C. A radiação solar global também tem apresentado variações de seus padrões e há uma tendência decrescente generalizada de seus indicadores em muitas partes do mundo (OHMURA, 1989; XIUJI *et al.*, 1998; RUSSAK, 1990; LIEPERT, 2002; LIANG *et al.*, 2005). Stanhill e Cohen (2001) identificaram uma redução média global da radiação solar entre 0,51 W/m² por década, entre 1950 e 2000. As mudanças projetadas da radiação solar também indicam uma diminuição dos seus índices, para o período entre 2006 e 2049, na maioria das regiões do mundo, com exceção de parte da china e da Europa, África do Sul, Austrália, e América do Norte (WILD *et al.*, 2015).

O Brasil é um país que tem um importante potencial solar, e a região Nordeste dispõe de altos índices de radiação solar ao longo do ano inteiro. Portanto, a utilização da energia solar no país é muito atraente, e a energia fotovoltaica apresenta-se com uma boa alternativa para atender e suprir o aumento da demanda energética, além de possibilitar a expansão da rede de energia elétrica local em regiões isoladas. Esse tipo de energia que tem a luz solar como fonte é renovável, limpa e inesgotável. Contudo, devido a intermitência e ao alto custo dessa tecnologia, a elaboração de projeto de usinas solares fotovoltaicas deve ser bem estudada e analisada antes de sua instalação.

Os dados do relatório de 2019 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) indicaram um aumento exponencial da utilização de energia fotovoltaica no Brasil no período 2013-2018. Um dos principais fatores é o aumento da compreensão do princípio operacional desses equipamentos (DE MIRANDA *et al.*, 2019). Em 2012, havia 6 usinas fotovoltaicas no Brasil, que somando, geravam uma potência instalada de 12 MW. Já em 2018, esse número subiu para 2.352 de unidades instaladas, com capacidade de produzir até 1.283 MW e representando 31,6 % do potencial energético do país. As energias renováveis correspondiam a 45,3 % da oferta interna de energia no Brasil em 2018 (EPE, 2019). Estima-se que até 2023 essas fontes representem 84% da matriz energética brasileira (DE MIRANDA *et al.*, 2019).

No dimensionamento do sistema fotovoltaico, a utilização dos parâmetros de operação e a seleção adequada dos módulos fotovoltaicos é fundamental para garantir uma boa eficiência do sistema. Esses parâmetros podem ser facilmente modelados e calculados,

através dos diversos softwares disponíveis no mercado. Não obstante, a instabilidade do clima também precisa ser considerada. Tradicionalmente, presume-se que a incidência de radiação solar seja constante ao longo dos anos, quando é realizado o planejamento de um sistema que utiliza energia solar. No entanto, as considerações da radiação solar de superfície é um dos parâmetros mais importantes na avaliação dos impactos das mudanças climáticas (FINGER *et al.*, 2012; SCHEWE *et al.*, 2014; MÜLLER; ROBERTSON 2014; JEREZ *et al.*, 2015b; VEZZOLI *et al.*, 2015).

A produção energética por meio de fontes de energias renováveis também é vulnerável às mudanças climáticas. A produção elétrica de um painel solar fotovoltaico é influenciada por perdas na conversão de energia, temperatura de operação dos módulos, sujeira, erros de fabricação, transporte de energia no cabeamento do sistema (OMAR *et al.*, 2014; FESHARAKI *et al.*, 2011). O ambiente ideal para a operação das células solares é em baixas temperaturas e em condições climáticas sem grandes variações. Na prática, os parâmetros climáticos estão em constante transformação, tornando ainda mais complexo a otimização das condições de operação dos equipamentos fotovoltaicos, que naturalmente são dimensionados para condições padrão de teste. Os dois parâmetros climáticos com maior interferência na sua eficiência energética são a temperatura do ar e a radiação solar (ABDELKADER *et al.*, 2010).

Os estudos focados nos impactos das mudanças climáticas na produção fotovoltaica ainda são prematuros. É nesse sentido que o presente estudo busca compreender as tendências climáticas da temperatura média do ar e radiação solar. Para tanto, utilizam-se séries históricas, e se verifica a influência de parâmetros climáticos na geração de energia elétrica por módulos fotovoltaicos a médio e longo prazo, para a cidade de Patos-PB. Com isso, será possível compreender a viabilidade da instalação de usinas fotovoltaicas na cidade.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar as tendências presentes em dados de séries climáticas para a cidade de Patos-PB e verificar se há impactos significativos no potencial de produção energética de painéis solares.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estruturar, organizar e analisar os dados climáticos de séries históricas da cidade de Patos-PB;
- Verificar se há tendências climáticas significativas nos dados da radiação solar incidente e temperatura média do ar, no período entre 1975 e 2014;
- Identificar o impacto das mudanças climáticas analisadas no potencial de geração de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A organização da presente dissertação segue o formato de compêndio de artigos e está subdividida em 6 capítulos, conforme a estrutura que segue:

- Capítulo 1: parte introdutória e de motivações do trabalho, que compreende a introdução, objetivos gerais e objetivos específicos.
- Capítulo 2: referencial teórico necessário para a elaboração deste trabalho, a partir da compreensão de estudos já desenvolvidos e do estado da arte.
- Capítulo 3: artigo “Considerações sobre as tendências climáticas na produção de energia fotovoltaica em regiões semiáridas” que faz uma revisão bibliográfica de trabalhos relacionados ao impacto de tendências e mudanças climáticas na produção fotovoltaica em regiões semiáridas. O trabalho foi publicado e apresentado no Congresso Nacional da Diversidade do Semiárido - CONADIS, realizado em Natal-RN, em 2018.
- Capítulo 4: artigo “Caracterização e avaliação da radiação solar na cidade de Patos, região semiárida da Paraíba” avalia as tendências da radiação solar no município de Patos, através da aplicação do teste estatístico de Mann-Kendall e de dados da estação meteorológica disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o período de 2007 a 2018. Esse parâmetro climático é utilizado na modelagem do sistema fotovoltaico apresentado no Capítulo seguinte. Este trabalho

foi publicado e apresentado no Congresso Internacional de Meio Ambiente e Sociedade (CONIMAS), realizado em Campina Grande – Paraíba, em 2019.

- Capítulo 5: artigo “Impactos de tendências climáticas na produção de eletricidade em Patos-PB”, que analisa o impacto das alterações de tendências climáticas da temperatura do ar e da radiação solar incidente na produção de energia elétrica fotovoltaica, na cidade de Patos-PB, entre 1975 e 2018. O artigo será traduzido para posterior submissão em periódico internacional.
- Capítulo 6: neste capítulo estão as considerações finais do trabalho com base nos artigos desenvolvidos, além de sugestões para trabalhos futuros.

E por último estão listadas todas as referências bibliográficas citadas na dissertação.

CAPÍTULO II

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As mudanças climáticas envolvem toda irregularidade nos padrões climáticos, verificadas em períodos extensos e que independe de suas causas (IPCC, 2007). Goossens e Berger (1986) definiram as mudanças climáticas como sendo o conjunto de variações no clima, seja de natureza estatística ou de origem físicas. Essas mudanças são um fato global atual e, a partir das análises de projeções, é muito provável que continuem a acontecer nas próximas décadas. A identificação da origem das mutações climáticas é complexa, sistêmica e de difícil reconhecimento pontual, considerando as inúmeras fontes estáticas e móveis que contribuem para ocorrência desse fenômeno. Portanto, as causas não devem ser consideradas como unidirecionais, pois suas fontes são múltiplas e difusas, e suas consequências são cumulativas (SOUZA *et al.*, 2017).

As mudanças climáticas são caracterizadas pelo conjunto de transformações no estado do clima e podem ser observadas, tanto pela variabilidade, como por variações nas médias das propriedades do clima. Esse processo tipicamente ocorre em períodos considerados longos, décadas ou mais (BARCELLOS *et al.*, 2009).

A variabilidade climática é um fenômeno natural que faz parte da dinâmica climática nas diversas regiões. Quando essa variabilidade ocorre em excesso e de forma desordenada, pode provocar impactos sociais e econômicos. As energias renováveis que dependem dos parâmetros climáticos estão sensíveis a essas mudanças e podem sofrer impactos significativos em seu desempenho. Na energia solar, por exemplo, a eficiência da geração fotovoltaica depende do comportamento do recurso solar, e por isso, é essencial o seu monitoramento sob a ótica de melhoria do seu desempenho (HECKTHEUER, 2001).

O estudo das tendências climáticas por meio de séries meteorológicas é essencial para estabelecer o efeito das mudanças climáticas no planejamento energético, principalmente os de origem renovável (OBREGON; MARENGO, 2007). A validação dos estudos realizados em escala global fundamenta a compreensão dos estudos regionais. A interação da temperatura do ar, umidade, precipitação, pressão atmosférica e radiação solar caracterizam o clima de uma região (DE QUEIROZ *et al.*, 2012; MARENGO *et al.*, 2007).

As projeções climáticas apontam para mudanças nos padrões de temperatura, radiação e precipitação para os biomas brasileiros, interferindo na disponibilidade e aplicação dos recursos naturais que são essenciais à existência e manutenção dos seres humanos (MAGRIN *et al.*, 2014). Os cenários climáticos futuros sugerem para este século um aumento da temperatura média global entre 1,8 e 4,0 °C (IPCC, 2007). Esses cenários descrevem possíveis níveis de emissão de gases de efeito estufa.

A análise realizada por De Oliveira (2018) na cidade de Uberaba-MG mostrou que no período de 1960 a 2010 houve um aumento generalizado dos índices de temperatura extrema máxima e mínima. O agravamento do aquecimento global se intensificou a partir da revolução industrial, através do aumento da concentração da emissão de GEE. As mudanças climáticas não se resumem apenas ao aumento de temperatura média, mas são uma realidade complexa, dinâmica e que envolvem uma reação em cadeia de diversos parâmetros climáticos (CONTI, 2005).

A 21ª Conferência das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (COP21) realizada em 2015 firmou o Acordo de Paris com 195 países, com o objetivo principal consolidar as políticas de redução da emissão de gases de efeito estufa, para manter a temperatura média global até 2 °C acima dos níveis industriais, e limitar os aumentos a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais (*United Nations Framework Convention for Climate Change* - UNFCCC, 2015). Além disso, a ideia do acordo é proporcionar uma melhor estrutura para os países lidarem com os efeitos das variações do clima, através de novas tecnologias e recursos financeiros.

A solução dos desafios que envolvem o regime climático seguem dois princípios fundamentais da UNFCCC: “responsabilidades comuns, porém diferenciadas” e das “responsabilidades históricas”. Por esses princípios, os países desenvolvidos com capacidade financeira e tecnológica devem tomar a linha de frente de atuação no combate a

emissão de gases de efeito estufa. Além disso, devem auxiliar os países em desenvolvimento com ações voltadas a mitigação e adaptação, para o alcance dessas metas globais. O centro das discussões nas conferências climáticas gira em torno da busca pelas respostas das seguintes perguntas: O que fazer? Quem fazer? Quando fazer? Como fazer? Quais recursos utilizar? (BUENO, 2016).

2.2 TESTE DE MANN-KENDALL

Há diversas abordagens que possibilitam a análise dos efeitos das mudanças climáticas. A construção de modelos climáticos é uma delas, onde é possível realizar projeções e simular o comportamento de parâmetros climáticos, em cenários futuros e dentro de uma esfera regional. Outra possibilidade é o uso de séries históricas, onde se avaliam tendências de dados climáticos já disponíveis em banco de dados. Este segundo método, por meio do teste não-paramétrico de Mann-Kendall, é sugerido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). No entanto, também é possível utilizar o método paramétrico para abordagem estatística de alterações climáticas, que além de possibilitar a verificação de tendências, permite quantificar a influência sobre a probabilidade de ocorrência dos dados variáveis estudados (KHALIQ *et al.*, 2006; KHALIQ *et al.*, 2009).

Antes da aplicação do teste é necessária a obtenção e tratamento de dados, obtidos do banco de dados disponível. Por meio da análise espacial das tendências climáticas é possível observar as variações do comportamento dos parâmetros climáticos e identificar as regiões que vem sofrendo mudanças no clima (PINHEIRO *et al.*, 2013).

O teste estatístico de Mann-Kendall é um método não-paramétrico, robusto e que compara de forma sequencial os dados de uma série com o de outros, determinando se há uma tendência temporal de mudanças significativas. A vantagem desse teste é que ele não necessita de distribuição normal dos dados e é pouco afetado pelas séries não homogêneas. Entretanto, esse método requer que a sucessão de dados seja independente e aleatória (MANN, 1945; KENDALL, 1975; YUE *et al.*, 2002; ZHANG *et al.*, 2004; NEETI; EASTMAN, 2011).

Segundo Yevjevich (1972), as tendências climáticas de uma série de dados temporais são definidas como sendo a variação sistemática e contínua em qualquer parâmetro de uma amostra, com exceção das variações periódicas ou quase periódicas.

O método do teste de Mann-Kendall baseia-se na hipótese de rejeitar ou não uma hipótese nula (H_0), verificando se não há tendências significativas na série de dados, considerando um determinado nível de significância (α). Assumindo H_0 como nulo, a tendência é estatisticamente igual a zero. Deve ser testado a hipótese H_1 , que indicam que, os valores da amostra possuem uma tendência monotônica no tempo, podendo ser positiva ou negativa. Portanto, a variável estatística S do teste é dada pela equação (2.1) (SILVA *et al.*, 2010):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sin}al(x_j - x_i) \quad (2.1)$$

$$\text{sin}al(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{se } x_j > x_i \\ 0, & \text{se } x_j = x_i \\ -1, & \text{se } x_j < x_i \end{cases} \quad (2.2)$$

Sendo x_i o valor observado, x_j o outro valor da série e n o número de dados da série e para $n \geq 10$, a variável S pode ser definida a partir de uma distribuição normal, com a média $E[S]$ e a variância $Var[S]$ obtida, respectivamente, pelas equações (2.3) e (2.4), segundo Kendall (1975):

$$E[S] = 0 \quad (2.3)$$

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (2.4)$$

t_i representa o número de repetições de uma extensão i . O índice Z indica o teste estatístico parametrizado, indicando a atuação da tendência (positivo ou negativo), que é obtido pelas equações (2.5), (2.6), (2.7):

$$Z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}; \text{para } S > 0 \quad (2.5)$$

$$Z = 0; \text{para } S = 0 \quad (2.6)$$

$$Z = \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}; \text{para } S < 0 \quad (2.7)$$

Para $Z > 0$, a tendência está aumentando, para $Z < 0$ a tendência diminui. A hipótese nula, para ausência de tendência da série de dados, é rejeitada se o valor do módulo de Z for superior a $Z_{\alpha/2}$ (valor da distribuição normal cumulativa padrão). Os níveis de significância tipicamente aplicados são: $+p < 0,1$ (que indica uma probabilidade de 10% de que a relação entre as variáveis no estudo não seja verdadeira), $*p < 0,05$ (que indica uma probabilidade de 5% de que a relação entre as variáveis no estudo não seja verdadeira), $**p < 0,01$ (que indica uma probabilidade de 1% de que a relação entre as variáveis no estudo não seja verdadeira) e $***p < 0,001$ (que indica uma probabilidade de 0,1% de que a relação entre as variáveis no estudo não seja verdadeira).

2.3 REGIÕES SEMIÁRIDAS E O CLIMA EM PATOS

A maior parte do Nordeste brasileiro encontra-se na região semiárida. A média anual de precipitação nessas regiões é menor que 800 mm, provocando período de secas extremas (MARENGO *et al.*, 2011). Esses locais são muito susceptíveis às secas, além da irregularidade temporal nas precipitações. Os impactos provocados por esses eventos climáticos trazem consequências para produção agrícola, pecuária, abastecimento de água para consumo humano e animal, e também para o setor de geração de energia, segundo o relatório do Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento e Banco Mundial de 2014 (DE NYS; ENGLE, 2014). Os indicadores socioeconômicos nessas regiões são afetados pelas condições climáticas e indicam a vulnerabilidade de muitas famílias. Apesar

dos problemas das regiões semiáridas serem crônicos e contínuos, a população ainda não conseguiu se adaptar aos fenômenos climáticos (CHEN *et al.*, 2017).

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o principal sistema meteorológico responsável pelas chuvas na região semiárida do Nordeste brasileiro (FERREIRA *et al.*, 2005). A ZCIT circunda a faixa equatorial e é resultado da confluência dos ventos alísios do Atlântico Tropical Norte e Atlântico Tropical Sul, que por meio de movimentos ascendentes com alta concentração de vapor d'água, provoca níveis elevados de precipitação. A ZCIT é posicionada em regiões de baixa pressão e segue, preferencialmente, para as regiões onde a temperatura da superfície do mar (TSM) é mais alta, atuando como um mecanismo de manutenção do balanço térmico global, transferindo calor e umidade dos oceanos entre os níveis da atmosfera e troposfera. O período de permanência da ZCIT nas regiões mais ao norte ou mais ao sul é que define a estação de chuvas no semiárido brasileiro, e que são determinadas pelas variações dos padrões da TSM (MOLION *et al.*, 2002; MELO *et al.*, 2009). Entre os meses de fevereiro e abril, a ZCIT fica mais ao sul (4°S) do Brasil, período este onde as chuvas na região do semiárido nordestino é mais predominante (MARENGO *et al.*, 2011).

No Nordeste brasileiro, onde há locais com ecossistemas mais frágeis devido a soma das ações de degradação humana, as mudanças climáticas são mais acentuadas (SANTOS; BRITO, 2007). Sem dúvidas, o semiárido brasileiro apresenta-se como a região mais vulnerável as alterações do clima do país (MARENGO *et al.*, 2011).

Diante do cenário de seca cada dia mais intenso das regiões semiáridas, associado a variabilidade climática, o funcionamento das usinas hidrelétricas tem ficado comprometido (MILHORANCE *et al.*, 2019). Neste contexto, fontes alternativas de energia têm surgido e ganhado espaço, especialmente a energia solar fotovoltaica devido ao alto potencial de incidência solar nessas regiões que se sobrepõe as demais regiões do país, devido a sua localização geográfica e características climáticas.

Na Paraíba, a região semiárida abrange mais de 170 municípios, correspondendo a 85% de sua área (MEDEIROS *et al.*, 2017a). O fator de evidência nessas regiões é o clima, predominantemente quente e seco. É ele que determina a variação dos outros elementos da natureza, como a vegetação, relevo, *etc.* (ARAÚJO, 2011). A característica climática que prevalece nessas regiões é de temperaturas altas ao longo do ano, com valores médios que

chegam de 20°C, enquanto que as temperaturas mínima ficam acima de 15°C e máxima pode atingir 40°C. A cidade de Patos está inserida nesse contexto climático e devido as suas características populacionais e sua evolução econômica nos últimos anos, representa um local em potencial para elaboração de estudos e pesquisas que relacionam as tendências climáticas e o seu desenvolvimento socioeconômico.

O aumento da temperatura associado às mudanças climáticas e o aquecimento global causa a evaporação dos lagos, açudes, e reservatórios, intensificando o período de estiagem. As chuvas estão cada vez mais raras e quando ocorrem possuem uma alta intensidade, capaz de provocar grandes prejuízos a população (MARENGO *et al.*, 2011). Os estudos de Vincent *et al.* (2005) e Obregon e Marengo (2007) identificaram que no período entre 1961 e 2000 a temperatura média do ar na região Nordeste aumentou entre 0,5 e 0,6 °C. Na América Central e do Sul o aumento foi de 1 °C em um século (MAGRIN *et al.*, 2014). O estudo do IPCC (2007) indicou uma elevação de 0,6 °C na temperatura média da superfície global no último século.

2.4 PRODUÇÃO ENERGÉTICA EM REGIÕES SEMIÁRIDAS

A crise do petróleo na década de 70, associada a realidade das alterações climáticas provocada pelos GEE, despertou a necessidade de buscar alternativas para o consumo de energia proveniente de combustíveis fósseis. O planejamento e implantação de políticas públicas devem ser as principais ferramentas no processo de desenvolvimento sustentável, a partir do mapeamento das potencialidades energéticas (UDAETA *et al.*, 2012). Em regiões semiáridas, além da preocupação ambiental, as energias renováveis surgem como alternativas para reduzir a migração da população do campo para a zona urbana, contribuir na produção agrícola e melhorar a qualidade de vida da população (RAMALHO *et al.*, 2013).

A demanda de energia vem crescendo consideravelmente nos últimos anos, devido ao aumento do padrão de vida da população e da implantação de recursos tecnológicos em indústrias. Para Vidal (2005) a energia é essencial para manutenção da vida e o equilíbrio no universo. Dentro desse cenário, a matriz energética brasileira precisou se readaptar, sinalizando para a adoção de fontes de energia renováveis.

A biomassa representa uma alternativa importante para diversificação da matriz energética do país e com alto potencial de crescimento nos próximos anos (BORGES *et al.*,

2017). O Brasil dispõe desses recursos naturais, capaz de produzir energia elétrica e biocombustíveis para demanda nacional e até internacional, como o etanol e o biodiesel. Na produção de energia elétrica no Brasil, a biomassa tem sido utilizada principalmente em sistemas de cogeração de setores industriais e de serviço (PEÇANHA *et al.*, 2019).

A geração de energia eólica também tem sido outra fonte renovável cada vez mais utilizada em regiões semiáridas, capaz de promover o desenvolvimento social e econômico (DE MEDEIROS *et al.*, 2020). Essa fonte está relacionada com o comportamento solar, sendo gerada a partir da alteração de temperatura das camadas de ar, resultando em gradientes de pressão e densidade. As coordenadas de latitude e longitude, além do distanciamento do mar, também exercem influência na ocorrência dos ventos. A capacidade dos aerogeradores tem sido aprimorada nos últimos anos, aumentando o aproveitamento dessa fonte de energia. Estudos tem comprovado a potencialidade das fontes eólicas em regiões semiáridas, como o realizado por Da Silva *et al.* (2012), que identificou resultados satisfatórios na produção de energia eólica ao longo do ano em Juazeiro-BA, entre os anos 2000 e 2009, devido ao comportamento do ventos serem bem definidos na cidade.

O alto potencial solar é outra característica valiosa do semiárido. Essa característica proporciona a utilização dos sistemas de energia solar térmica e fotovoltaica nessas regiões, para diversas aplicações, como industriais, residenciais e comerciais (BERTICELLI *et al.*, 2017).

2.5 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A mitigação dos prejuízos ambientais provocados pelas fontes com alto teor de carbono é apenas um dos pilares do desenvolvimento sustentável, paralelo as adaptações aos desafios das mudanças climáticas (LINDOSO *et al.*, 2013). A utilização da energia solar fotovoltaica é uma excelente alternativa que incorpora esses dois pilares, descentralizando a indústria de geração de energia, além de proporcionar mais renda as populações mais vulneráveis.

A energia solar é sem dúvida uma tecnologia promissora e de grande competitividade, no entanto, ainda ocupa uma posição desfavorável no ranking da matriz

elétrica mundial (IEA, 2018). No Brasil, essa fonte começou a ser promovida a partir de 2003, por meio do Programa Luz para Todos (LPT) que visa a universalização do acesso e uso da energia elétrica, e com isso, observa-se hoje uma diminuição dos custos e do tempo de conexão de micro e minigeradores (NASCIMENTO, 2015).

Alguns especialistas defendem que a instalação e geração da energia solar em pequenas propriedades do semiárido para fornecer energia para rede elétrica é uma opção mais economicamente viável do que a própria agricultura (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, 2017). Ao adotar esse sistema, caminha-se em direção a um futuro sustentável para todos, visto que a energia solar é uma energia limpa, inesgotável, a vida útil dos painéis é alta, além da possibilidade de instalação em locais isolados. O uso da energia solar deve ser paralelo a outros tipos de energia renováveis, uma vez que essa forma de energia possui variabilidade e intermitência na geração.

Os módulos fotovoltaicos são formados pelo conjunto de células fotovoltaicas encapsuladas, fabricados com materiais semicondutores, formando uma junção P-N, semelhante a um diodo (BUTZ, 2002). Os semicondutores mais utilizados são o silício monocristalino (m-Si) e o silício policristalino (p-Si), representando mais de 85% do mercado. Essas células são responsáveis por captar os fótons da luz solar e converter em energia elétrica, através do efeito fotovoltaico. Esse fenômeno ocorre quando os materiais semicondutores são expostos a radiação solar. A radiação é absorvida pelo material condutor que possui duas regiões diferentes eletricamente, uma do tipo N e outra do tipo P, gerando pares elétrons lacuna, que atuam como transportadores da corrente elétrica. O campo elétrico gerado pela movimentação dos elétrons produz uma diferença de potencial (DDP) entre as faces da célula e é gerado uma corrente elétrica. Quanto maior a radiação solar incidente nas células fotovoltaicas, maior será a corrente fotogerada produzida. Já a tensão de circuito aberto, varia de forma linear com a temperatura. A Figura 2.1 mostra o detalhamento de uma célula fotovoltaica através de um corte transversal em sua estrutura, onde é possível visualizar as suas respectivas camadas.

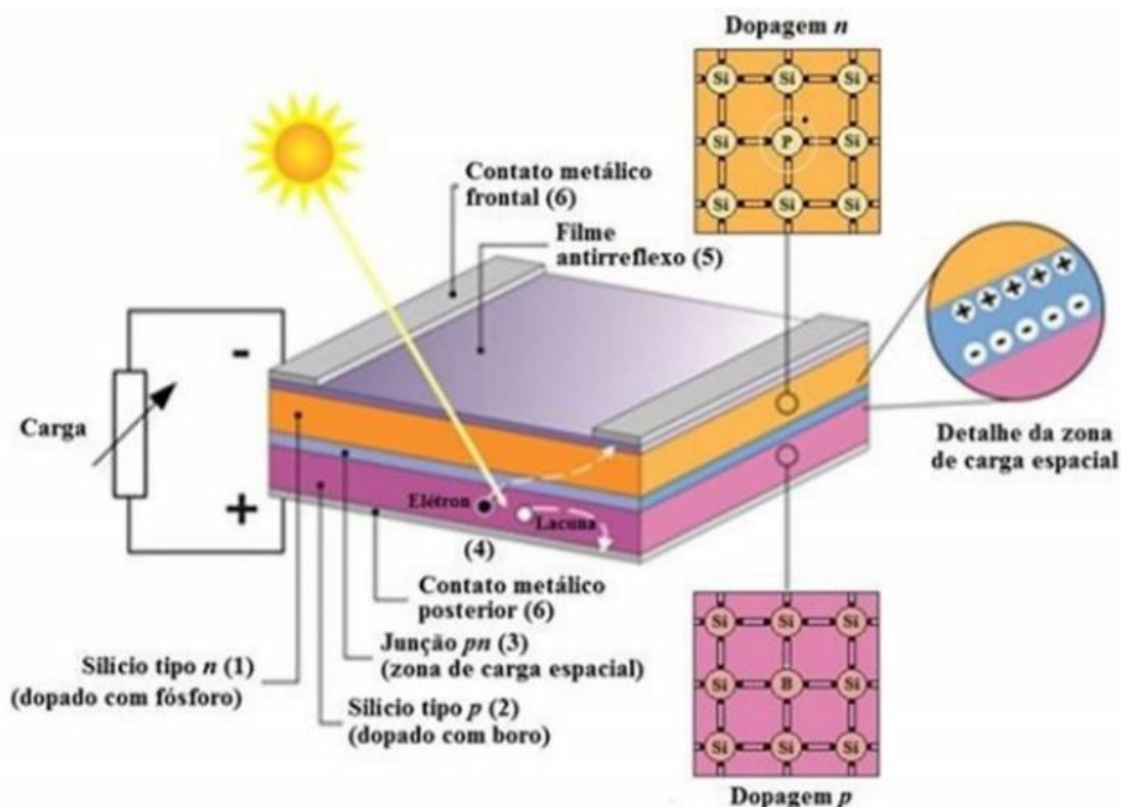


Figura 2.1 - Corte transversal da estrutura básica de uma célula fotovoltaica.

Fonte: Pinho *et al.* (2014)

As aplicações da energia fotovoltaica estiveram por muito tempo associadas a custo elevado e a limitação de instalação. No entanto, essas atribuições têm sido reconsideradas, devido ao processo de avanço da tecnologia relacionadas aos equipamentos, da expansão das instalações conectadas a rede e do crescimento do potencial elétrico gerado por essas fontes, tornando cada vez mais viável esse sistema (DE FREITAS *et al.*, 2017). A resolução normativa nº 482 de 2012, da ANEEL (2019) garantiu benefícios aos consumidores que produzirem sua própria energia e forneça à rede de distribuição o excedente da produção, após seu consumo. Esse excedente gerado entre o que ele produziu e o que consumiu se transforma em crédito para o pagamento de faturas de energia de outros imóveis do mesmo titular. Em 2019, a própria agência reguladora propôs mudanças desses subsídios, para taxar gradualmente essa energia produzida, alegando os custos de rede e os encargos setoriais (ANEEL, 2019).

O processo de conversão da energia solar para a energia elétrica não possui eficiência de 100%, pois em todos os processos de transformação de energia há perdas. Araújo (1985)

identificou que a eficiência das células fotovoltaicas pode ser influenciada pela seletividade de absorção da célula e os seus aspectos construtivos. Para Omar *et al.* (2014), o potencial elétrico fotovoltaico pode ser alterado devido à por perdas no processo de conversão de energia, temperatura de operação dos módulos, sujeira, erros de fabricação, transporte de energia no cabeamento do sistema.

A avaliação da operacionalização de módulos fotovoltaicos, assim como o desenvolvimento de projetos de sistemas de energia que utilizam a fonte solar, devem considerar as características elétricas, ou seja, a relação da tensão-corrente, além dos índices de radiação solar e temperatura do ar, por se tratarem de parâmetros dinâmicos. A Figura 2.2 indica a curva característica corrente-tensão (I-V) para módulos fotovoltaicos. O ponto máximo da potência é obtido através do retângulo da área máxima área sob a curva (PINHO *et al.*, 2014).

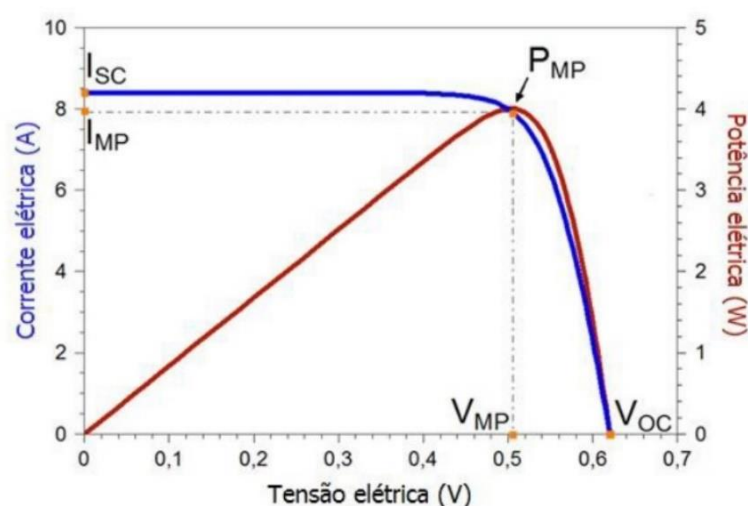


Figura 2.2 - Curvas características corrente-tensão (I-V) para módulos fotovoltaicos.

Fonte: Pinho *et al.* (2014)

As mudanças nos valores da radiação solar incidente e da temperatura ambiente podem provocar alterações na temperatura de operação das células fotovoltaicas, que estão presente nos módulos fotovoltaicos. A elevação da temperatura de operação tende a reduzir a eficiência do sistema, causada pela diminuição da tensão e um aumento desprezível de corrente, como é possível ver na Figura 2.3.

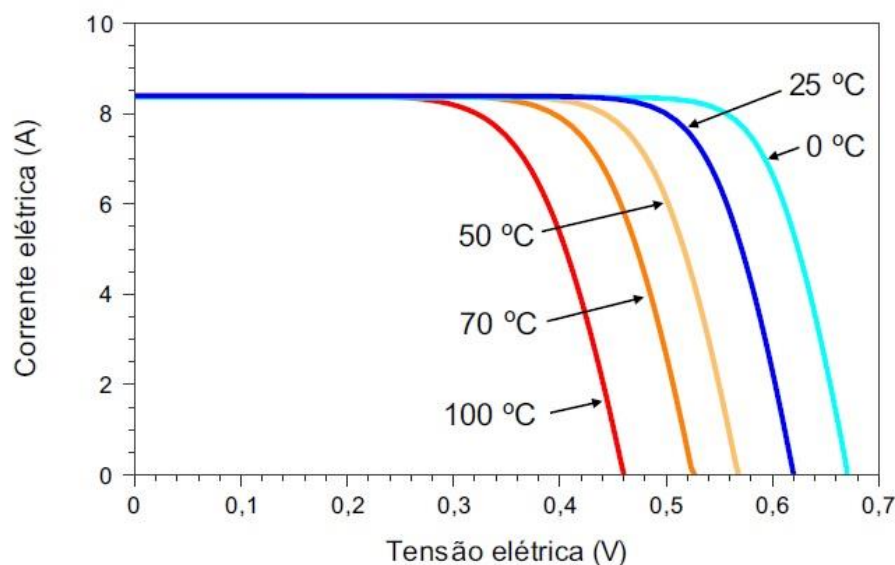


Figura 2.3 - Curva I-V para diferentes temperaturas.

Fonte: Pinho *et al.* (2014)

A elaboração de projeto de uma usina fotovoltaica envolve o estudo da radiação solar, o posicionamento dos módulos fotovoltaicos, a demanda energética a ser atendida, a área disponível para instalação dos módulos, entre outros. Portanto, de forma geral, o dimensionamento de um sistema fotovoltaico não é tão simples, e os ajustes e as análises são fundamentais para tornar o sistema viável economicamente. Esses sistemas podem estar isolados da rede (SFI) ou conectados à rede (SFCR). No primeiro, o mais importante é atender a uma demanda de energia elétrica específica. Já no segundo, é possível gerar energia excedente e obter crédito junto a concessionária.

CAPÍTULO III

3. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM REGIÕES SEMIÁRIDAS

RESUMO

Já está demonstrado que as mudanças climáticas alteram a capacidade de produção das energias renováveis, assim passando a ser uma avaliação necessária no que tange a instalação de novas usinas de energia desse tipo de fonte. A alteração de parâmetros climáticos como temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura média e nebulosidade tendem a prejudicar a região semiárida social e economicamente. Tendo em conta esse cenário, lança-se mão de projeções de parâmetros climáticos com base na ciência, produzindo aproximações da evolução de seus comportamentos e possibilitando prognósticos sobre o desempenho da produção de energias renováveis. Fazendo uma revisão bibliográfica, o presente trabalho se dedica a verificar como as tendências e mudanças climáticas impactam na produção de energia fotovoltaica em regiões semiáridas. A estratégia de busca elaborada forneceu um total de 65 estudos. Ao término das análises, 14 artigos preencheram todos os critérios de inclusão para o presente trabalho, sendo publicados entre os anos de 2007 e 2018. Conclui-se que, apesar da escassez de trabalhos sobre o tema, especialmente em regiões semiáridas, os resultados de pesquisas científicas e tecnológicas pode contribuir para minimizar a difícil situação das populações que vivem nessas regiões. A experiência internacional em outras regiões semiáridas do mundo pode servir de modelo prático, proporcionando melhoria na qualidade de vida mesmo em situações climáticas adversas. A sensibilidade do semiárido às mudanças climáticas na produção de energias renováveis foi detectada, sendo assim vinculada à necessidade da consideração de tendências

climáticas na implementação e otimização de futuras instalações de energias renováveis nessas áreas.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Tendências climáticas; Semiárido; Energia solar fotovoltaica

3.1 INTRODUÇÃO

A demanda internacional por energia elétrica tem aumentado nos últimos anos. Países localizados em regiões semiáridas também têm presenciado um aumento considerável no consumo elétrico, a exemplo do Marrocos, que devido à alta taxa de eletrificação rural e acelerado crescimento econômico do país, tem atingido um aumento de 6,5%/ano em sua taxa de consumo elétrico. A região do Nordeste Brasileiro, onde também há presença do clima semiárido, é caracterizada por oscilações climáticas moderadas ao longo do ano, com amplitudes térmicas que podem chegar a 6°C (SILVA *et al.*, 2015). A vulnerabilidade climática associada à elevação da temperatura do ar dessas regiões interfere no ecossistema, e também influencia na geração de energia fotovoltaica. A temperatura elevada de operação pode interferir no desempenho dos módulos fotovoltaicos, pois reduz a tensão de circuito aberto e sua eficiência e, portanto, é um dos fatores mais importantes a ser considerado na determinação do desempenho a longo prazo de um painel fotovoltaico (JAKHRANI *et al.*, 2011).

A região Nordeste do Brasil apresenta a menor média anual de índice de nebulosidade do país, com índices de radiação solar relativamente uniformes, tornando-se a região mais favorável a implementação de energia fotovoltaica (MARTINS *et al.*, 2008). No entanto, devido às altas temperaturas que as placas solares podem atingir, a geração de eletricidade pode ser comprometida.

Os dados climáticos da região onde os painéis solares são instalados devem ser considerados e avaliados para obter uma boa estimativa da geração da energia fotovoltaica (SIQUEIRA, 2011; CARVALHO; DELGADO, 2017). Com o passar dos anos os parâmetros climáticos como temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura média e nebulosidade estão sendo alterados devido às mudanças climáticas. As mudanças climáticas envolvem todas irregularidades nos padrões climáticos, verificadas em períodos extensos e que independem de suas causas serem naturais ou antropológicas, segundo o IPCC (2014b).

Entre as principais variações está a alteração dos padrões de temperatura do ar e precipitação pluvial provocadas, por exemplo, pela emissão de gases de efeito estufa devido a ações humanas. Essas variações podem ser comprovadas por meio de métodos estatísticos aplicados a séries de dados climáticos. A ocorrência desses fenômenos tem chamado a atenção das autoridades pelas consequências negativas que provocam no âmbito social e econômico. A análise realizada por De Oliveira (2018), na cidade de Uberaba-MG, mostrou que no período de 1960 a 2010 houve um aumento generalizado dos índices de temperatura extrema máxima e mínima. Farias Neto *et al.* (2018) compilaram estudos que avaliam os efeitos climáticos sobre a produção de energias renováveis no mundo, indicando que há interferência do avanço do aquecimento global na produção de energia renovável. A repercussão das mudanças climáticas na produção de energias renováveis foi o tema da revisão apresentada por Fonseca e Carvalho (2019).

Em alguns casos os impactos climáticos beneficiam a produção e, em outros, prejudicam. Porém, como é possível perceber que há regiões que apresentam potencial de queda de sua produção, se faz importante averiguar localmente as melhores alternativas, de maneira a otimizar o sistema energético.

Ainda é comum que os projetos que utilizam painéis fotovoltaicos como fonte de geração de eletricidade considerem os parâmetros climáticos influentes na sua produção como constantes, como por exemplo a incidência de radiação solar (considera-se como isenta de alteração por efeitos climáticos). Entretanto, as tendências climáticas analisadas e avaliadas em diversas regiões, incluindo as regiões semiáridas, têm mostrado que não é possível mais considerar esses parâmetros climáticos como valores constantes e estáveis no decorrer dos anos (Jerez *et al.*, 2015b). Portanto, a compreensão da dinâmica do clima é de fundamental importância na determinação dos valores produzidos de energia.

O objetivo do presente trabalho foi realizar uma revisão de literatura para verificar como se comporta a produção de eletricidade em sistemas fotovoltaicos em regiões semiáridas, considerando o impacto das mudanças climáticas.

3.2 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: *Semiarid*, *Photovoltaic*, *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 que envolvessem a presença de combinações de descritores.

- 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.

- Critérios de Exclusão

Foram excluídos da revisão artigos que avaliaram o comportamento da produção fotovoltaica de energia em regiões que não fossem semiáridas.

- 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 com os autores. As listas de referências de todos os artigos foram também consultadas, na tentativa de encontrar novos estudos para incluir na revisão.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estratégia de busca elaborada forneceu um total de 65 estudos. Após a triagem pela leitura dos títulos, resumos e outras partes específicas do texto, 16 estudos foram considerados potencialmente elegíveis e lidos na íntegra pelos avaliadores. Ao término das análises, 14 artigos preencheram todos os critérios de inclusão para o estudo: Obregon e Marengo (2007); Skoplaki e Palyvos (2009); Crook *et al.* (2011); Pinho e Galdino (2014); Fant *et al.* (2015); Jerez *et al.* (2015b); Popovici *et al.* (2015); Wild *et al.* (2015); Bazyomo *et al.* (2016); Abrahão *et al.* (2017a); Abrahão *et al.* (2017b); Medeiros *et al.* (2017b); Busson *et al.* (2018); Hajjaj *et al.* (2018). Os estudos selecionados foram publicados entre os anos de 2007 e 2018.

O presente estudo se dedicou a analisar exclusivamente trabalhos que relacionam impactos climáticos na produção de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos em regiões semiáridas. Para tanto, os resultados estão divididos em duas partes, são elas: a apresentação de pesquisas em que há avaliação desses impactos em regiões semiáridas; e uma construção argumentativa, por se tratar de tópico de bibliografia escassa, baseada na combinação de pesquisas, as que tratam da relação entre parâmetros climáticos e a eficiência de painéis fotovoltaicos e as que estudam esses parâmetros em regiões semiáridas.

No que se refere a regiões semiáridas, a exemplo do Sul do continente africano, Fant *et al.* (2015) apresentaram um método estimativo, combinando modelos climáticos do *Integrated Global Systems Model* (IGSM) e do *Coupled Model Intercomparison Project phase 3* (CMIP- 3), para verificar o impacto das mudanças climáticas na produção de energia eólica e solar. Mostrou-se que o potencial de produção energética fotovoltaico, assim como a velocidade do vento e a radiação solar horizontal global, apresentará mudanças médias próximas de zero até 2050. As possibilidades extremas de mudanças desses indicadores variam entre $\pm 15\%$, porém estão associadas a uma baixa probabilidade.

Resultado semelhante foi obtido por Abrahão *et al.* (2017b), que avaliaram o desempenho de sistemas fotovoltaicos nas cidades de Patos e Sousa, no Sertão Paraibano. Levando em consideração as tendências climáticas dos locais, e confrontando dados do período 1970-1980 versus 2004-2014, foram verificadas produções elétricas fotovoltaicas quase inalteradas, decrescendo cerca de 1% apenas devido aos incrementos na temperatura do ar das localidades estudadas. Tal resultado corrobora o estudo de Crook *et al.* (2011), que reforçam a hipótese ao examinarem como a temperatura e a insolação, ao longo do século XXI, afetam a produção de energia fotovoltaica em um cenário projetado de mudanças climáticas (IPCC SRES A1B). As regiões áridas e semiáridas da Espanha, Argélia, Arábia Saudita e Austrália foram avaliadas, e verificou-se que, para o período entre 2010 e 2080, a produção fotovoltaica na Espanha aumentará cerca de 2%, com queda de 2% na Argélia, 6% na Arábia Saudita e menos de 1% na Austrália, considerando apenas o modelo HadGEM1 (*new Hadley Centre Global Environmental Model*, desenvolvido pelo IPCC). Jerez *et al.* (2015b) confirmaram tal influência avaliando os impactos das mudanças climáticas na produção fotovoltaica de energia elétrica na Europa, indicando que a Espanha apresentará uma variação negativa da produção média de energia de 2% até a virada do século (segundo o cenário climático RCP8.5, que é o pior cenário para emissões atmosféricas).

No que diz respeito a relação entre temperatura e eficiência na produção fotovoltaica, o comportamento térmico dos painéis fotovoltaicos que operam em regiões semiáridas é complexo, já que a temperatura dessas regiões é maior do que a indicada pelo NOCT (*Nominal Operating Cell Temperature*, temperatura nominal de operação da célula) principalmente no período entre 10:00 e 14:00 horas (BUSSON *et al.*, 2018). A temperatura de operação é definida por meio de um balanço de energia, onde a energia proveniente da radiação solar é convertida parcialmente em energia elétrica, com dissipação de energia térmica (PINHO; GALDINO, 2014). O estudo verificou que nos módulos fotovoltaicos há uma divergência entre a temperatura de operação estimada pelos modelos matemáticos e a temperatura medida, e uma diferença de 13% foi identificada entre essas duas temperaturas. Para maximizar a eficiência dos coletores, a sua temperatura de operação deve ser a menor possível, já que acima de 25 °C, cada incremento de 1°C reduz a eficiência aproximadamente em 0,45% (POPOVICI *et al.*, 2015). O mesmo resultado foi obtido por Skoplaki e Palyvos (2009), que discutiram o comportamento da eficiência de um painel fotovoltaico com relação a variação da temperatura. Foi verificado que a temperatura é fator importante num sistema fotovoltaico, pois esta influencia tanto na eficiência do painel quanto na energia produzida. O estudo demonstrou que a energia produzida por um painel fotovoltaico tem relação inversamente linear com a temperatura. Estando estruturada a hipótese de que a temperatura ambiente influencia na eficiência de produção fotovoltaica de energia elétrica, serão a seguir avaliados os impactos climáticos na produção de energia elétrica em regiões semiáridas no mundo.

A partir de modelos climáticos fornecidos no 5º relatório de avaliação do IPCC, Wild *et al.* (2015) avaliaram as alterações da radiação solar que atingem a superfície terrestre, a nebulosidade, a temperatura do ar e suas implicações na geração de energia utilizando módulos fotovoltaicos. As projeções entre os anos de 2006 e 2049 nas principais regiões com alto potencial solar indicaram uma redução média na produção fotovoltaica na ordem de 1% a cada década. Os países inseridos em regiões semiáridas, a saber: Austrália, Estados Unidos, noroeste da China, Índia, África do Sul e Espanha, apresentaram uma projeção de aquecimento de 0,05 °C/ano para as próximas décadas. Ainda segundo o estudo, as tendências de radiação solar com o céu claro são de pequeno decréscimo ou nulas em praticamente todo o mundo. Nas regiões do sudeste dos Estados Unidos, China, África do Sul e Austrália, a nebulosidade tem uma tendência de reduzir seus índices em cerca de

0,05%/ano. Diante disso, os efeitos da redução da nebulosidade tendem a provocar um aumento da radiação solar medida na superfície em cerca de $0,03 \text{ W/m}^2/\text{ano}$.

Uma comparação entre 12 modelos físicos de produção fotovoltaica foi realizada por Hajjaj *et al.* (2018), no Marrocos, para verificar o desempenho dos módulos fotovoltaicos sob condições climáticas semiáridas e quentes. Identificou-se que, para todos os modelos de células solares utilizados no estudo, o aumento de temperatura de operação do módulo provocou uma diminuição de $0,01\%/^{\circ}\text{C}$ no seu valor de corrente aberta. Já para a energia máxima produzida, observou-se uma queda de $0,43\%/^{\circ}\text{C}$, devido à elevação da temperatura. Essa constatação foi comprovada com a redução da eficiência fotovoltaica que pode chegar a 2,5% durante o período de verão. A Figura 3.1 mostra as alterações na eficiência dos módulos, provocadas pelas modificações na temperatura durante o ano de 2017. Já a Figura 3.2 apresenta uma curva de regressão linear do comportamento da eficiência com a variação da temperatura.

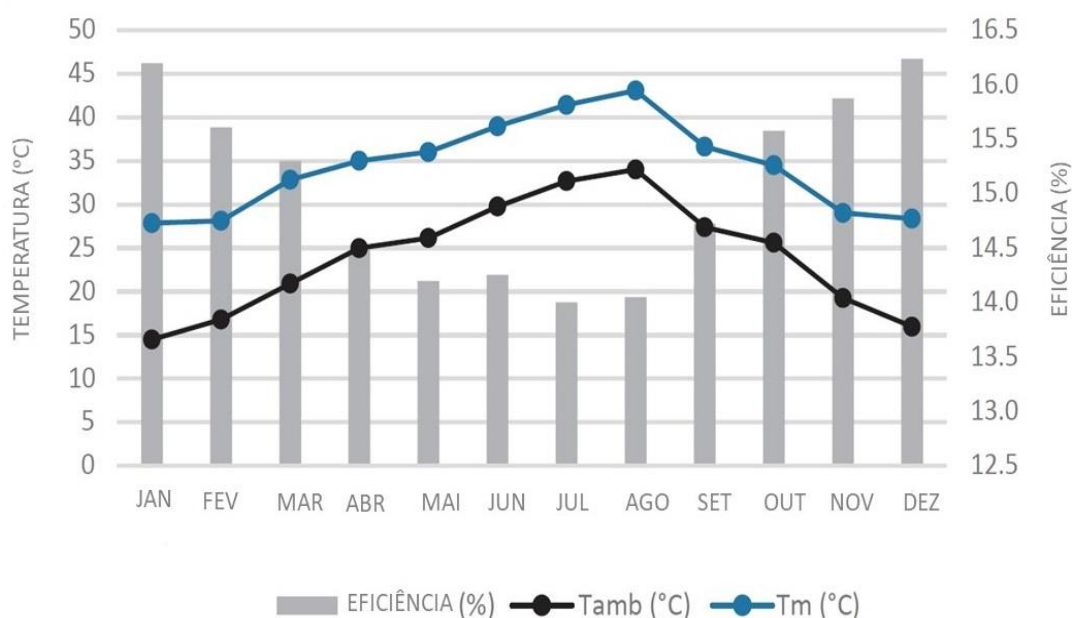


Figura 3.1 - Variação da eficiência dos módulos fotovoltaicos considerando a temperatura do módulo e a temperatura ambiente.

Fonte: Adaptado de Hajjaj *et al.* (2018).

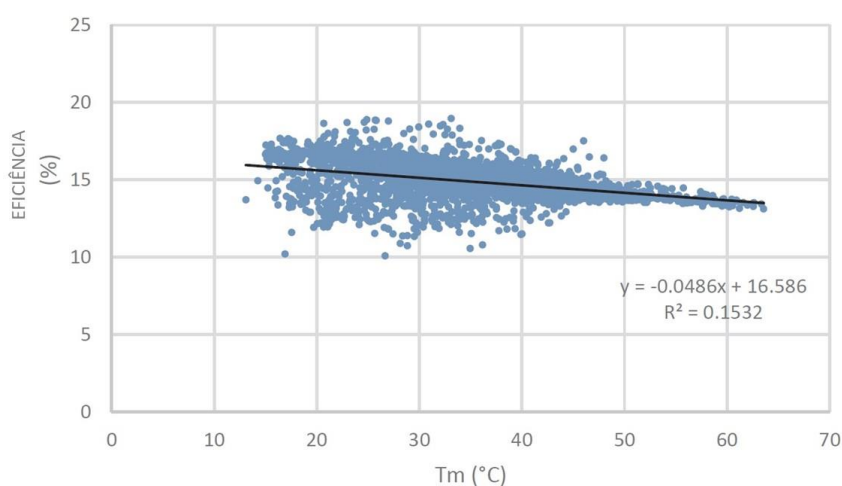


Figura 3.2 - Relação entre eficiência e temperatura do módulo fotovoltaico.

Fonte: Adaptado de Haijaj *et al.* (2018).

Bazyomo *et al.* (2016) realizaram um estudo com oito modelos climáticos em países do oeste africano, com o objetivo de analisar e prever as tendências de radiação solar e temperatura do ar entre os anos de 2006 e 2100. Observou-se uma tendência positiva em todas as regiões, com valores de incremento de temperatura de até 0,08 °C/ano. Os autores também identificaram que, devido às alterações de temperatura, a tendência é reduzir a produção fotovoltaica em até 0,032% a cada ano, com exceção da região da Libéria e Serra Leoa. Neste caso, o que pode ter havido é uma compensação dos efeitos de temperatura na eficiência dos coletores, por exemplo, pela redução do índice de nebulosidade. O artigo não engloba a análise dos outros parâmetros climáticos e, por isso, os autores concluem que essas duas regiões, onde não há tendência de redução da geração fotovoltaica, são as mais favoráveis com relação a viabilidade das instalações de placas solares.

As regiões do semiárido normalmente possuem um grande potencial para instalação de painéis fotovoltaicos. Por outro lado, em determinados períodos do dia, quando a temperatura é muito elevada, o funcionamento dos módulos é prejudicado. A ação dos ventos deve também ser considerada, tendo em vista que a sua atividade provoca uma troca térmica do ambiente com o painel, reduzindo a sua temperatura e aumentando a sua potência máxima (BUSSON *et al.*, 2018).

No que tange ao semiárido brasileiro, especificamente, estudos como o de Obregon e Marengo (2007), sobre a caracterização do clima no século XX no Brasil, avaliaram as tendências lineares das temperaturas médias e apontaram um acréscimo de temperatura da ordem de 0,3 °C/década a 0,4 °C/década em média no Brasil, contemplando a região do

Nordeste, indicando um aumento entre 1,2 °C e 1,6 °C em 40 anos. Medeiros *et al.* (2017b) estudaram a variabilidade e tendências para a temperatura média do ar no Sertão da Paraíba. Fazendo uso de dados históricos, foi desenvolvido um modelo de estimativa de tendências, chegando ao resultado de que para essa região haverá acréscimo de entre 0,008 °C/ano e 0,011 °C/ano na temperatura média do ar. O que, em 2040, pode representar um aumento da ordem de 0,2 °C a 0,3 °C. Abrahão *et al.* (2017a) analisaram o comportamento da temperatura da mesorregião Sertão Paraibano, por meio de dados meteorológicos ao longo de 40 anos, entre 1975 e 2015, de estações em duas cidades, Patos e Sousa. Utilizando os testes Mann-Kendall e declividade de Sen, verificaram que em Patos houve um acréscimo na temperatura da ordem de 0,038 °C/ano, enquanto Sousa apresentou acréscimo de temperatura de 0,078 °C/ano e 0,030 °C/ano nos dois semestres do ano, respectivamente.

A Tabela 3.1 mostra dados de expectativas na produção de eletricidade e de variação da temperatura, região, período, modelo climático, e escopo espacial.

Tabela 3.1 - Resumo das expectativas na produção de eletricidade e de variação da temperatura, região, período, modelo climático, e escopo espacial para os artigos analisados.

Autores	Expectativa na produção de eletricidade	Expectativa na variação da temperatura	Região	Período	Modelo Climático	Escopo Espacial
Crook <i>et al.</i> (2011)	Aumento	n/a	*	2010-2080	HadGEM1	País
Fant <i>et al.</i> (2015)	Inalterado	n/a	África do Sul	2015-2050	IGSM, CMIP-3	País
Jerez <i>et al.</i> (2015b)	Diminuição	n/a	Espanha	1970-1999, 2070-2099	n/a	País
Wild <i>et al.</i> (2015)	Diminuição	+ 0,05°C/ano	**	2006-2049	n/a	País
Bazyomo <i>et al.</i> (2016)	Diminuição ¹	+ 0,08°C/ano	Oeste africano	2006-2100	****	Região
Abrahão <i>et al.</i> (2017a)	n/a	+ 0,038°C/ano (Patos); n/s (Souza)	Sertão Paraibano	1975-2015	<i>Mann-Kendall</i>	Região
Abrahão <i>et al.</i> (2017b)	Inalterado	n/a	Nordeste brasileiro	1970-1980, 2004-2014	n/a	Região
Medeiros <i>et al.</i> (2017b)	n/a	+ 0,008°C/ano a 0,011°C/ano	Sertão Paraibano	2017-2040	<i>Mann-Kendall</i> ²	Região
Hajjaj <i>et al.</i> (2018)	Diminuição	n/a	Marrocos	2017 (Jan. a Dez.)	n/a	País

n/a não apresentado.

n/s não significativo.

¹ à exceção das regiões de Libéria e Serra Leoa, onde há possíveis aumentos.

² teste não paramétrico utilizado para análise dos dados históricos e estimados.

* regiões: Espanha, Argélia, Arábia Saudita e Austrália.

** regiões: Austrália, Estados Unidos, Noroeste da China, Índia, África do Sul e Espanha.

*** os modelos são: NOAA, NCC, MPI, MIROC, IPSL, ICHEC, CNRM, CCCMA.

Destaca-se a necessidade de rigorosos estudos do comportamento histórico do clima no local de instalação dos novos parques solares, incluindo a identificação das tendências climáticas. A demanda por pesquisas nesse contexto continuará crescente, necessitando de esforços multidisciplinares, com a interação entre as instituições de pesquisa, a fim de definir métodos e estratégias para serem aplicados no semiárido.

3.4 CONCLUSÃO

Após a análise dos artigos apresentados, constatou-se que a produção de energia renovável por fonte fotovoltaica pode ser influenciada por tendências climáticas. O semiárido brasileiro possui boa localização para instalação de usinas solares, já que possui bons níveis de radiação ao longo do ano. Porém, apresenta tendências climáticas que apontam para elevação da já elevada temperatura do ar, que conforme demonstrado, resulta numa redução na produção fotovoltaica. Ressalta-se a necessidade de investigação mais profunda de como e onde se darão esses impactos.

Diante do caráter pouco difundido que o tópico estudado possui, percebeu-se produção de literatura científica ainda escassa. No entanto, a demanda por pesquisas nesse contexto continuará crescente, necessitando de esforços multidisciplinares, com a interação entre as instituições de pesquisa, a fim de definir métodos e estratégias para serem aplicados no semiárido brasileiro. A vulnerabilidade de sistemas energéticos renováveis será verificada em trabalhos futuros dos autores, por meio da obtenção de dados climáticos, estimando a produção de eletricidade dessas fontes.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHÃO, R.; PEIXOTO, I. M. B. M.; SILVA, L. P.; MEDEIROS, S. E. L. Mais calor para o Sertão? Perspectivas de tendências no índice de calor do Sertão Paraibano. In: XX CBAGRO - Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2017, Petrolina. **Anais do XX CBAGRO**, 2017a.

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.], 2017b.

BAZYOMO, S. D.; LAWIN, A. E.; COULIBALY, O.; WISSER, D.; OUEDRAOGO, A. Forecasted Changes in West Africa Photovoltaic Energy Output by 2045. **Climate**, v. 4, N. 4, p. 53, 2016.

BUSSON, B. O.; DIAS, P. H. F.; DUPONT, I. M.; CAMPOS, P. H. M.; CARVALHO, P. C.; BARROSO, E. A. Q. Validação de modelos de comportamento térmico de painéis fotovoltaicos para o Semiárido brasileiro. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018**, 2018.

CARVALHO, M.; DELGADO, D. Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix. **LALCA- Revista Latino Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 1, N. 1, p. 64-85, 2017.

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 OLIVEIRA, A. S.; PEREIRA, G. A.; RODRIGUES, A. F.; NETO, J. D. O. M. Tendências em índices extremos de precipitação e temperatura do ar na cidade de Uberaba, MG. **Sustentare**, v. 2, n. 1, p. 118-134, 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, J. R.; SILVA JUNIOR, J. M.; ABRAHÃO, R.; 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.

FONSECA, L. F. S.; CARVALHO, M. IMPACTO DAS TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO DE ENERGIA POR FONTES RENOVÁVEIS. In: V Fórum Latino-Americano de Engenharia e Sustentabilidade, 2019, João Pessoa. **Anais do V Fórum Latino-Americano de Engenharia e Sustentabilidade**, 2019.

HAJJAJ, C.; MERROUNI, A. A.; BOUAICHI, A.; BENHMIDA, M.; SAHNOUN, S.; GHENNIQUI, A.; ZITOUNI, H. Evaluation, comparison and experimental validation of different PV power prediction models under semi-arid climate. **Energy Conversion and Management**, v. 173, p. 476-488, 2018.

IPCC – Intergovernmental Panel in Climate Change. 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. Cambridge/New York, Cambridge University Press/IPCC, 2014b.

JAKHRANI, A. Q.; OTHMAN, A. K.; RIGIT, A. R. H.; SAMO, S. R. Comparison of Solar Photovoltaic Module Temperature Models. **World Applied Science Journal**, v. 14, p. 01-08, 2011.

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, 2015b.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; SILVA, S. A. B.; ABREU, S. L.; Colle, S. Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment. **Energy Policy**, v. 36, p. 2853-2864, 2008.

MEDEIROS, S. E. L.; SILVA, W. K. M.; SILVA, L. P.; PEIXOTO, I. M. B. M.; ABRAHAO, R. Análise da variabilidade e tendências para a temperatura média do ar no Sertão Paraibano com dados reais e estimados. In: II CONIDIS, 2017, Campina Grande. **Anais do II CONIDIS**, 2017b.

OBREGON, G. O.; MARENGO, J. A. Caracterização do clima no século XX no Brasil: tendência de chuvas e temperaturas médias e extremas. Relatório nº 2 – Projeto: Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade – subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XX, 2007.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES)**. Rio de Janeiro, CEPEL–DTE–CRESESB, 2014.

POPOVICI, C. G.; HUDISTEANU, S. V.; MATEESCU, T. D.; CHERECHES, N. C. Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks. **Energy Procedia**, v. 85, p. 425-432, 2015.

SILVA, F. F. N.; GOMES, A. C. S.; LUCIO, P. S.; ARAÚJO, E. H. S.; SILVA, C. M. S. Estudo de caso: temperatura média mensal de regiões do litoral e semiárido do nordeste brasileiro (nota de pesquisa). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, Ano 11, 2015.

SIQUEIRA, C. D. Regime internacional de mudanças climáticas e segurança energética. **Mediações-Revista de Ciências Sociais**, v. 16, n. 2, p. 210-227, 2011.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. **Solar energy**, v. 83, n. 5, p. 614-624, 2009.

WILD, M.; FOLINI, D.; HENSCHHEL, F.; FISCHER, N.; MÜLLER, B. 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.

CAPÍTULO IV

4. CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NA CIDADE DE PATOS, REGIÃO SEMIÁRIDA DA PARAÍBA

RESUMO

Ao longo do tempo, as mudanças climáticas e seus efeitos provocados ao meio ambiente estão cada vez mais evidentes. Estudos tem apontado que os elementos climáticos interferem em diversos aspectos da sociedade, como em setores da engenharia, energia, hidrologia, biologia, entre outros. Alterações na produção de energia podem levar a mudanças no retorno econômico de projetos, afetando positivamente ou negativamente os resultados. Inserido neste contexto, este trabalho se propõe a avaliar as tendências de séries climáticas da radiação solar no município de Patos, localizado na região semiárida da Paraíba. A partir de dados obtidos da estação automática A321 do INMET foi realizada uma análise estatística pelo teste não paramétrico de Mann-Kendall, para identificar o comportamento desse parâmetro climático nos últimos anos. Os resultados indicaram que, no período analisado entre 2007 e 2018, apenas o mês de agosto apresentou tendência significativa de aumento nos valores de radiação. Este resultado pode ter sido consequência do curto período das séries climáticas disponíveis nessa região. Estudos como esse são importantes, pois podem auxiliar a tomada de decisões, por exemplo, com relação a viabilidade de implantação de uma usina solar, onde as variações na radiação podem causar interferências na produção energética.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, radiação solar, tendências.

4.1 INTRODUÇÃO

A apropriação e a subtração indevida dos recursos do meio ambiente praticados pelo homem têm provocado um declínio do ecossistema sem precedentes. Por ser um processo lento e pouco visível, a maior parte das pessoas negligenciam os seus efeitos. Contudo, há um processo contínuo de mudanças, por exemplo, nos parâmetros climáticos. Um número considerável de elementos pode intervir no clima, como temperatura do ar, precipitação, radiação solar, velocidade do vento, entre outros. Esses elementos atuam conjuntamente com o balanço de energia do planeta, ocasionando alterações em diferentes escalas de tempo e provocando variações constantes no clima da Terra (FÜSSEL, 2007).

A radiação solar é um parâmetro importante e deve ser considerada nos diversos aspectos da engenharia, hidrologia, biologia, entre outras áreas (BARTOK *et al.*, 2017). Presume-se que ela tenha sido constante ao longo do tempo. Entretanto, alguns fenômenos podem ser observados a partir da avaliação dos efeitos na radiação solar a longo prazo, como por exemplo, o “escurecimento global” e o efeito estufa, ambos relacionados a impactos humanos. O primeiro vem sendo analisado mais profundamente desde os anos 1950 e Ohmura (1989) observaram que esse fenômeno ocorre quando a quantidade de radiação solar que chega a superfície da Terra é bloqueada devido a emissão de aerossóis e outros materiais particulados. Essas substâncias são capazes de reter a energia solar, como também a formação das nuvens, que provocam a reflexão dos raios solares. Já o efeito estufa provoca a retenção da radiação terrestre pela atmosfera, aumentando a espessura da camada onde se encontram os GEEs. Esses gases são importantes e necessários para manter a Terra aquecida em condições ideais de sobrevivência dos seres vivos (MOSS *et al.*, 2010). Entretanto, o excesso de GEE provoca consequências negativas ao homem e ao meio ambiente.

Os cenários de séries climáticas, abordados por meio da avaliação de tendências, indicam um aumento ou diminuição de valores médios de um determinado parâmetro para um intervalo de tempo. Essas tendências climáticas apresentam resultados importantes e podem auxiliar países como Portugal, que possui características geográficas e socioeconômicas vulneráveis às mudanças climáticas, a atuar com medidas efetivas de prevenção (SCHMIDT *et al.*, 2012). O tratado ambiental internacional assinado em 1992, conhecido como a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (CQNUAC) tratou em seu artigo 3.º do chamado "Princípio da Precaução". Seu principal objetivo era alcançar a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa em todos os

países, tanto os desenvolvidos, como os em desenvolvimento. No Brasil, essa Convenção foi promulgada através de um decreto presidencial em 1998, como forma de reconhecimento da nação com relação as suas responsabilidades relacionadas a sustentabilidade.

A avaliação do comportamento ambiental que se baseia a dinâmica dos parâmetros climáticos parte do princípio da análise de séries climáticas de um local específico. Atualmente, há ferramentas disponíveis que auxiliam o tratamento de dados climáticos e a formação de suas tendências, como por exemplo o teste de Mann-Kendall (SALVIANO *et al.*, 2016).

Diante desse contexto, este trabalho se propõe a analisar as alterações climáticas por meio do parâmetro de radiação solar global na cidade de Patos, localizada no semiárido Paraibano. A abordagem desse tema ainda é escassa nessa região, que está inserida em um grupo de municípios com pouca visibilidade do ponto de vista socioeconômico. Esse estudo faz parte de um projeto mais amplo que abrange duas dissertações e um projeto de iniciação científica e envolve a repercussão dessas mudanças climáticas na geração de energia elétrica e térmica de origem solar.

4.2 DESENVOLVIMENTO

O estudo realizado por Stanhill e Cohen (2001) analisou 854 plataformas que fornecem dados de radiação solar global em todo o mundo e verificou uma redução 0,51 W/m² por década entre 1950 e 2000 (escurecimento global). Nos Estados Unidos verificou-se que, entre os anos de 1961 e 1990, houve um declínio acentuado nos índices de radiação solar de superfície. Os valores chegaram a -10 % nesse período, atingindo 19 W/m² de redução na concentração de radiação. Em comparação com os outros países, verifica-se que houve uma redução significativa. As medições e estudos envolvendo os anos posteriores a 1990 têm indicado uma possível transição da fase do escurecimento global para o período de clareamento (WILD *et al.*, 2015).

Remund e Müller (2010) analisaram as alterações na radiação solar global por meio de séries temporais com no mínimo 40 anos e suas projeções até 2100, também com base nos dados do IPCC. O período analisado foi de 1950 a 2009, dividido em dois subperíodos (1950-1985 e 1985-2009). Apenas uma tendência negativa foi encontrada para o primeiro período, denominado de escurecimento global. No segundo, a tendência foi positiva em

todas as regiões, com exceção da Índia e Canadá. Estatisticamente, o primeiro período tem uma tendência mais significativa, com fator aproximado de 2.

Segundo Nunes *et al.* (2019), o clima pode ser entendido como a associação das condições meteorológicas que prevalecem em uma determinada área após um período longo. Neste contexto, a representatividade dos valores médios dos parâmetros climáticos está diretamente associada ao tempo total que foi utilizado na análise, formando a série temporal. Quando comparamos os resultados obtidos ao longo de um intervalo de tempo de um ano com resultados obtidos ao longo de 10 anos, ou de 10 anos com aqueles obtidos ao longo de 100 anos, há uma diferença considerável. É fundamental ter séries climáticas de dados para se verificar as alterações e evoluções do clima, como também determinar suas projeções.

O Nordeste brasileiro é uma região que possui uma pequena parte de seu território ocupado por indústrias, e cerca de 60% de seu território concentra-se no semiárido. Apesar de ser caracterizada como uma região com alta variabilidade temporal, suas condições climáticas, mais especificamente os índices de radiação, favorecem a utilização da energia solar. A duração solar diária média chega a 12 horas e os valores instantâneos da radiação até 1200 W/m^2 (SILVA *et al.*, 2010).

Soni *et al.* (2012) avaliaram a radiação global média de 12 estações automáticas da Índia, entre os anos de 1971 e 2005. Houve uma redução da radiação média anual entre 0,1% ($0,3 \text{ W/m}^2$) e 3,6% ($9,0 \text{ W/m}^2$) por década nas estações. Estudo semelhante foi feito por Padma Kumari *et al.* (2007), onde é relatada uma queda da média mensal de radiação solar global na Índia da ordem de $0,86 \text{ W/m}^2$ a cada ano, entre 1981 e 2004. A Índia apresentou um crescimento econômico exponencial a partir dos anos 1990 devido a industrialização e urbanização, que provocou um aumento da demanda de energia elétrica e com isso, aumentou a emissão de poluentes.

Bartok *et al.* (2017) realizaram um estudo na Europa para comparar as projeções de mudanças na Radiação Solar de Superfície (RSS) por meio de modelos climáticos globais e regionais. Foi identificada uma diminuição da RSS de $0,60 \text{ W/m}^2$ por década, entre os anos de 1971 a 2005. O comportamento da cobertura de nuvens pode ser interpretado como um fator importante nessas mudanças. Wild *et al.* (2015) examinaram dados de modelos climáticos do projeto CMIP5 do relatório do IPCC, com o objetivo de identificar potenciais mudanças na radiação solar de superfície nas próximas décadas em diversos países. Por meio de modelos globais, o cenário para a radiação solar até 2049 é de acréscimo em cerca de $0,03 \text{ W/m}^2/\text{ano}$ nas regiões da China, Austrália, África do Sul, Sudeste da América do Norte,

Norte da América e grande parte da Europa. São exceções as regiões da Índia e Noroeste da China, onde a radiação de todo o céu será reduzida.

4.3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho consistiu na elaboração de uma pesquisa bibliográfica para levantamento de artigos científicos e trabalhos acadêmicos no banco de dados do 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*, *Semiarid*, e *Radiation*, 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 estudo de séries climáticas envolvendo radiação solar, suas projeções para os próximos anos, e os impactos das mudanças climáticas.

- Critérios de exclusão

Foram excluídos da revisão artigos que não avaliaram a radiação solar.

- 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. As listas de referências de todos os artigos foram consultadas, na tentativa de encontrar novos estudos para esta revisão.

Em seguida, por meio de dados da estação automática A321 proveniente do INMET foi feito um levantamento com os valores da Radiação Solar Global na cidade de Patos, localizada na região semiárida do estado da Paraíba, Brasil. Os dados utilizados foram referentes ao período entre 2007 e 2018, pois antes de 2007 não havia sido instalada a estação automática nessa cidade. As medições da Radiação solar foram feitas diariamente entre 06:00 e 19:00 h, em intervalos de 1 hora. Constatou-se a ausência de alguns dados, possivelmente decorrentes de falhas nos sensores ou sinal de satélite. Os períodos com dados

incompletos foram desconsiderados no cálculo das médias e das análises de tendências. Por meio de planilhas do Excel foi realizada uma estruturação dos dados para caracterização climática e a identificação das médias dos valores por período. Em seguida, foi aplicado o teste não paramétrico de Mann-Kendall para as análises estatísticas. A utilização desse teste é indicada para esse tipo de análise, pois ele avalia as séries temporais de dados climáticos com eficiência (MODARRES *et al.*, 2007).

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação dos artigos lidos e discutidos neste trabalho mostram uma convergência com relação a identificação de alterações climáticas que o planeta vem apresentando, provocados, sobretudo, pela ação humana.

Neste estudo, os resultados das análises das tendências climáticas não foram muito expressivos devido ao curto intervalo de tempo dos dados disponíveis, em decorrência da brevidade da instalação da estação automática na cidade objeto de estudo. A OMM orienta que a identificação das características do clima de determinado local deve ser feita por meio da análise de valores médios de elementos meteorológicos, apresentados em séries climáticas ao longo de um período de, no mínimo, 30 anos (PEREIRA *et al.*, 2013). Esse é um período suficiente para identificar as tendências climáticas representativas no local em consideração. Contudo, é possível verificar alguns comportamentos da radiação no período utilizado na presente pesquisa.

Na Figura 4.1 é possível identificar uma queda nos valores de radiação solar global nos meses de junho e julho, mesmo não sendo os meses característicos pela ocorrência de chuvas na região. Os meses com maiores índices de chuva em Patos são fevereiro, março e abril. Esse resultado pode nos indicar que, o comportamento da radiação não está necessariamente vinculado a ocorrência de chuvas. No mês de novembro foi registrado o maior valor médio da radiação.

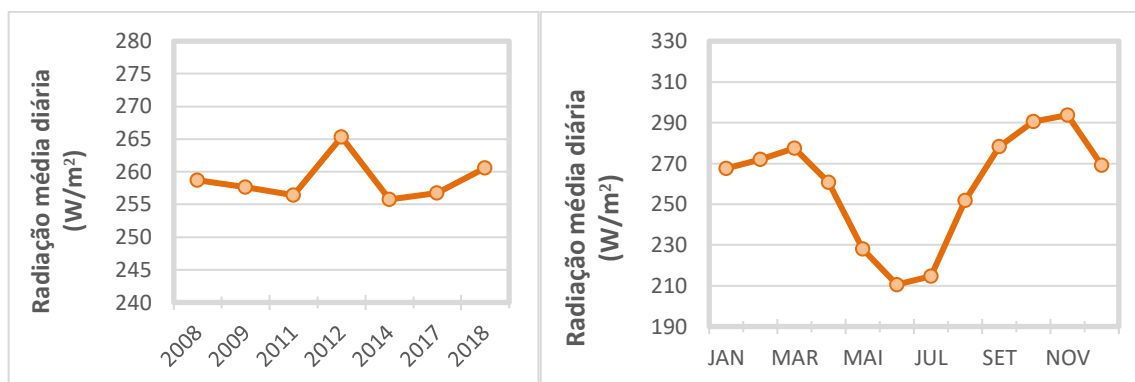


Figura 4.1 - Caracterização da radiação solar global média diária ao longo dos anos estudados e mensalmente para a cidade de Patos-PB no período entre 2007 e 2018.

A tendência da radiação no Nordeste brasileiro no período de 1948 a 2006 pode ser dividida em dois momentos, de acordo com Silva *et al.* (2010). O primeiro, até o ano de 1988, representa o declínio do saldo acumulado da radiação solar. Esse período é caracterizado pelos efeitos do “escurecimento global” e pela variação nos índices de nebulosidade (LIANG *et al.*, 2005; QIAN *et al.*, 2006). Já no segundo momento, a partir de 1989, verificou-se a inversão do “escurecimento global”, com tendências significativas positivas da radiação. Os efeitos dessa inversão são terríveis ao clima, notadamente na temperatura da superfície da Terra.

A Tabela 4.1 mostra o resultado do teste estatístico de Mann-Kendall aplicado aos dados analisados. Apesar dos poucos dados disponíveis, é possível verificar uma tendência significativa positiva nos valores médios da radiação solar global para o mês de agosto. Esse resultado representa um incremento no valor da radiação média no mês de agosto de 5,34 W/m² a cada ano, entre os anos de 2007 e 2018. Os outros meses, como também o período anual, não apresentaram tendências significativas, o que pode ser explicado pelo curto período da série.

Tabela 4.1 - Tendências de radiação solar média verificadas por meio da aplicação do teste de Mann-Kendall entre os anos de 2007 a 2018 para a cidade de Patos-PB.

Período	Radiação Média (W/m².ano)
<i>Janeiro</i>	-0,60 ns
<i>Fevereiro</i>	-2,70 ns
<i>Março</i>	-2,22 ns
<i>Abril</i>	- 1,27 ns
<i>Maio</i>	1,37 ns
<i>Junho</i>	2,22 ns
<i>Julho</i>	2,21 ns
<i>Agosto</i>	5,34 +
<i>Setembro</i>	0,39 ns
<i>Outubro</i>	0,12 ns
<i>Novembro</i>	-2,58 ns
<i>Dezembro</i>	-0,11 ns
Anual	-0,23 ns

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

Apesar dos resultados das tendências de radiação apresentados neste estudo não expressarem mudanças significativas em seu comportamento, com tendências significativas apenas no mês de agosto, estudos semelhantes (REMUND *et al.*, 2010; SONI *et al.*, 2012; BARTOK *et al.*, 2017) foram realizados em outras regiões e foi possível identificar, em diferentes cenários, a evolução dos parâmetros climáticos ao longo dos anos.

4.5 CONCLUSÃO

Concluiu-se que não é possível determinar de forma consistente o cenário climático e suas tendências de radiação solar na cidade de Patos-PB nos últimos anos. Os dados disponíveis das séries climáticas são muito curtos e não foram suficientes para o desenvolvimento dessas análises. Apenas o mês de agosto apresentou uma tendência significativa positiva da radiação solar média no período analisado.

Contudo, por se tratar de tópico de bibliografia escassa sobre tendências de elementos climáticos em regiões semiáridas, este trabalho também tem o propósito de estimular e incentivar a elaboração de novas pesquisas nessa área.

4.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARTOK, B.; WILD, M.; FOLINI, D.; LÜTHI, D.; KOTLARSKI, S.; SCHÄR, C.; IMECS, Z. 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.

CQNUAC - Convenção Quadro das Nações Unidas Sobre Alterações Climáticas. 1992. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2652.htm> Acesso em: 01 jun. de 2019.

FÜSSEL, H. Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. **Global environmental change**, v. 17, n. 2, p. 155-167, 2007.

LIANG, F.; XIA, X. A. Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961–2000. **Annales Geophysicae**, v.23, n.7, p.2425-2432, 2005.

MODARRES, R.; DA SILVA, V. D. P. R. Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. **Journal of arid environments**, v. 70, n. 2, p. 344-355, 2007.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; MEEHL, G. A. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, n. 7282, p. 747, 2010.

NUNES, L. J.; MEIRELES, C. I.; PINTO GOMES, C. J.; ALMEIDA, R. N.. The Evolution of Climate Changes in Portugal: Determination of Trend Series and Its Impact on Forest Development. **Climate**, v. 7, n. 6, p. 78, 2019.

OHMURA, A. Secular variation of global radiation in Europe. **IRS'88: Current problems in atmospheric radiation**, p. 298-301, 1989.

PADMA, B. K.; LONDHE, A. L.; DANIEL, S.; JADHAV, D. B. Observational evidence of solar dimming: Offsetting surface warming over India. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 21, 2007.

PEREIRA, J. M.; ALMEIDA, P. S. D.; SOUSA, A. V. D.; PAULA, A. M. D.; MACHADO, R. B.; GONÇALVES, R. G. Climatic factors influencing triatomine occurrence in Central-West Brazil. **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**, v. 108, n. 3, p. 335-341, 2013.

QIAN, Y.; KAISER, D. P.; LEUNG, L. R.; XU, M. More frequent cloudfree sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000. **Geophysical Research Letters**, v.1, n.33, 2006.

REMUND, J.; MÜLLER, S. 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**, p. 13-17, 2010.

SALVIANO, M. F.; GROPPPO, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 64-73, 2016.

SCHMIDT, L.; SANTOS, F. D.; PRISTA, P.; SARAIVA, T.; GOMES, C. Alterações climáticas, sociais e políticas em Portugal: processos de governança num litoral em risco. **Ambiente & Sociedade**, v. 15, n. 1, p. 23-40, 2012.

SILVA, R. A.; SILVA, V. P. R.; CAVALCANTI, E. P.; SANTOS, D. N. Estudo da variabilidade da radiação solar no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n.5, p. 501-509, 2010.

SONI, V. K.; PANDITHURAI, G.; PAI, D. S. Evaluation of long-term changes of solar radiation in India. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 4, p. 540-551, 2012.

STANHILL, G.; COHEN, S. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.107, n.1, p.255-278, 2001.

WILD, M.; FOLINI, D.; HENSCHHEL, F.; FISCHER, N.; MÜLLER, B. 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.

CAPÍTULO V

5. IMPACTOS DAS TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE POR PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS EM PATOS-PB

RESUMO

O desenvolvimento sustentável tem sido um tema cada vez mais discutido em diversos setores da sociedade, com o objetivo de preservar os recursos naturais, ao mesmo tempo em que possibilita a continuidade do crescimento socioeconômico das regiões. A demanda de energia tem crescido exponencialmente, e para suprir essa demanda, a utilização de fontes renováveis de energia torna-se fundamental para garantir menor agressão ao meio ambiente. Entre as fontes renováveis, a fotovoltaica apresenta-se como uma alternativa interessante diante da sua diversificação de aplicação, integração com outras fontes, e no Brasil o alto potencial solar também é uma vantagem. No entanto, a produção de eletricidade do sistema fotovoltaico pode ser comprometida por mudanças nos parâmetros climáticos, como o aumento da temperatura média do ar. Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar as séries históricas da temperatura do ar, nebulosidade e radiação solar, e a influência desses parâmetros na produção de energia elétrica por painéis fotovoltaicos, na cidade de Patos-PB. Os dados climáticos foram obtidos do INMET para o período entre 1975 e 2018. Os anos com dados mensais incompletos foram excluídos da análise de produção de eletricidade. Foram utilizados painéis fotovoltaicos comercialmente disponíveis. Os resultados indicaram uma redução da produção de energia elétrica pelos painéis, porém os valores não foram significativos durante todo o ano. Apenas os meses de março, abril, maio, julho e agosto apresentaram tendências significativas de diminuição da produção fotovoltaica com $p < 0,05$. Estudos como este podem contribuir no planejamento e na análise de instalações de usina fotovoltaicas.

Palavras-chave: Tendências climáticas, Produção de eletricidade, Energia fotovoltaica.

5.1 INTRODUÇÃO

A partir da Segunda Guerra Mundial a demanda global por energia tem aumentado, fato justificado pela industrialização e aumento populacional. Entre os anos de 2010 e 2017, a quantidade de pessoas no mundo sem acesso à energia elétrica reduziu 30%, no entanto, esse número ainda é alto, correspondendo a 840 milhões (IEA, 2019a). Até 2030 espera-se que o consumo de energia elétrica global aumente até 50% (BOUAICHI *et al.*, 2019). O suprimento dessa demanda atual por energia é desempenhado, em até 80%, por fontes de combustíveis fósseis, ou seja, que são altamente poluentes e não renováveis. O aquecimento global provocado pela queima desses combustíveis é um fato cientificamente comprovado e tem sido cada vez mais difundido (XU *et al.*, 2018).

Diante desse contexto, as fontes de energias sustentáveis, que antes eram consideradas apenas como uma *segunda opção*, tornam-se essenciais para conter os efeitos, muitas vezes irreversíveis, provocados por fontes de energia convencionais (ABU-RUB *et al.*, 2014). Os países desenvolvidos e em desenvolvimento começaram a investir em recursos sustentáveis para atender à demanda de energia, por meio de fontes limpas e renováveis. Entre as diversas fontes de energias renováveis, a energia solar representa uma excelente alternativa. A Figura 5.1 mostra a geração de eletricidade global fracionada pelas principais fontes de energia. É possível visualizar que as energias renováveis deverão ultrapassar as fontes de carvão em 2040, atingindo 34% da geração total da eletricidade produzida no mundo.

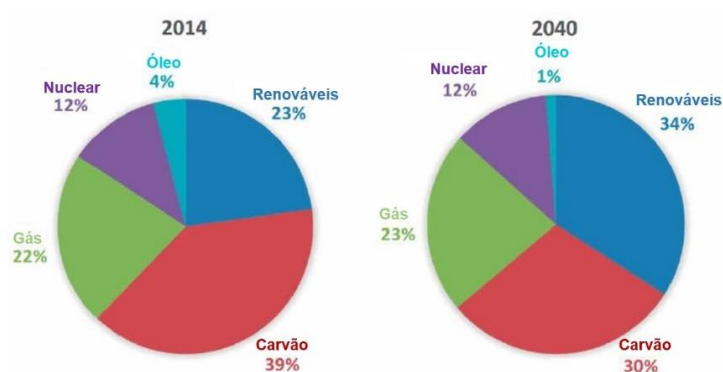


Figura 5.1 - Geração de eletricidade global durante o ano de 2014 e previsão para 2040.

Fonte: Adaptado de Malinowski *et al.* (2017).

O relatório *Future of Solar PV* publicado pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2019) indica que, a produção de energia elétrica fotovoltaica em nível global atingiu em 2018 a marca de 480 GW, alcançando o segundo lugar no ranking de fonte de eletricidade renováveis, sem considerar a Energia Solar Concentrada (CSP). O mesmo estudo prevê que, em 2030 a participação desse tipo de energia deverá atingir 13% da produção de eletricidade global. Um dos motivos da alta taxa de crescimento dessa fonte é a abrangência de sua utilização, podendo ser instalada em residências, comércios e indústrias. No período de 2009 a 2015, a energia solar aumentou sua capacidade cerca de 100 vezes (IEA, 2019b). Em 2050, espera-se que a energia fotovoltaica represente 25% da geração de energia elétrica global (IEA, 2019c).

Ao adotar esse tipo de sistema, caminha-se em direção a um futuro mais sustentável. Além de ser uma fonte inesgotável, com baixo impacto ambiental, possui poucos requisitos de manutenção (FURLAN *et al.*, 2012). Entretanto, a energia solar possui limitações que comprometem sua produção: a sua variabilidade, intermitência e sazonalidade, que podem ser influenciadas pelas condições climáticas, e, portanto, exigem o seu uso em paralelo com outros tipos de fontes de energia.

O relatório do IPCC apresentado em 2018 (IPCC, 2018), discutiu as principais implicações de um possível aumento de temperatura superior ao esperado até 2052. O aumento da temperatura esperado para esse período é de 1,5°C, com base nas tendências de aquecimento do período pré-industrial e no crescimento da temperatura média global observada na superfície de 0,87°C, comparando as décadas de 2006-2015 e 1850-1900. Verificou-se também, a elevação da temperatura dos oceanos e a elevação do nível do mar em 0,1 metros, provocado pelo derretimento de geleiras.

Os prejuízos provocados por esses fenômenos não se limitam aos seres humanos, que possuem uma alta capacidade de adaptação, mas também provocam danos ao ecossistema terrestre, que são ainda mais vulneráveis, devido a não apresentarem grande capacidade de adaptação às mudanças climáticas (SILVA *et al.*, 2018).

A produção de eletricidade solar também pode ser impactada pelas mudanças climáticas. Wild *et al.* (2015) em seu estudo realizado nas principais regiões de potencial fotovoltaico, verificaram uma tendência de declínio da produção de eletricidade até 2049, nas regiões da Índia e noroeste da China. Essa redução é explicada pela elevação da

temperatura de 0,05 K/ano e redução da radiação de 0,080 W/m²/ano nessas regiões. No mesmo estudo, foi identificado um crescimento de 0,05 a 0,10% na produção fotovoltaica no sudeste da China, grande parte da Europa, sudeste da América do Norte e pequenas partes da América do Sul e Austrália. Nessas regiões, o aumento da radiação foi suficiente para superar a elevação da temperatura.

Resultados semelhantes foram encontrados por Jerez *et al.* (2015b), indicando que haveria uma diminuição da energia fotovoltaica na região mais ao norte do continente Europeu, provocado pelas mudanças climáticas. Enquanto que no sul da Europa, a geração de eletricidade fotovoltaica aumentaria.

Crook *et al.* (2011) identificaram, através da projeção de cenários para os anos de 2010 a 2080, um crescimento da produção fotovoltaica na Europa e na China, poucas alterações nas regiões da Austrália e Argélia e uma queda da produção no oeste dos Estados Unidos e na Arábia Saudita. Esses estudos indicam e ratificam a sensibilidade do potencial de produção de eletricidade por fontes renováveis com relação às alterações dos parâmetros climáticos.

A cidade de Patos, na Paraíba, está inserida em uma região considerada de alto potencial para a produção de energias renováveis, como as energias fotovoltaica e eólica. Poucos estudos foram realizados nessa região até o momento, considerando aspectos climáticos (ABRAHÃO *et al.*, 2017; FONSECA; CARVALHO, 2019; SILVA *et al.*, 2018; SILVA JUNIOR *et al.*, 2018, FARIAS NETO *et al.*, 2019). Neste contexto, este trabalho analisa as variações da temperatura média do ar, nebulosidade e dos dados de radiação solar incidente na cidade de Patos-PB, por meio de séries históricas, e verificar a influência desses dois elementos climáticos na produção de energia solar fotovoltaica.

5.2 METODOLOGIA

A área escolhida para a realização do estudo foi a cidade de Patos. O município é localizado no Nordeste brasileiro, região semiárida da Paraíba (latitude -7,02° e longitude -37,27°). Possui uma extensão territorial de aproximadamente 473,056 km² e sua população estimada em 2019 é de 107.605 habitantes (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2019). Distante 300 km da capital, Patos situa-se no centro do estado, e isso contribuiu para que a cidade se tornasse um polo comercial e industrial do sertão da Paraíba, responsável por abastecer diversas cidades circunvizinhas. Devido às características do

clima quente e seco, a cidade é conhecida como a “Morada do sol”. A Figura 5.2 mostra a localização do estado da Paraíba dentro da região Nordeste, e a localização da cidade de Patos dentro do estado da Paraíba.



Figura 5.2 - Localização geográfica da cidade de Patos, região semiárida da Paraíba, utilizada como objeto de estudo.

Fonte: Adaptado de IBGE (2017).

A dinâmica do clima nessa região é conduzida pela variação espacial da Zona de Convergência Intertropical (MENEZES *et al.*, 2015). A ZCIT está localizada próxima a linha do equador e é formada por nuvens do tipo *cumulonimbus*, que se movimentam transportando calor e umidade da superfície dos oceanos, dos níveis inferiores da atmosfera, para a região superior da alta troposfera (ARMSTRONG *et al.*, 2011).

Os dados climáticos utilizados nesse estudo foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, por meio da estação meteorológica instalada em Patos, de código OMM 82791. Essa estação foi instalada no ano de 1975, e, portanto, os dados climáticos, com exceção da radiação solar, passaram a serem registrados e monitorados a partir desse período. A radiação solar global passou a ser registrada a partir da implantação da estação automática OMM 81913, em 2007. Com isso, a série de dados do INMET utilizada neste trabalho para a temperatura e nebulosidade foi entre os anos 1975 e 2018, e para a radiação solar global de 2007 a 2018. Na modelagem do sistema fotovoltaico, foram utilizados os dados de temperatura do ar, radiação solar global.

O estudo realizado por Farias Neto *et al.* (2019) verificou que a radiação solar global em Patos-PB não sofreu alterações significativas de 2007 até os dias atuais. Diante disso, para efeito de cálculo na modelagem da produção de energia elétrica do sistema fotovoltaico avaliado do presente trabalho, será considerado o valor da radiação solar global constante para essa cidade.

O outro parâmetro climático que está presente na modelagem do sistema fotovoltaico é a temperatura média compensada calculada diariamente, que pode ser determinada pela Equação 5.1 (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

$$T_M = \frac{T_{max} + T_{min} + T_{12UTC} + 2T_{24UTC}}{5} \quad (5.1)$$

Em que T_{max} é a temperatura máxima, T_{min} é a temperatura mínima, T_{12UTC} é a temperatura registrada às 12 UTC (tempo universal coordenado), T_{24UTC} é a temperatura registrada às 24 UTC (tempo universal coordenado), com unidades em °C.

Foi realizado o tratamento dos dados obtidos para eliminar possíveis erros provenientes da transmissão dos dados, por exemplo: ajuste da casa decimal e substituição de ponto pela vírgula para representar a casa decimal. Em seguida, os dados foram submetidos ao teste não paramétrico de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) para identificar alterações significativas nos valores de temperatura e suas tendências.

Com os dados climáticos de radiação solar global e temperatura média compensada, além dos dados técnicos do painel solar, foi possível modelar o sistema fotovoltaico e quantificar a energia elétrica produzida. Os parâmetros de funcionamento técnico do equipamento e do sistema fotovoltaico definidos neste trabalho (eficiência dos coletores, número de coletores, área de um painel e temperatura de operação da célula) foram utilizados na modelagem, possibilitando a quantificação da energia elétrica.

A produção mensal de energia elétrica (P, em kWh) por meio de painéis fotovoltaicos pode ser dada pela Equação 5.2, de acordo com Omar *et al.* (2014) e Grilo *et al.* (2018).

$$P = NPI \cdot A \cdot eff \cdot \left(\frac{G(t) \cdot t}{1000} \right) \cdot f_{temp} \quad (5.2)$$

Em que NPI é o número de painéis instalados no sistema, A é a área de um painel fotovoltaico em m², *eff* é a eficiência da taxa de conversão do painel fotovoltaico em %, G(t)

é a radiação solar global em Wh/m².dia, t é o tempo (número de dias do mês) e f_{temp} é o fator de temperatura associado às perdas devido à temperatura de operação da célula.

Os dados do $G(t)$ utilizados foram extraídos dos registros do INMET (2019) e representam a radiação solar global no plano horizontal. O fator de temperatura f_{temp} pode ser determinado pela Equação 5.3, adaptada de Notton *et al.* (2010) e Evans & Florschuetz (1977).

$$f_{temp} = [1 - \beta'(\theta_{cell} - \theta_{cell,ref})] \quad (5.3)$$

Em que β' é o coeficiente da potência de temperatura em °C⁻¹, θ_{cell} é a temperatura de operação da célula em °C, $\theta_{cell,ref}$ é a temperatura de operação da célula em condições de teste padrão em °C. O parâmetro $\theta_{cell,ref}$ foi considerado como 25 °C, B' foi considerado 0,0042°C⁻¹. A temperatura de operação da célula (θ_{cell}) pode ser obtida pela Equação 5.4, adaptada de Nolas (1987).

$$\theta_{cell} = \theta_a + (\theta - 20) \quad (5.4)$$

Em que θ_a é a temperatura ambiente (°C), e θ é a temperatura nominal de operação da célula (°C). Nas Equações 5.3 e 5.4, considerou-se que o f_{temp} e θ_{cell} são independentes do ângulo de incidência da radiação solar (AKHSASSI *et al.*, 2018).

O Painel Axitec AC-260P/156-60S (AXITEC, 2019) foi selecionado para este estudo, considerando um total 100 NPI, e seus dados técnicos estão descritos na Tabela 5.1. Foi adotado apenas a título de exemplo, um número de 100 painéis para sistema (NPI). Essa quantidade adotada não interfere nas análises pretendidas.

Tabela 5.1 - Informações técnicas do painel solar fotovoltaico selecionado para o estudo.

Área do painel (A)	1,63 m ²
Temperatura nominal da célula (θ)	45 °C
Temperatura de operação da célula em condições de teste padrão (θ_{cell,ref})	25 °C
Coeficiente da potência de temperatura (B')	0,0042°C ⁻¹

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados apresentados na Tabela 5.2 possibilitam a avaliação do grau de dispersão estatístico da temperatura média e nebulosidade na cidade de Patos, para cada mês.

Tabela 5.2 - Dados estatísticos para temperatura média e nebulosidade na cidade de Patos-PB, no período de 1975 a 2018.

Período	Média		Mediana		Variância		Desvio Padrão	
	Temp. (°C)	Neb. (décimo)	Temp. (°C)	Neb. (décimo)	Temp (°C)	Neb. (décimo)	Temp. (°C)	Neb. (décimo)
JAN	28,52	6,30	28,90	6,31	1,06	1,26	1,03	1,12
FEV	27,87	6,50	27,78	6,71	1,07	0,81	1,04	0,90
MAR	27,49	6,95	27,20	6,97	1,25	0,68	1,12	0,82
ABR	27,19	6,48	26,81	6,44	1,33	0,69	1,15	0,83
MAI	26,97	5,85	26,94	6,13	1,25	0,64	1,12	0,80
JUN	26,27	5,07	26,23	5,23	0,64	1,23	0,80	1,11
JUL	26,07	4,83	26,06	4,77	0,43	0,95	0,65	0,97
AGO	26,59	3,92	26,55	3,91	0,34	0,36	0,58	0,60
SET	27,61	3,21	27,55	3,28	0,20	0,84	0,45	0,92
OUT	28,50	3,74	28,53	3,71	0,20	0,90	0,45	0,94
NOV	28,02	4,28	29,03	4,12	0,25	0,87	0,50	0,93
DEZ	29,08	5,11	29,24	5,04	0,46	0,51	0,68	0,71

Temp. = Temperatura média compensada; Neb. = Nebulosidade

Pela Tabela 5.2, os meses entre janeiro e maio apresentaram a maior variância da temperatura, com valores acima de 1°C. O período mais quente do ano foi registrado entre os meses de outubro a janeiro, onde a temperatura média atingiu em dezembro o seu máximo valor (29,08°C). Já a nebulosidade apresentou a maior variância e desvio padrão nos meses de janeiro e junho. Os maiores valores da nebulosidade foram verificados nos meses de janeiro a abril.

A Tabela 5.3 apresenta os valores de radiação solar ($G(t)$) com as considerações das variações estatísticas.

Tabela 5.3 - Dados estatísticos para radiação solar ($G(t)$) no período de 2007 a 2018, na cidade de Patos-PB.

Período	Média	Mediana	Desvio Padrão
	G_t (Wh/m ² .dia)	G_t (Wh/m ² .dia)	G_t (Wh/m ² .dia)
JAN	6.418,44	6.387,28	235,53
FEV	6.526,36	6.365,82	428,72
MAR	6.656,20	6.706,03	251,23
ABR	6.254,89	6.254,89	233,61
MAI	5.473,06	5.467,32	241,18
JUN	5.053,93	5.032,43	297,12
JUL	5.149,14	5.208,68	434,69
AGO	6.046,02	6.046,02	290,28
SET	6.676,60	6.613,35	189,19
OUT	6.974,20	6.976,13	220,23
NOV	7.048,54	7.076,54	388,57
DEZ	6.458,51	6.504,03	335,47

$G(t)$ = Radiação solar global em plano horizontal

Na Tabela 5.3, o desvio padrão atingiu os maiores valores nos meses de fevereiro e julho, sendo 428,72 e 434,69 W/m².dia, respectivamente. Os meses de outubro e novembro registraram os maiores valores médios do $G(t)$. Cutforth e Judiesch (2007), desenvolveram pesquisa nas pradarias do Canadá, entre 1955 e 2005, e verificaram que a radiação solar média diária diminui quando se tem um aumento do número anual de precipitações e chuva. No entanto, no presente estudo, os menores valores de radiação solar foram identificados entre abril e agosto, divergindo em parte do período característico de ocorrência de chuvas na região, que é entre os meses de fevereiro e maio (MARENGO *et al.*, 2011).

A tendência da radiação solar no Nordeste brasileiro no período de 1974 a 2009 foi comparada por Silva *et al.* (2010), utilizando os dados de reanálise do Centro Nacional de Previsão Ambiental/Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica (NCEP / NCAR) dos Estados Unidos e os dados da plataforma de coleta de dados (DCP). Quatro zonas climáticas foram consideradas e constatou-se uma diminuição da radiação solar, que pode ser atribuída ao fenômeno de escurecimento global. Ao tempo em que as séries temporais apontam um aumento da duração da luz solar, a série global de radiação solar indica uma diminuição, caracterizando uma relação inversa de ambas (WAN *et al.*, 2009).

Na Figura 5.3 é apresentada a temperatura média dos 10 primeiros anos (1975-1984), 10 últimos anos (2009-2018), e para a série completa (1975 a 2018) na cidade de Patos.

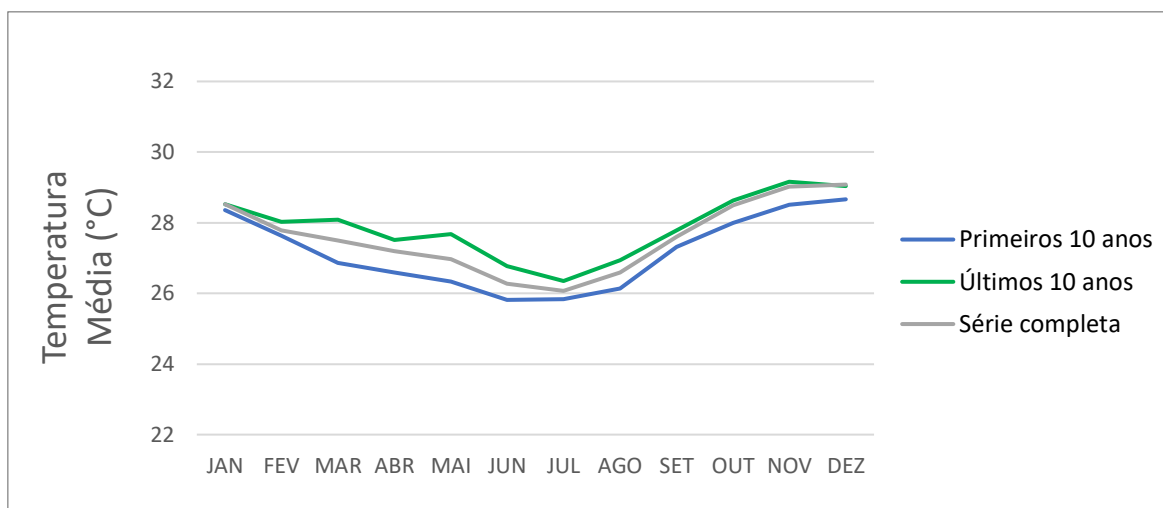


Figura 5.3 - Média mensal dos valores de temperatura média na cidade de Patos-PB, período entre 1975 a 2018.

Observa-se que a curva que contém os valores de temperatura média referente aos últimos 10 anos da série histórica está acima, em sua totalidade, dos valores referentes aos primeiros 10 anos da mesma série. Isso indica que, ao longo dos anos, a temperatura média está aumentando em todos os meses. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva *et al.* (2018), que verificaram que na Zona da Mata Paraibana, a temperatura média mensal do ar sofreu uma tendência de elevação, ao serem observadas as séries históricas entre 1961 e 2014.

Panagea *et al.* (2014) identificaram também uma projeção de aumento da temperatura do ar na Grécia. Por meio de modelos climáticos foram projetados cenários climáticos até 2100 e o resultado desse estudo indicou uma elevação da temperatura média anual de 1,5°C entre 2011 e 2050, e um aumento de 3 a 3,5 °C para o período entre 2061 e 2100.

Aumentos consecutivos nos índices de temperatura através da análise de dados históricos, na ordem de 0,23 a 0,27°C/década, também foram verificados por Curtforth e Judiesch (2007) no Canadá, entre 1955 e 2005.

A partir da aplicação do teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall é possível identificar, na cidade de Patos, tendências significativas de aumento da temperatura média nos meses de março e maio com $p < 0,10$; nos meses junho com $p < 0,05$ e no mês de agosto com $p < 0,01$ (Tabela 5.4). Para aplicação do teste de Mann-Kendall e verificação das tendências, foram utilizados apenas os anos que apresentaram todos os dados mensais. Para

a temperatura média compensada, o primeiro ano que possui os dados completos mensais foi 1984.

Tabela 5.4 - Tendências de temperatura média e nebulosidade verificadas através da aplicação do teste de Mann-Kendall e declividade de Sen, entre os anos de 1984 a 2018, na cidade de Patos-PB.

Período	Temperatura média compensada (°C/ano)	Nebulosidade (décimos/ano)
Janeiro	0,011 ns	- 0,030 ns
Fevereiro	-0,003 ns	- 0,018 ns
Março	0,089 +	- 0,057 *
Abril	0,078 ns	- 0,005 ns
Maio	0,119 +	- 0,001 ns
Junho	0,060 *	- 0,018 ns
Julho	0,056 ns	- 0,021 ns
Agosto	0,061 **	0,010 ns
Setembro	0,030 ns	- 0,057 *
Outubro	0,026 ns	- 0,045 ns
Novembro	0,028 ns	- 0,038 ns
Dezembro	-0,004 ns	- 0,019 ns
Anual	0,040 ns	- 0,019 +

*ns = não significativo; + $p < 0,10$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$*

Utilizando a mesma série histórica, a nebulosidade apresentou tendências significativas ($p < 0,05$) de redução para os meses de março e setembro. As tendências negativas indicam uma diminuição da cobertura do céu por nuvens nesses dois meses. Ao avaliar o período anual, verifica-se que há tendência significativa apenas para a nebulosidade, com indicação de diminuição e $p < 0,10$

A Tabela 5.5 mostra os resultados das tendências da produção de eletricidade entre os anos 1984 e 2018, na cidade de Patos-PB. o primeiro ano que possui os dados completos mensais foi 1984, por isso que a análise da série iniciou nesse ano. Os únicos meses que apresentaram tendências significativas foram: março e maio com $p < 0,10$; julho com $p < 0,05$ e agosto com $p < 0,01$.

Tabela 5.5 - Tendências da Produção de eletricidade verificadas através da aplicação do teste de Mann-Kendall e declividade de Sen, entre os anos de 1984 a 2018, na cidade de Patos-PB.

Período	Produção de eletricidade (kWh/ano)
Janeiro	- 0,658 ns
Fevereiro	0,361 ns
Março	- 2,232 +
Abril	- 2,057 ns
Mai	- 2,525 +
Junho	- 1,194 ns
Julho	- 1,296 *
Agosto	- 1,473 ***
Setembro	- 0,990 ns
Outubro	- 0,782 ns
Novembro	1,055 ns
Dezembro	0,046 ns
Anual	- 1,062 ns

*ns = não significativo; + $p < 0,10$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$*

Os resultados mostrados na Tabela 5.6 indicam a redução da produção de energia elétrica através de módulos fotovoltaicos na cidade de Patos, para todos os meses do ano, no período de 1975 a 2018, comparando os primeiros 10 anos e os últimos 10 anos da série.

Tabela 5.6 - Dados estatísticos para produção de eletricidade utilizando módulos fotovoltaicos, considerando a média mensal na cidade de Patos-PB, no período de 1975 a 2018.

Período	Média da produção de eletricidade (kWh/mês)		Variação
	Primeiros 10 anos	Últimos 10 anos	
Janeiro	4.533,66	4.530,66	- 0,08 %
Fevereiro	4.688,23	4.679,78	- 0,18 %
Março	4.777,76	4.750,13	- 0,58 %
Abril	4.460,17	4.440,87	- 0,43 %
Mai	3.896,17	3.871,37	- 0,64 %
Junho	3.622,92	3.606,64	- 0,45 %
Julho	3.665,59	3.656,73	- 0,24 %
Agosto	4.356,56	4.339,89	- 0,38 %
Setembro	4.772,13	4.756,09	- 0,34 %
Outubro	4.943,73	4.928,79	- 0,30 %
Novembro	4.945,93	4.930,01	- 0,32 %
Dezembro	4.684,29	4.675,78	- 0,18 %
Anual	53.346,84	53.166,07	- 0,34 %
(kWh/ano)			

Percebe-se que as variações na produção de eletricidade em módulos fotovoltaicos não foram expressivas, e o tamanho da amostra utilizada – a que havia disponível em bancos de dados – pode ter sido um fator decisivo nesses resultados. Resultados semelhantes foram constatados na Argélia e Austrália por Crook *et al.* (2011), em projeções realizadas para o período entre 2010 e 2080. Nesse estudo foi identificado que, considerando o cenário estudado, provavelmente não haverá variações expressivas da produção fotovoltaica nesses dois países. Entretanto, esses resultados retratam expectativas, pois há as incertezas relacionadas a mudança de temperatura projetada para a região.

Na Grécia, estima-se um aumento de aproximadamente 4 % na produção de energia fotovoltaica entre os anos de 2011 e 2100 (Panagea *et al.*, 2014). Nesse estudo, foi verificado que o comportamento dos sistemas fotovoltaicos possui uma dependência linear negativa com a elevação da temperatura. No espaço temporal adotado, o aumento esperado da temperatura é superado pelo aumento da radiação solar global, justificando o aumento esperado da produção de eletricidade.

Já em estudos envolvendo outros tipos de fontes renováveis de energia, como a eólica, foi verificado uma melhora para os próximos anos nos cenários climáticos IPCC A2 e B2 para o Brasil, principalmente na região Nordeste, favorecendo a utilização desse tipo de sistema (Fant *et al.*, 2015).

Os estudos de Crook *et al.* (2011), Panagea *et al.* (2014) e Fant *et al.* (2015) detalhados acima, indicam que a análise do desempenho da produção de energia elétrica envolvendo fontes renováveis, em regiões distintas, não é um consenso universal. Cada região tem sua particularidade e os elementos climáticos são dinâmicos ao longo do tempo. Nos cálculos de produção de eletricidade do presente trabalho, a radiação solar foi considerada constante na modelagem do sistema, tomando como base o estudo de Farias Neto *et al.* (2019), onde foi verificado que esse elemento climático não está sofrendo alterações significativas no período de 2007 a 2018.

A Figura 5.4 indica que os meses mais desfavoráveis para produção de eletricidade através de sistemas fotovoltaicos em Patos-PB é junho e julho, com valores de 3.983,67 e 4.233,66 kWh/mês, respectivamente. Por outro lado, de novembro a janeiro a produção de eletricidade pode chegar a 5.343,35 kWh/mês.

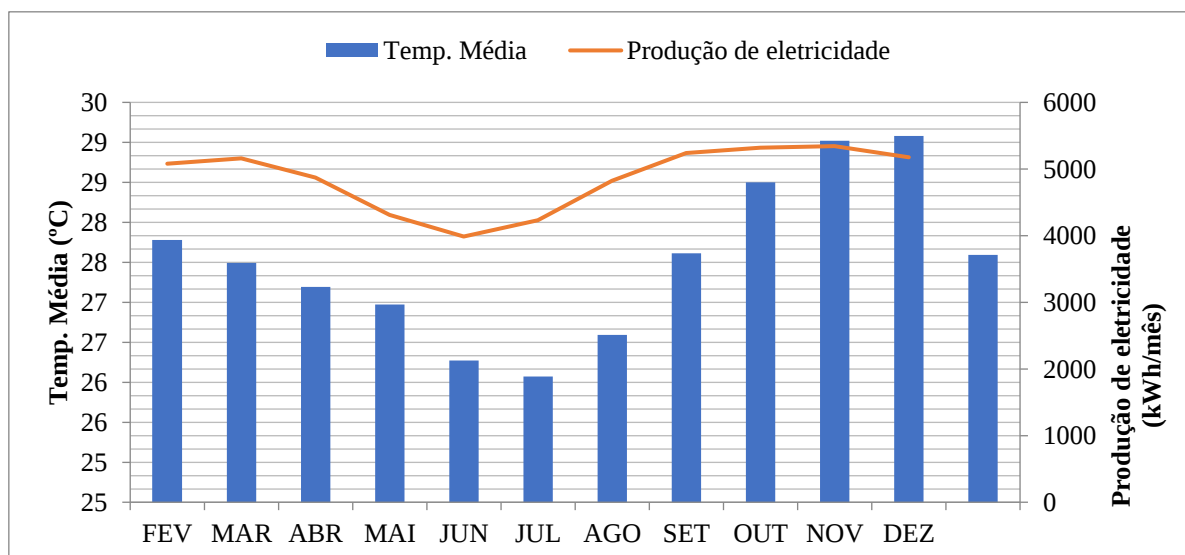


Figura 5.4 – Relação da produção de eletricidade utilizando 100 painéis fotovoltaicos da Axitec modelo AC-260P/156-60S, com a temperatura média do período, com base nos dados da série completa, entre 1975 e 2018, para cidade de Patos-PB.

Fica evidente na Figura 5.4 que nos meses onde a temperatura média foi menor, a produção de eletricidade também reduziu. Um dos motivos para essa divergência é que os mais baixos índices de radiação solar para esse período superaram as vantagens das temperaturas mais baixas. Portanto, a avaliação do volume de produção de energia fotovoltaica não deve ter como referência apenas a dinâmica da temperatura, pois pode haver uma falsa impressão da influência desse parâmetro na eficiência dos módulos fotovoltaicos. A temperatura do ar e a radiação solar devem ser aplicadas simultaneamente no estudo da compreensão da geração fotovoltaica.

O teste de Mann-Kendall aplicado em duas estações meteorológicas localizadas em Juazeiro e Petrolina, ambas regiões semiáridas, mostrou uma tendência decrescente, estatisticamente significativa de 1% nas séries temporais de energia solar global (Silva *et al.*, 2010). Resultados semelhantes foram encontrados por Liepert *et al.* (1997) em pesquisa realizada na Alemanha, que identificou uma diminuição estatisticamente significativa da média anual global da energia solar de radiação entre 1964 e 1990.

As mudanças climáticas envolvendo a radiação solar nos países da bacia do Mar Negro foram estudados por Gunderson *et al.* (2015), que identificaram pouco impacto sobre o potencial atual e futuro de energia solar na região, para os anos de 1991 a 2100. A geração de energia elétrica utilizando sistema fotovoltaico pôde ser determinada através de dois

cenários de desenvolvimento distintos. Ambos apontam para uma contribuição interessante do potencial elétrico solar no mix de geração de energia na maioria dos países da região do Mar Negro.

São incontestáveis os efeitos adversos das mudanças globais no clima que todos os países estão enfrentando (PNUD, 2016). O setor energético, além de estar vulnerável a essas mudanças, também pode ser considerado como um dos principais responsáveis por elas. O grande desafio global é se desenvolver, preservando o meio ambiente. Nesse contexto de mobilização e conscientização, o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) elaborou um plano com 17 objetivos globais de desenvolvimento sustentável (UNITED NATIONS, 2019). Aqui se destacam, os objetivos 7 e 13, que discutem os temas “Energia Acessível e Limpa” e “Ação contra mudança global no clima”, respectivamente. Dentro desses objetivos, são traçadas metas para proporcionar o acesso universal de pessoas à energia elétrica até 2030. Para isso, é enfatizada nesse programa a necessidade da mitigação das fontes de combustíveis fósseis, substituindo pelas fontes renováveis e a um preço justo. Said *et al.* (2018) concluíram que a implementação de fontes renováveis (fotovoltaica, biomassa e solar térmica) em 5%, ajudaria a reduzir as emissões de CO₂ em até 7% ao ano nos Emirados Árabes.

A discussão sobre o comportamento do clima constitui-se uma condição essencial para o funcionamento do sistema de energia solar adequado, considerando os fatores de produção, melhoria de rendimento e estabilidade de operação. A eficiência de um módulo fotovoltaico é determinada pelo seu potencial de conversão de energia elétrica, que está associado às propriedades construtivas da célula e a fatores externos (BÜHLER *et al.*, 2011). Neste sentido, como fatores externos destacam-se as mudanças climáticas, que podem afetar de forma positiva ou negativa a geração de energia elétrica. As variações de temperatura e irradiância são os principais influenciadores da grandeza elétrica dos módulos fotovoltaicos, quando estes estão atuando em condições divergentes do padrão (HECKTHEUER, 2001).

Portanto, o planejamento energético é essencial para alcançar esses objetivos. A busca da melhor opção de energia renovável envolve a consideração de critérios conflitantes, como técnico, social, econômico e ambiental (HOCINE *et al.*, 2018). São problemas complexos e que precisam ser enfrentados para auxiliar os tomadores de decisões a determinar a fonte de energia renovável mais adequada para geração de energia elétrica, diante das incertezas e da dinâmica ambiental.

5.4 CONCLUSÃO

O estudo realizado neste trabalho identificou que a produção de energia elétrica em painéis fotovoltaicos não sofreu impactos relevantes devido às variações da temperatura média do ar e da radiação solar incidente, na cidade de Patos- PB. O período das séries analisadas foi entre 1975 e 2018, para a temperatura do ar, e de 2007 a 2018, para a radiação solar. O tamanho da série de dados, principalmente da radiação solar, é pequeno e pode ter sido determinante nesses resultados. Porém, os registros desse elemento climático só iniciaram nessa região a partir da instalação da estação automática do INMET, em 2007.

Ao analisar a média anual da produção de eletricidade, verificou-se uma variação negativa de 0,34%, quando comparados os últimos 10 anos da série com os 10 primeiros, com valores de 53.166,07 kWh/ano e 53.346,84 kWh/ano, respectivamente. Os meses mais desfavoráveis para a produção fotovoltaica em Patos-PB foram junho e julho, e os meses de outubro e novembro foram os mais promissores.

Outra característica climática observada em Patos foi o aumento da temperatura média do ar ao longo da série histórica observada. Na Figura 5.3, que contém as curvas desse parâmetro climático, foi identificado que todos os pontos da curva que representam os últimos 10 anos da série histórica de temperatura média do ar estão acima da curva que representa os primeiros 10 anos. Com isso, infere-se que ao longo dos anos a temperatura média do ar está aumentando. Através dos testes de Mann-Kendall foram observadas tendências significativas de aumento da temperatura média do ar em março ($p < 0,10$), maio ($p < 0,10$), junho ($p < 0,05$) e agosto ($p < 0,01$), já a nebulosidade apresentou tendência significativa de diminuição em março e setembro ($p < 0,05$) e anualmente ($p < 0,10$).

A construção de grandes usinas de energia solar exige altos investimentos a longo prazo, e trabalhos como este podem contribuir nas tomadas de decisões com relação a compreensão da influência das mudanças climáticas no planejamento econômico, na escolha do sistema mais adequado e na viabilidade de instalação em determinadas regiões.

5.5 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.], 2017b.

ABU-RUB, H.; MALINOWSKI, M.; AL-HADDAD, K. **Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications**. 1ed., John Wiley & Sons, 2014.

AKHSASSI, M. et al. Experimental investigation and modeling of the thermal behavior of a solar PV module. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 180, p. 271-279, 2018.

ARMSTRONG, H. A.; ALLEN, M. B. Shifts in the intertropical convergence zone, Himalayan exhumation, and late Cenozoic climate. **Geology**, v. 39.1, p. 11-14, 2011.

AXITEC. AXI power. 60 células policristalino. 2019. Módulos fotovoltaicos de alto rendimento. Disponível em: <http://www.axitecsolar.com/data/document_files/DB_60zlg_poly_power_MiA_BR.pdf>. Acesso em: 03 out de 2019.

BARTÓK, B. Changes in solar energy availability for south-eastern Europe with respect to global warming. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 35, n. 1-2, p. 63- 69, 2010.

BOUAICHI, A.; MERROUNI, A. A.; HAJJAJ, C.; MESSAOUDI, C.; GHENNIQUI, A.; BENLARABI, A.; IKKEN, B; AMRANI, A. E.; ZITOUNI, H. In-situ evaluation of the early PV module degradation of various technologies under harsh climatic conditions: The case of Morocco. **Renewable Energy**, 2019.

BÜHLER, A. J., KRENZINGER, A., ROMERO, C. F. Análise da variação da eficiência de módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias em função da temperatura e irradiância. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 2, n. 2, 2011.

CRESESB – Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. Sundata. 2019. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 7 dez. de 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.

DA SILVA, V. D. P. R.; SILVA, R. A. E.; CAVALCANTI, E. P.; BRAGA, C. C.; DE AZEVEDO, P. V.; SINGH, V. P.; PEREIRA, E. R. R. Trends in solar radiation in NCEP/NCAR database and measurements in northeastern Brazil. **Solar Energy**, v. 84, n. 10, p. 1852-1862, 2010.

EVANS, D. L.; FLORSCHUETZ, L. W. Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration. **Solar Energy**, v. 19, n. 3, p. 255-262, 1977.

EVANS, D. L. Simplified method for predicting photovoltaic array output. **Solar energy**, v. 27, n. 6, p. 555-560, 1981.

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, J. R.; SILVA JUNIOR, J. M.; SILVA, L. P.; ABRAHAO, R.; CARVALHO, M. Caracterização e avaliação da radiação solar na cidade de Patos, região semiárida da Paraíba. In: Congresso Internacional de Meio Ambiente e Sociedade - Conimas 2019, 2019, Campina Grande. **Anais do Congresso Internacional de Meio Ambiente e Sociedade - Conimas 2019**, 2019.

FONSECA, L. F. S.; CARVALHO, M. IMPACTO DAS TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO DE ENERGIA POR FONTES RENOVÁVEIS. In: V Fórum Latino-Americano de Engenharia e Sustentabilidade, 2019, João Pessoa. **Anais do V Fórum Latino-Americano de Engenharia e Sustentabilidade**, 2019.

FURLAN, C.; OLIVEIRA, A. P. D.; SOARES, J.; CODADO, G.; ESCOBEDO, J. F. The role of clouds in improving the regression model for hourly values of diffuse solar radiation, **Applied Energy**, v. 92, p. 240-254, 2012.

GRILO, M. M. S.; FORTES, A. F. C.; DE SOUZA, R. P. G.; SILVA, J. A. M.; CARVALHO, M. Carbon footprints for the supply of electricity to a heat pump: Solar energy

vs. electric grid. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 10, n. 2, p. 023701, 2018.

GUNDERSON, I.; GOYETTE, S.; GAGO-SILVA, A.; QUIQUEREZ, L.; LEHMANN, A. Climate and land-use change impacts on potential solar photovoltaic power generation in the Black Sea region. **Environmental Science & Policy**, v. 46, p. 70-81, 2015.

HECKTHEUER, L. A. **Análise de associações de módulos fotovoltaicos**. Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, 2001.

HOCINE, A.; KOUAISSAH, N.; BETTAHAR, S.; BENBOUZIANE, M. Optimizing renewable energy portfolios under uncertainty: A multi-segment fuzzy goal programming approach. **Renewable energy**, v. 129, p. 540-552, 2018.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados. 2017. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pb/patos.html>>. Acesso em: 20 out. de 2019.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Estimativas da População residente no Brasil e unidades da Federação com data de referência em 1º de Julho de 2019. 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 20 out. de 2019.

IEA - International Energy Agency. Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2019. Washington, 2019a. <https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/2019-tracking_sdg7-complete-rev030320.pdf>. Acesso em: 17 jan. de 2020.

IEA - International Energy Agency. Africa Energy Outlook 2019: World Energy Outlook Special Report. 2019b. <<https://www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2019>>. Acesso em: 20 fev. de 2020.

IEA - International Energy Agency. World energy statistics 2019. 2019c. <<https://www.iea.org/reports/world-energy-statistics-2019>>. Acesso em: 14 nov. de 2019.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de dados meteorológicos para o ensino e pesquisa. 2019. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 15 out. de 2019.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. The Special Report on Global Warming of 1.5°C. Climate Change and Land, 2018.

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, 2015b.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. London: Charles Griffin, 1975.

LIEPERT, B. G.; KUKLA, G. J. Decline in global solar radiation with increased horizontal visibility in Germany between 1964 and 1990. **Journal of Climate**, v. 10, n. 9, p. 2391-2401, 1997.

MALINOWSKI, M.; LEON, J. I.; ABU-RUB, H. Solar photovoltaic and thermal energy systems: Current technology and future trends. **Proceedings of the IEEE**, v. 105, n. 11, p. 2132-2146, 2017.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometric*. **The econometric society**, v.13, p. 245-259, 1945.

MARENGO, J. A.; LACERDA, F. F. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Instituto Nacional do Semiárido. Campina Grande, p. 385-422. 2011.

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

MENEZES, H. E. A.; DE MEDEIROS, R. M.; SANTOS, J. L. G.; LIMA, T. S. Variabilidade climática para o município de Patos, Paraíba, Brasil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, 2015.

NOLAY, P. **Développement d'une méthode générale d'analyse des systèmes photovoltaïques**. Tese de Doutorado, École nationale supérieure des mines de Douai, France, 1987.

NOTTON, G.; 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.; GRILLAKIS, M. G. 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.

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. 7- Energia Limpa e acessível. 2016. Disponível em: <<https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/sustainable-development-goals/goal-7-affordable-and-clean-energy.html>>. Acesso em: 29 nov. de 2019.

SAID, Z.; ALSHEHHI, A. A.; MEHMOOD, A. Predictions of UAE's renewable energy mix in 2030. **Renewable energy**, v. 118, p. 779-789, 2018.

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.

SILVA, R. A.; SILVA, V. P. R.; CAVALCANTI, E. P.; SANTOS, D. N. Estudo da variabilidade da radiação solar no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n.5, p. 501-509, 2010.

SILVA JÚNIOR, J. M.; NETO, J. R. F.; ABRAHÃO, R.; CARVALHO, M.; OLIVEIRA, A. K. P. Considerações sobre as tendências climáticas na produção de energia fotovoltaica nas regiões semiáridas. In: CONGRESSO NACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO, 1., 2018, Natal. **Anais [...]**. Natal: Realizeventos, 2018.

UNITED NATIONS. About the Sustainable Development Goals. 2019. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>>. Acesso em: 02 dez de 2019.

VIANA, T. S. **Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil**. (Tese de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2010.

WAN, K. K. W.; CHEUNG, K. L.; LIU, D.; LAM, J. C. 2009. Impact of modelled global solar radiation on simulated building heating and cooling loads. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 3, p. 662-667, 2009.

WILD, M.; FOLINI, D.; HENSCHHEL, F.; FISCHER, N.; MÜLLER, B. 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.

XU, Y.; RAMANATHAN, V.; VICTOR, D. G. Global warming will happen faster than we think. **Nature**, v. 564, p. 30-32, 2018.

CAPÍTULO VI

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A relação causa-efeito inerente a fenômenos climáticos estão associadas ao estudo dos eventos naturais e das atividades antrópicas, entretanto, os seus resultados podem apresentar divergências e incertezas relacionadas aos processos estatísticos aplicados. A utilização das séries históricas de dados climáticos é fundamental para caracterizar o comportamento climático pregresso. Os estudos de tendências climáticas estabelecem parâmetros quantitativos e qualitativos importantes que evidenciam mudanças climáticas em escala global e regional que podem impactar os sistemas energéticos de origem renovável.

Os resultados encontrados no presente trabalho de dissertação se mostraram coerentes com a literatura científica que sugere um aumento global da temperatura média do ar. Ao comparar a temperatura média de Patos entre 1975 a 1984 e 2005 a 2014, é possível identificar um incremento no valor da temperatura média anual de aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$. Tendências significativas ($p < 0,10$) de aumento da temperatura média foram encontradas apenas nos meses de maio e junho, após a aplicação do teste estatístico de Mann-Kendall. Já a nebulosidade diminuiu 0,35 décimos, para o mesmo período e apresentou tendências significativas ($p < 0,05$) de diminuição em março e setembro e anualmente ($p < 0,10$).

A estação meteorológica que monitora os dados de radiação solar em Patos iniciou o seu funcionamento apenas no ano de 2007, e, portanto, os dados disponíveis foram insuficientes para se obter conclusões mais precisas de seu comportamento e de suas tendências. Apenas o mês de agosto apresentou tendências significativas ($p < 0,10$) de crescimento. No entanto, o que ficou evidente neste trabalho, e que corrobora a orientação da OMM, é que para se obter resultados significativos e mais rigorosos, a análise de tendências de séries climatológicas deve ser realizada com períodos superiores a 30 anos.

Na modelagem do sistema fotovoltaico realizada neste trabalho foram utilizados valores fixos de radiação, já que não houve modificações significativas entre 2007 e 2018.

O alto potencial solar do Nordeste brasileiro, especialmente o do semiárido, torna esse local promissor e tem atraído investimentos de empresas interessadas na instalação das usinas solares, como é o caso da empresa *Enel Green Power*, que investiu cerca de 300 milhões de dólares na instalação de painéis solares fotovoltaicas no estado do Piauí. O estudo aqui desenvolvido pode ser utilizado no planejamento de estratégias envolvendo implantação de novas usinas, a partir da compreensão dos efeitos das mudanças climáticas no potencial da energia fotovoltaica em determinada região.

Na cidade de Patos, os meses de março, maio, julho e agosto apresentaram tendências significativas de diminuição da produção fotovoltaica entre 1975 e 2018. Essa redução representou uma variação de -0,34 %, quando comparados os primeiros 10 anos da série e os últimos 10 anos. Portanto, é uma diminuição que não apresenta efeitos significativos até o presente momento. No entanto, é importante seguir com o monitoramento nas próximas décadas para verificação de possíveis incrementos futuros.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se também a realização de estudos envolvendo o potencial energético com ênfase em outras energias renováveis, como as fontes eólica e solar térmica, correlacionando as mudanças das condições climáticas em regiões semiáridas de todo o Brasil.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE TODA A DISSERTAÇÃO

ABDELKADER, M. R.; AL-SALAYMEH, A.; AL-HAMAMRE, Z.; FIRAS, S. A comparative analysis of the performance of monocrystalline and multicrystalline PV cells in semiarid climate conditions: the case of Jordan. **Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering**, v. 4, p. 543-552, 2010.

ABRAHÃO, R.; PEIXOTO, I. M. B. M.; SILVA, L. P.; MEDEIROS, S. E. L. Mais calor para o Sertão? Perspectivas de tendências no índice de calor do Sertão Paraibano. In: XX CBAGRO - Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2017, Petrolina. **Anais do XX CBAGRO**, 2017a.

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.], 2017b.

ABU-RUB, H.; MALINOWSKI, M.; AL-HADDAD, K. **Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications**. 1ed., John Wiley & Sons, 2014.

AKHSASSI, M. et al. Experimental investigation and modeling of the thermal behavior of a solar PV module. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 180, p. 271-279, 2018.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Informações gerenciais. 2019. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+-+1%C2%BA+trimestre+de+2019/b860054f-79ec-6608-951a-fb2288701434>>. Acesso em: 25 jan. 2020.

ARAÚJO, G. L. **Eletricidad Solar Fotovoltaica: sistemas fotovoltaicos autónomos**. 1 ed. Madrid, ETSI Telecomunicacion, 1985.

ARAÚJO, S. D. A região semiárida do nordeste do Brasil: questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **Rios Eletrônica-Revista Científica da FASETE**, v. 5, n. 5, p. 88-98, 2011.

ARMSTRONG, H. A.; ALLEN, M. B. Shifts in the intertropical convergence zone, Himalayan exhumation, and late Cenozoic climate. **Geology**, v. 39.1, p. 11-14, 2011.

AXITEC. AXI power. 60 células policristalino. 2019. Módulos fotovoltaicos de alto rendimento. Disponível em:

<http://www.axitecsolar.com/data/document_files/DB_60zlg_poly_power_MiA_BR.pdf>.

Acesso em: 03 out de 2019.

BARCELLOS, C.; MONTEIRO, A. M. V.; CORVALÁN, C.; GURGEL, H. C.; CARVALHO, M. S.; ARTAXO, P.; RAGONI, V. Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 18, n. 3, p. 285-304, 2009.

BARROS, V. R.; FIELD, C.B.; DOKKEN, D. J.; MASTRANDRE, M. D; MACH, K. J. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC, Cambridge University Press**, Cambridge, p. 688, 2014.

BARTÓK, B. Changes in solar energy availability for south-eastern Europe with respect to global warming. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 35, n. 1-2, p. 63- 69, 2010.

BARTOK, B.; WILD, M.; FOLINI, D.; LÜTHI, D.; KOTLARSKI, S.; SCHÄR, C.; IMECS, Z. 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.

BAZYOMO, S. D.; LAWIN, A. E.; COULIBALY, O.; WISSER, D.; OUEDRAOGO, A. Forecasted Changes in West Africa Photovoltaic Energy Output by 2045. **Climate**, v. 4, n. 4, p. 53, 2016.

BERTICELLI, R.; LAUXEN, R.; BINATO, A.; MASUTTI, G. C.; RODRIGUES, L. K. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. **I Seminário de Pesquisa Científica e Tecnológica**, v. 1, n. 1, 2017.

BLAIN, G. C. Cento e vinte anos de totais extremos de precipitação pluvial máxima diária em Campinas, Estado de São Paulo: análises estatísticas. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 722-728, 2011a.

BLAIN, G. C. Aplicação do conceito do índice padronizado de precipitação à série decendial da diferença entre precipitação pluvial e evapotranspiração potencial. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p. 234-245, 2011b.

BORGES, A. C. P.; SILVA, M. S.; ALVES, C. T.; TORRES, E. A. Energias Renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia. **REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 10, n. 2, 2017.

BOUAICHI, A.; MERROUNI, A. A.; HAJJAJ, C.; MESSAOUDI, C.; GHENNIQUI, A.; BENLARABI, A.; IKKEN, B.; AMRANI, A. E.; ZITOUNI, H. In-situ evaluation of the early PV module degradation of various technologies under harsh climatic conditions: The case of Morocco. **Renewable Energy**, 2019.

BRUCKNER, T.; BASHMAKOV, I. A.; MULUGETTA, Y.; CHUM, H.; DE LA VEGA NAVARRO, A.; EDMONDS, J.; HONNERY, D. Energy Systems, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC, Cambridge University Press**, Cambridge, 2014.

BUENO, M. D. P. R. El Acuerdo de París: una nueva idea sobre la arquitectura climática internacional?. **Relaciones Internacionales**, 33, 75-95, 2016.

BÜHLER, A. J., KRENZINGER, A., ROMERO, C. F. Análise da variação da eficiência de módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias em função da temperatura e irradiância. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 2, n. 2, 2011.

BUSSON, B. O.; DIAS, P. H. F.; DUPONT, I. M.; CAMPOS, P. H. M.; CARVALHO, P. C.; BARROSO, E. A. Q. Validação de modelos de comportamento térmico de painéis fotovoltaicos para o Semiárido brasileiro. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018**, 2018.

BUTZ, D. S. **Science of Earth Systems**. 1 ed. Cengage Learning, 2002.

CARVALHO, M.; DELGADO, D. Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix. **LALCA- Revista Latino Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 1, N. 1, p. 64-85, 2017.

CHEN, L.; MA, Z.; ZHAO, T. Modeling and analysis of the potential impacts on regional climate due to vegetation degradation over arid and semi-arid regions of China. **Climatic Change**, v. 144, n. 3, p. 461-473, 2017.

CONEJERO, M. C.; CALIA, R. C.; SAUAIA, A. C. A. Redes de inovação e a difusão da tecnologia solar no Brasil. **RAI Revista de Administração e Inovação**, v. 12, n. 2, p. 90-109, 2015.

CONTI, J. B. Considerações sobre as mudanças climáticas globais. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 70-75, 2005.

CQNUAC - Convenção Quadro das Nações Unidas Sobre Alterações Climáticas. 1992. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2652.htm> Acesso em: 01 jun. de 2019.

CRESESB – Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. Sundata. 2019. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 7 dez. de 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.

DA SILVA, G. J. F.; SEVERO, T. E. A. Potencial/Aproveitamento de Energia Solar e Eólica no Semiárido Nordeste: Um Estudo de Caso em Juazeiro–BA nos Anos de 2000 a 2009. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 3, p. 586-599, 2012.

DA SILVA, V. D. P. R.; SILVA, R. A. E.; CAVALCANTI, E. P.; BRAGA, C. C.; DE AZEVEDO, P. V.; SINGH, V. P.; PEREIRA, E. R. R. Trends in solar radiation in

NCEP/NCAR database and measurements in northeastern Brazil. **Solar Energy**, v. 84, n. 10, p. 1852-1862, 2010.

DE FREITAS, L. S.; SOUSA, N. A.; PINHEIRO, A. N.; DE OLIVEIRA, M. L. M. Viabilidade de um sistema fotovoltaico ligado à rede em instituição pública: estudo de caso usando retscreen1 feasibility of an on-grid photovoltaic system: case study using retscreen1. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 4, p. 763-786, 2017.

DE MEDEIROS, M. L. G.; DOS SANTOS, M. A.; DA SILVA, N. F.; DA SILVA, V. P. Connections Between Wind Energy, Poverty and Social Sustainability in Brazil's Semiarid. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 864, 2020.

DE MIRANDA, A. L. G.; SANTESSO, C. A.; GARCIA, M. L.; DE MORAES, C. S. B. Desenvolvimento de Programa para Simulações do Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos para os Municípios do Brasil. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 1, 2019.

DE NYS, E.; ENGLE, N. L. Convivência com o Semiárido e Gestão proativa da seca no Nordeste do Brasil: Uma nova Perspectiva. **The World Bank**, p. 1-8, 2014.

DE OLIVEIRA, A. S.; PEREIRA, G. A.; RODRIGUES, A. F.; NETO, J. D. O. M. Tendências em índices extremos de precipitação e temperatura do ar na cidade de Uberaba, MG. **Sustentare**, v. 2, n. 1, p. 118-134, 2018.

DE QUEIROZ, A. T.; COSTA, R. A. Caracterização e variabilidade climática em séries de temperatura, umidade relativa do ar e precipitação em Ituiutaba–MG. **Caminhos de Geografia**, v. 13, n. 43, 2012.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Resenha Energética Brasileira: Oferta e demanda de Energia; Instalações Energéticas; Energia no Mundo. 2019. <<http://www.mme.gov.br/documents/36208/948169/Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+-+edi%C3%A7%C3%A3o+2019+v3.pdf/92ed2633-e412-d064-6ae1-eefac950168b>>. Acesso em: 20 jun. de 2020.

EVANS, D. L.; FLORSCHUETZ, L. W. Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration. **Solar Energy**, v. 19, n. 3, p. 255-262, 1977.

EVANS, D. L. Simplified method for predicting photovoltaic array output. **Solar energy**, v. 27, n. 6, p. 555-560, 1981.

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, J. R.; SILVA JUNIOR, J. M.; ABRAHÃO, R.; 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.

FARIAS NETO, J. R.; SILVA JUNIOR, J. M.; SILVA, L. P.; ABRAHAO, R.; CARVALHO, M. Caracterização e avaliação da radiação solar na cidade de Patos, região semiárida da Paraíba. In: Congresso Internacional de Meio Ambiente e Sociedade - Conimas 2019, 2019, Campina Grande. **Anais do Congresso Internacional de Meio Ambiente e Sociedade - Conimas 2019**, 2019.

FERREIRA, A. G.; MELO, N. G. D. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

FESHARAKI, V. J.; DEHGHANI, M.; FESHARAKI, J. J.; TAVASOLI, H. The effect of temperature on photovoltaic cell efficiency. In: **Proceedings of the 1st International Conference on Emerging Trends in Energy Conservation–ETEC, Tehran, Iran**, p. 20-21, 2011.

FINGER, D.; HEINRICH, G.; GOBIET, A.; BAUDER, A. Projections of future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century. **Water Resources Research**, v. 48, n. 2, 2012.

FONSECA, L. F. S.; CARVALHO, M. IMPACTO DAS TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS NA PRODUÇÃO DE ENERGIA POR FONTES RENOVÁVEIS. In: V Fórum Latino-Americano de Engenharia e Sustentabilidade, 2019, João Pessoa. **Anais do V Fórum Latino-Americano de Engenharia e Sustentabilidade**, 2019.

FURLAN, C.; OLIVEIRA, A. P. D.; SOARES, J.; CODADO, G.; ESCOBEDO, J. F. The role of clouds in improving the regression model for hourly values of diffuse solar radiation, **Applied Energy**, v. 92, p. 240-254, 2012.

FÜSSEL, H. Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. **Global environmental change**, v. 17, n. 2, p. 155-167, 2007.

GOOSSENS, C.; BERGER, A. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. **Annales Geophysicae**, Berlin, v.4, n. 4, p. 385-400, 1986.

GRILO, M. M. S.; FORTES, A. F. C.; DE SOUZA, R. P. G.; SILVA, J. A. M.; CARVALHO, M. Carbon footprints for the supply of electricity to a heat pump: Solar energy vs. electric grid. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 10, n. 2, p. 023701, 2018.

GUNDERSON, I.; GOYETTE, S.; GAGO-SILVA, A.; QUIQUEREZ, L.; LEHMANN, A. Climate and land-use change impacts on potential solar photovoltaic power generation in the Black Sea region. **Environmental Science & Policy**, v. 46, p. 70-81, 2015.

HAJJAJ, C.; MERROUNI, A. A.; BOUAICHI, A.; BENHMIDA, M.; SAHNOUN, S.; GHENNIQUI, A.; ZITOUNI, H. Evaluation, comparison and experimental validation of different PV power prediction models under semi-arid climate. **Energy Conversion and Management**, v. 173, p. 476-488, 2018.

HECKTHEUER, L. A. **Análise de associações de módulos fotovoltaicos**. Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre, 2001.

HOCINE, A.; KOUAISSAH, N.; BETTAHAR, S.; BENBOUZIANE, M. Optimizing renewable energy portfolios under uncertainty: A multi-segment fuzzy goal programming approach. **Renewable energy**, v. 129, p. 540-552, 2018.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados. 2017. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pb/patos.html>>. Acesso em: 20 out. de 2019.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Estimativas da População residente no Brasil e unidades da Federação com data de referência em 1º de Julho

de 2019. 2019 Disponível em:
<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 20 out. de 2019.

IEA - International Energy Agency. World Energy Outlook 2018. 2018.
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>>. Acesso em: 04 fev. de 2019.

IEA - International Energy Agency. World energy statistics 2019. 2019a.
<https://www.iea.org/reports/world-energy-statistics-2019>>. Acesso em: 14 nov. de 2019

IEA - International Energy Agency. Africa Energy Outlook 2019: World Energy Outlook Special Report. 2019b. <https://www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2019>>. Acesso em: 20 fev. de 2020.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de dados meteorológicos para o ensino e pesquisa. 2019. Disponível em: <
<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 15 out. de 2019.

IPCC – Intergovernmental Panel in Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by HOUGHTON, J. T. Cambridge/New York, Cambridge University Press/IPCC, 2007.

IPCC – Intergovernmental Panel in Climate Change. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by C. B. Field *et al.* Cambridge/New York, Cambridge University Press/IPCC, 2014a.

IPCC – Intergovernmental Panel in Climate Change. 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. Cambridge/New York, Cambridge University Press/IPCC, 2014b.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. The Special Report on Global Warming of 1.5°C. Climate Change and Land, 2018.

IPEA – Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas. **Potencial Solar no Semiárido Brasileiro e seu Papel Frente à Mudança do Clima.** 2017. Disponível em:

<https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=29882>. Acesso em: 10 ago. de 2019.

IRENA- International Renewable Energy Agency. Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper). Abu Dhabi, 2019.

JAKHRANI, A. Q.; OTHMAN, A. K.; RIGIT, A. R. H.; SAMO, S. R. Comparison of Solar Photovoltaic Module Temperature Models. **World Applied Science Journal**, v. 14, p. 01-08, 2011.

JEREZ, S.; THAIS, F.; TOBIN, I.; WILD, M.; COLETTE, A.; YIOU, P.; VAUTARD, R. The CLIMIX model: a tool to create and evaluate spatially-resolved scenarios of photovoltaic and wind power development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1-15, 2015a.

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, 2015b.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. London: Charles Griffin, 1975.

KHALIQ, M. N.; OUARDA, T. M. J.; ONDO, J. C.; GACHON, P.; BOBÉE, B. Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review. **Journal of Hydrology**, v. 329, p. 534–552, 2006.

KHALIQ, M. N.; OUARDA, T. B. M. J.; GACHON, P.; SUSHAMA, L.; ST-HILAIRE, A. Identification of hydrological trends in the presence of serial and cross correlations: A review of selected methods and their application to annual flow regimes of Canadian Rivers. **Journal of Hydrology**, v. 368, p. 117–130, 2009.

KHARIN, V. V.; ZWIERS, F. W. Estimating extremes in transient climate change simulations. **Journal of Climate**, v.18, p.1156–1173, 2003.

LIANG, F.; XIA, X. A. Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961–2000. **Annales Geophysicae**, v.23, n.7, p. 2425-2432, 2005.

LIEPERT, B. G.; KUKLA, G. J. Decline in global solar radiation with increased horizontal visibility in Germany between 1964 and 1990. **Journal of Climate**, v. 10, n. 9, p. 2391-2401, 1997.

LIEPERT, B. G. Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990. **Geophysical research letters**, v. 29, n. 10, 2002.

LINDOSO, D.; EIRÓ, F.; ROCHA, J. D. Desenvolvimento sustentável, adaptação e vulnerabilidade à mudança climática no Semiárido nordestino: Um estudo de caso no Sertão do São Francisco. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 44, p. 301-332, 2013.

MAGRIN, G. O.; MARENGO, J. A.; BOULANGER, J. P.; BUCKERIDGE, M. S.; CASTELLANOS, E.; POVEDA, G.; MASTRANDREA, M. D. Central and South America. **In Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2014.

MALINOWSKI, M.; LEON, J. I.; ABU-RUB, H. Solar photovoltaic and thermal energy systems: Current technology and future trends. **Proceedings of the IEEE**, v. 105, n. 11, p. 2132-2146, 2017.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometric*. **The econometric society**, v.13, p. 245-259, 1945.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, v. 8, p. 5-28, 2007.

MARENGO, J. A.; LACERDA, F. F. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Instituto Nacional do Semiárido. Campina Grande, p. 385-422. 2011.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; SILVA, S. A. B.; ABREU, S. L.; Colle, S. Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment. **Energy Policy**, v. 36, p. 2853-2864, 2008.

MEDEIROS, A. M. T. D.; BRITO, A. C. D. A seca no Estado da Paraíba–Impactos e ações de resiliência. **Parcerias Estratégicas**, v. 22, n. 44, p. 139-154, 2017a.

MEDEIROS, S. E. L.; SILVA, W. K. M.; SILVA, L. P.; PEIXOTO, I. M. B. M.; ABRAHAO, R. Análise da variabilidade e tendências para a temperatura média do ar no Sertão Paraibano com dados reais e estimados. In: II CONIDIS, 2017, Campina Grande. **Anais do II CONIDIS**, 2017b.

MELO, A. B. C. D.; CAVALCANTI, I. F. D. A.; SOUZA, P. P. Zona de convergência intertropical do Atlântico. **Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de textos**, 2009. MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. 1 ed. São Paulo, Oficina de Textos, 2007.

MENEZES, H. E. A.; DE MEDEIROS, R. M.; SANTOS, J. L. G.; LIMA, T. S. Variabilidade climática para o município de Patos, Paraíba, Brasil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, 2015.

MILHORANCE, C.; MENDES, P.; MESQUITA, P.; MORIMURA, M.; REIS, R.; RODRIGUES FILHO, S.; BURSZTYN, M. O Desafio da Integração de Políticas Públicas para a Adaptação às Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019.

MODARRES, R.; DA SILVA, V. D. P. R. Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. **Journal of arid environments**, v. 70, n. 2, p. 344-355, 2007.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. D. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

MONTEIRO, M.; DIAS, R. D. B.; CAMPOS, C. D. **Novos Horizontes em Política Científica e Tecnológica**. 1 ed. Santo André, Ed. UFABC, 2014.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; MEEHL, G. A. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, n. 7282, p. 747, 2010.

MÜLLER, C.; ROBERTSON, R. D. Projecting future crop productivity for global economic modeling. **Agricultural Economics**, v. 45, n. 1, p. 37-50, 2014.

NASCIMENTO, P. A. M. M. Considerações Sobre As Indústrias De Equipamentos Para Produção De Energias Eólica E Solar Fotovoltaica E Suas Dimensões Científicas No Brasil. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea)**, 2015.

NEETI, N.; EASTMAN, J. R. A contextual mann-kendall approach for the assessment of trend significance in image time series. **Transactions in GIS**, v. 15, n. 5, p. 599-611, 2011.

NOLAY, P. **Développement d'une méthode générale d'analyse des systèmes photovoltaïques**. Tese de Doutorado, École nationale supérieure des mines de Douai, France, 1987.

NOTTON, G.; 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.

NUNES, L. J.; MEIRELES, C. I.; GOMES, C. J. P.; RIBEIRO, N. A. The Evolution of Climate Changes in Portugal: Determination of Trend Series and Its Impact on Forest Development. **Climate**, v. 7, n. 6, p. 78, 2019.

OBREGON, G. O.; MARENGO, J. A. Caracterização do clima no século XX no Brasil: Tendência de chuvas e temperaturas médias e extremas. Relatório nº 2 – Projeto: Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade – subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XX. Brasília, 2007.

OHMURA, A. Secular variation of global radiation in Europe. **IRS'88: Current problems in atmospheric radiation**, p. 298-301, 1989.

OMAR, A. M.; HUSSIN, M. Z.; SHAARI, S.; SOPIAN, K. Energy yield calculation of the grid connected photovoltaic power system. **Computer Applications in Environmental Sciences and Renewable Energy**, p. 162-167, 2014.

PADMA, B. K.; LONDHE, A. L.; DANIEL, S.; JADHAV, D. B. Observational evidence of solar dimming: Offsetting surface warming over India. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 21, 2007.

PANAGEA, I. S.; TSANIS, I. K.; KOUTROULIS, A. G.; GRILLAKIS, M. G. 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.

PEÇANHA, T.; SILVA, I. A.; MACEDO, M. M. S.; NETO, R. I. M.; SOUTO, H. E. G. F. R.; DE LIMA, R. S.; DE OLIVEIRA, J. B. Cogeração de energia elétrica a partir da biomassa agroindustrial e florestal em uma usina do centro-Oeste Mineiro/Electricity cogeneration from agroindustrial and forest biomass in a Midwest Mineiro plant. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 10, p. 20954-20976, 2019.

PEREIRA, J. M.; ALMEIDA, P. S. D.; SOUSA, A. V. D.; PAULA, A. M. D.; MACHADO, R. B.; GONÇALVES, R. G. Climatic factors influencing triatomine occurrence in Central-West Brazil. **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**, v. 108, n. 3, p. 335-341, 2013.

PINHEIRO, A.; GRACIANO, R. L. G.; SEVERO, D. L. Tendência das séries temporais de precipitação da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 28, n. 3, p. 281-290, 2013.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES)**. Rio de Janeiro, CEPTEL–DTE–CRESESB, 2014.

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. 7- Energia Limpa e acessível. 2016. Disponível em: <<https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/sustainable-development-goals/goal-7-affordable-and-clean-energy.html>>. Acesso em: 29 nov. de 2019.

POPOVICI, C. G.; HUDISTEANU, S. V.; MATEESCU, T. D.; CHERECHES, N. C. Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks. **Energy Procedia**, v. 85, p. 425-432, 2015.

QIAN, Y.; KAISER, D. P.; LEUNG, L. R.; XU, M. More frequent cloudfree sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000. **Geophysical Research Letters**, v.1, n.33, 2006.

RAMALHO, A. M. C.; DA SILVA, S. S. F.; CANDIDO, G. A. Aproveitamento Sustentável das Potencialidades Energéticas do Semiárido Paraibano. **POLÊM! CA**, v. 12, n. 3, p. 545-553, 2013.

REMUND, J.; MÜLLER, S. 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**, p. 13-17, 2010.

RUSSAK, V. Trends of solar radiation, cloudiness and atmospheric transparency during recent decades in Estonia. **Tellus B**, v. 42, n. 2, p. 206-210, 1990.

SAID, Z.; ALSHEHHI, A. A.; MEHMOOD, A. Predictions of UAE's renewable energy mix in 2030. **Renewable energy**, v. 118, p. 779-789, 2018.

SALVIANO, M. F.; GROPPPO, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 64-73, 2016.

SANTOS, C. A. C. D.; BRITO, J. I. B. D. Análise dos índices de extremos para o semiárido do Brasil e suas relações com TSM e IVDN. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 3, p. 303-312, 2007.

SANTOS, F. A.; SOUZA, C. A.; DALFIOR, V. A. O. Energia solar: um estudo sobre a viabilidade econômica de instalação do sistema fotovoltaico em uma residência em Ipatinga-MG. **Simpósio de excelência em Gestão e Tecnologia, XIII**, Rio de Janeiro-RJ, 2016.

SCHEWE, J.; HEINKE, J.; GERTEN, D.; HADDELAND, I.; ARNELL, N. W.; CLARK, D. B.; GOSLING, S. N. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3245-3250, 2014.

SCHMIDT, L.; SANTOS, F. D.; PRISTA, P.; SARAIVA, T.; GOMES, C. Alterações climáticas, sociais e políticas em Portugal: processos de governança num litoral em risco. **Ambiente & Sociedade**, v. 15, n. 1, p. 23-40, 2012.

SILVA, F. F. N.; GOMES, A. C. S.; LUCIO, P. S.; ARAÚJO, E. H. S.; SILVA, C. M. S. Estudo de caso: temperatura média mensal de regiões do litoral e semiárido do nordeste brasileiro (nota de pesquisa). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, Ano 11, 2015.

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.

SILVA, R. A.; SILVA, V. P. R.; CAVALCANTI, E. P.; SANTOS, D. N. Estudo da variabilidade da radiação solar no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n.5, p. 501-509, 2010.

SILVA JÚNIOR, J. M.; NETO, J. R. F.; ABRAHÃO, R.; CARVALHO, M.; OLIVEIRA, A. K. P. Considerações sobre as tendências climáticas na produção de energia fotovoltaica nas regiões semiáridas. In: CONGRESSO NACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO, 1., 2018, Natal. **Anais [...]**. Natal: Realizeventos, 2018.

SIQUEIRA, C. D. Regime internacional de mudanças climáticas e segurança energética. **Mediações-Revista de Ciências Sociais**, v. 16, n. 2, p. 210-227, 2011.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. **Solar energy**, v. 83, n. 5, p. 614-624, 2009.

SONI, V. K.; PANDITHURAI, G.; PAI, D. S. Evaluation of long-term changes of solar radiation in India. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 4, p. 540-551, 2012.

SOUZA, M. C. O.; CORAZZA, R. I. Do Protocolo Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 42, 2017.

STANHILL, G.; COHEN, S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. **Agricultural and forest meteorology**, v. 107, n. 4, p. 255-278, 2001.

UDAETA, M. E. M. **Novos instrumentos de planejamento energético e o desenvolvimento sustentável-Planejamento Integrado de Recursos energéticos na USP**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2012.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. Paris Agreement. United Nations. 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf>. Acesso em: 4 jul de 2018.

UNITED NATIONS. About the Sustainable Development Goals. 2019. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>>. Acesso em: 02 dez de 2019.

VEZZOLI, R.; MERCOGLIANO, P.; PECORA, S.; ZOLLO, A. L.; CACCIAMANI, C. Hydrological simulation of Po River (North Italy) discharge under climate change scenarios using the RCM COSMO-CLM. **Science of the Total Environment**, v. 521, p. 346-358, 2015.

VIANA, T. S. **Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFSC, Florianópolis, 2010.

VIDAL, J. W. B. A posição do Brasil frente ao novo ambiente mundial. **Revista Eco**, v. 21, 2005.

VINCENT, L.A.; PETERSON, T.C.; BARROS, V.R.; MARINO, M.B.; RUSTICUCCI, M.; CARRASCO, G.; RAMIREZ, E.; ALVES, L.M.; AMBRIZZI, T.; BERLATO, M.A.; GRIMM, A.M.; MARENGO, J.A. ; MOLION, L.; MONCUNILL, D.F.; REBELLO, E.; ANUNCIAÇÃO, Y.M.T.; QUINTANA, J.; SANTOS, J.L.; BAEZ, J.; CORONEL, G.; GARCIA, J.; TREBEJO, I.; BIDEGAIN, M.; HAYLOCK, M.R.; KAROLY, D. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960–2000. **Journal of climate**, v. 18, n. 23, p. 5011-5023, 2005.

WAN, K. K. W.; CHEUNG, K. L.; LIU, D.; LAM, J. C. 2009. Impact of modelled global solar radiation on simulated building heating and cooling loads. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 3, p. 662-667, 2009.

WANG, X. L.; ZWIERS, F. W.; SWAIL, V. North Atlantic Ocean wave climate scenarios for the 21st century. **Journal of Climate**, v.17, p.2368– 2383, 2004.

WILD, M.; FOLINI, D.; HENSCHER, F.; FISCHER, N.; MÜLLER, B. 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.

XIUJI, L. X. L. W. Z. Analysis of the solar radiation variation in China in recent 30 years. **Quarterly Journal of Applied Meteorology**, v. 1, 1998.

XU, Y.; RAMANATHAN, V.; VICTOR, D. G. Global warming will happen faster than we think. **Nature**, v. 564, p. 30-32, 2018.

YEVJEVICH, V. **Solution manual to problems for discussion and solution in the book probability and statistics in hydrology**, revised edition, Colorado, Fort Collins, 1972.

YUE, S.; PILON, P.; CAVADIAS, G. Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. **Journal of hydrology**, v. 259, n. 1-4, p. 254-271, 2002.

ZHANG, X.; YANG, F. R. ClimDex (1.0) User Manual. **Climate Research Branch Environment Canada**, v. 22, 2004.