

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS
RAFAEL KERNER COELHO DOS SANTOS

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA NO BRASIL E
SEU PAPEL NO CUMPRIMENTO DA INDC DA CONVENÇÃO DE CLIMA DA ONU**

Varginha/MG

2020

RAFAEL KERNER COELHO DOS SANTOS

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA NO BRASIL E
SEU PAPEL NO CUMPRIMENTO DA INDC DA CONVENÇÃO DE CLIMA DA ONU**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Ciências Sociais Aplicadas da Universidade Federal de Alfenas, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Modelagem Científica e Tecnológica, sob orientação do professor Dr. Nilton César da Silva e sob coorientação dos professores Dr. André Rodrigues Monticeli e Dr. Paulo César Mappa

Varginha/MG

2020

RAFAEL KERNER COELHO DOS SANTOS

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA NO BRASIL E
SEU PAPEL NO CUMPRIMENTO DA INDC DA CONVENÇÃO DE CLIMA DA ONU**

A Banca examinadora abaixo-assinada, aprova a monografia apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Especialista em Modelagem Científica e Tecnológica da Universidade Federal de Alfenas em parceria com o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Aprovada em: ____ / ____ / ____

Prof. Dr. Nilton César da Silva (Orientador) Assinatura:

Instituição: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG

Prof. Dr. Lázaro Eduardo da Silva Assinatura:

Instituição: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG

Prof. Dr. Silvio Salgado Assinatura:

Instituição: Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL/MG

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre inspirar e orientar, com sua presença marcante e pela oportunidade de ter força e serenidade para trilhar esse e todos os outros caminhos por mim escolhidos.

Ao apoio irrestrito da minha família, desde o companheirismo dos meus irmãos Robson e Paula, mas principalmente a confiança, fé e incentivo incalculáveis dos meus pais Robson e Sandra.

A minha companheira para todos os momentos, Nayara, que sempre se mostrou compreensiva e com muita sabedoria soube me incentivar e mostrar que eu era capaz.

Ao Professor Dr. Nilton César da Silva, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG que, de forma absolutamente compreensiva e confiante, se mostrou sempre presente e me auxiliou dentro do possível, entendendo todas as dificuldades e restrições de tempo que se apresentaram ao longo de minha jornada na elaboração dessa monografia.

Aos Professores Dr. André Monticeli e Dr. Paulo Mappa, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, pelas disciplinas lecionadas ao longo da Especialização e que, de maneira absolutamente direta, contribuíram para a construção da inspiração técnica e acadêmica que permitiram construir esse trabalho, bem como com sua disponibilidade para realizar a coorientação, auxiliaram sobremaneira a realização desse trabalho.

Aos amigos construídos no curso: Fernando, Humberto, Maurício, Leopoldina, pelo apoio, união e superação.

Agradeço especialmente ao amigo Afonso Feliciano, pelo apoio irrestrito e confiança pelo sucesso na realização desse trabalho, bem como dicas valiosas acerca da implementação de algoritmos e execução das operações matemáticas relacionadas.

Ao demais professores da Especialização, Dra. Cláudia Adam Ramos, Dr. Pablo Javier Grunmann, Dr. Silvio Antônio Bueno Salgado e Dr. Leandro Ferreira, que se disponibilizaram com louvável prazer e confiança para transmissão de conhecimento e formação de todos os discentes do curso.

A todas as pessoas que estiveram e estão presentes na minha vida nesse período de muito aprendizado e crescimento, por fazerem parte de tão importante conquista na minha vida.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Esse trabalho tem por objetivo a aplicação do método de Suavização Exponencial de Holt no estabelecimento do comportamento atual e futuro das conexões de sistemas de geração de energia elétrica baseados em tecnologias renováveis na modalidade Geração Distribuída - GD, buscando verificar a contribuição desse tipo de fonte na redução de emissão de gases do Efeito Estufa, colaborando para o cumprimento das metas nacionais no Acordo de Paris. Através do modelo de previsão apresentado e com os valores estimados, foi possível realizar um prognóstico acerca de tal contribuição no cumprimento das metas estabelecidas, tanto para os dados reais relacionados ao período de janeiro de 2012 a setembro de 2020, como para uma estimativa futura de 12 meses, de outubro de 2020 a setembro de 2021. Por fim, conclui-se acerca da relevante contribuição dessa modalidade de geração que, conectada à Matriz Energética brasileira, se mostra fundamental para a real participação do Brasil como potência ecologicamente responsável e sua consolidação como uma das nações mais responsáveis pela preservação do meio ambiente.

ABSTRACT

This work aims to apply the Holt Exponential Smooth method to establish the actual and future behavior of renewable-based power generation system connections on the Distributed Generation modality, in order to verify this energy source contribution to the reduction of the Greenhouse Effect gases, contributing to the accomplishment of the Intended Nationally Determined Contributions of the Paris Agreement. By using the presented forecast model with the estimated values, it was possible to forecast such contribution for the accomplishment of the established goals, for the related real data of the period from 2012 January to 2020 September, as for 12 months forecast, from 2020 October to 2021 September. In the end, it concludes over the relevant contribution of this Generation modality that, connected to the brazilian Energy Matrix, which proves fundamental for the Brazil's role as an enviromental responsible global power, and it's consolidation as one of the most responsible nations for the environment preservation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta de Potência de Geração Elétrica – 2019 (%).....	13
Figura 2 - Disponibilidade de Potência para Consumidores Cativos, por Modalidade de Geração (%).....	14
Figura 3 - Potência por tipo de fonte - GD (%).....	14
Figura 4 - Suavização Exponencial Simples (sem tendência).....	21
Figura 5 - Suavização Exponencial de Holt (com tendência)	22
Figura 6 - Suavização Exponencial de Holt-Winter (tendência e sazonalidade aditiva).....	22
Figura 7 - Suavização Exponencial de Holt-Winter (tendência e sazonalidade multiplicativa)	22
Figura 8 - Potência Instalada Acumulada (MW) no período de jan/2012 a set/2020	29
Figura 9 - Geração Distribuída Acumulada (MWp) real x prevista no período.....	33
Figura 10 - Diferenças absolutas entre as potências reais e projetadas.....	34
Figura 11 - Diferenças percentuais entre as potências reais e projetadas.....	34
Figura 12 – Previsão de Potência Instalada para o período de 10/2020 a 09/2021	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de emissão de CO ₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil - 2019	15
Tabela 2 - Fatores médios de emissão de CO ₂ por tipo de fonte renovável em comparação com fonte térmica proveniente de combustível fóssil	16
Tabela 3 - HSP/dia por Região do Brasil	16
Tabela 4 - Emissões de CO ₂ realizadas, previstas e projetadas em função do período (dado em bilhões de toneladas de CO ₂)	19
Tabela 5 - Redução de Emissões de CO ₂ à partir de 2005, previstas e projetadas (dado em bilhões de toneladas de CO ₂)	19
Tabela 6 – GD na Matriz Energética Brasileira – jan/2012 a set/2020	28
Tabela 7 – Potência real e estimada da GD no período de jan/2012 a set/2020	29
Tabela 8 – Potência futura estimada (out/2020 a set/2021)	35
Tabela 9 – Geração mínima estimada (out/2020 a set/2021)	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Motivação.....	10
1.2 Objetivos	10
1.2.1 Objetivo geral.....	10
1.2.2 Objetivos específicos.....	11
1.3 Organização do texto	11
2 ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	13
2.1 Energias Renováveis e Geração Distribuída do Brasil	13
2.2 Energias Renováveis x Poluição Ambiental.....	15
3 O ACORDO DE PARIS	18
3.1 Objetivos Práticos e Indicadores do Acordo	18
3.2 A contribuição da Geração Distribuída para o cumprimento do Acordo	19
4 MODELAGEM MATEMÁTICA	20
4.1 Suavização Exponencial.....	20
4.1.1 Suavização de Holt	23
4.2 Medidas de Acurácia	24
5 MATERIAIS E MÉTODOS	26
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
7 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

Em uma época de incertezas motivadas por tão ampla mobilização de nações a nível mundial, sem precedentes na história recente da humanidade (NICOLAA *et al*, 2020), a atenção das sociedades está profundamente voltada no amparo e atendimento das necessidades mais imediatas das comunidades. Recursos financeiros e tecnológicos estão sendo dedicados para minimizar os impactos do fechamento dos mercados e das economias dos países, uma vez que não existe nação que não tenha sido impactada pela pandemia e pela quarentena, tão necessária para que a população mundial possa ter alguma chance de lidar com esse evento de proporção global.

Não devem ser deixados de lado, no entanto, os compromissos assumidos com tantas outras necessidades da humanidade, e um desses compromissos tem relação com o meio ambiente. Tão importante quanto a preocupação urgente e imediata das sequelas da pandemia do coronavírus, para a sociedade moderna, é a responsabilidade assumida pelos povos com a preservação das condições minimamente aceitáveis de qualidade de vida, da humanidade e dos ecossistemas de modo geral.

Segundo ANDREOLI *et al* (2018), muito embora a Terra seja equiparável a um organismo autorregulador, é evidente que o ser humano possui dois diferenciais em relação às demais espécies animais: a capacidade de produzir fortes impactos ambientais e grandes alterações no meio ambiente, a ponto de inviabilizar a preservação e continuidade de espécies animais e vegetais, e; a capacidade de agir conscientemente na busca de recuperar tais condições de continuidade e preservação, por meio de suas tecnologias e ações.

Para decidir sobre ações e seus impactos na sociedade e na natureza, a pesquisa científica e as ferramentas matemáticas e computacionais são profundamente relevantes, pois através delas é possível estimar, avaliar, e realizar previsões acerca de indicadores que representam por si o resultado e o impacto de políticas públicas de qualquer natureza (TEIXEIRA, 2003).

Dentre todas as tentativas da humanidade em atuar ativamente sobre a preservação do globo, convém destacar o chamado Acordo de Paris. Nações com objetivos claros de fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima por meio de ações bem direcionadas e compromissos assumidos, com prazo definido e indicadores de referência, se uniram e estabeleceram metas tangíveis e quantificáveis. Diversas são as frentes que direta ou indiretamente podem contribuir para a normalização do clima, e uma delas é a alteração das matrizes energéticas dos países, abdicando do uso de fontes de energia não-renováveis e substituindo por fontes renováveis e sustentáveis de energia.

Diversas são as tecnologias renováveis de geração de energia. Dentre elas, destaca-se a geração solar fotovoltaica pois, geograficamente, o Brasil possui condições ideais para esses tipos de geração (TIEPOLO *et al*, 2012). Por ser considerada renovável, essa fonte contribui direta e indiretamente para a redução de emissão de gases ligados ao Efeito Estufa (SANTOS *et al*, 2016).

Assim se faz pertinente a observação, interpretação e antecipação de resultados, por meio de aplicação de métodos científicos de análise de dados, que validem as ações tomadas e que aproximem

as nações do cumprimento dos compromissos formalizados no Acordo. O objetivo geral desse estudo é aplicar ferramenta estatística que viabilize a ponderação do comportamento de entrada de fontes de energia da modalidade Geração Distribuída na matriz energética brasileira, bem como sua previsão futura, buscando assim contribuir para a compreensão das consequências do investimento nesse tipo de geração para o cumprimento do Acordo de Paris.

O método estatístico escolhido foi a Suavização Exponencial de Holt - Suavização Exponencial Dupla, por aliar a simplicidade com a correta representação da tendência exponencial da entrada de sistemas de Geração Distribuída na Matriz Energética nacional ao longo do tempo

1.1 Motivação

A motivação principal desse trabalho consiste na relevância e contemporaneidade do tema, uma vez que está em curso o compromisso do país em se cumprir as metas estabelecidas no Acordo de Paris. Assim, a execução desse estudo depende inicialmente de se estabelecer a correta correlação entre os sistemas de geração renovável de energia na matriz energética e a retirada de sistemas sabidamente poluidores e não sustentáveis, a citar por exemplo usinas termelétricas movidas a combustíveis fósseis (SCHRAMM, 2016).

1.2 Objetivos

Esse trabalho de conclusão de curso foi dividido nos objetivos geral e específicos detalhados nos subtópicos a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo consiste na aplicação do método de Suavização Exponencial Dupla, também chamada de Suavização Exponencial de Holt, buscando estabelecer o comportamento atual e futuro das conexões de sistemas de geração de energia elétrica baseados em tecnologias renováveis na modalidade Geração Distribuída - GD, buscando verificar a contribuição desse tipo de fonte na redução de emissão de gases do Efeito Estufa, colaborando para o cumprimento das metas nacionais no Acordo de Paris.

Os dados de referência são as conexões de sistemas de Geração Distribuída baseados em tecnologias sustentáveis no período de janeiro de 2012 a setembro de 2020, projetando as novas conexões previstas para quaisquer intervalos futuros de tempo considerando o comportamento e tendência observados, por meio dos números colhidos da base de dados da ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Revisar os aspectos teóricos acerca do contexto histórico e social em estudo, buscando entender a relevância técnica e ambiental da implementação de tecnologias de geração sustentável de energia, com ênfase nos sistemas de Geração Distribuída;
- Revisar os aspectos teóricos acerca do Acordo de Paris, o compromisso assumido pelas nações e o papel do Brasil enquanto país signatário do Acordo;
- Revisar os aspectos teóricos acerca de modelagem estatística, apresentando um panorama dos modelos mais relevantes ao estudo em questão, justificando a escolha do modelo anteriormente apresentado;
- Estabelecer os indicadores de referência associados à meta do Brasil em termos de redução de emissão de gases poluentes;
- Compreender a relação direta e indireta da utilização das tecnologias que são objeto deste estudo na redução da emissão dos gases poluentes evidenciados;
- Por meio de ferramenta computacional adequada, implementar algoritmo que realize previsões de entradas de unidades geradoras no sistema de Geração Distribuída no Brasil, correlacionando a equivalência entre geração e redução de emissão de gases poluentes, a fim de observar a contribuição atual e futura desse tipo de sistema;
- Testar a confiabilidade do modelo implementado;
- Comparar os resultados obtidos e os indicadores de referências ligados à meta de redução de emissão de gases poluentes, presentes no Acordo;
- Concluir sobre a relevância de se utilizar e aperfeiçoar o modelo ao longo do tempo, bem como validar a pertinência desse tipo de estudo para subsidiar decisões ligadas ao Acordo e aos compromissos assumidos pelo Brasil.

1.3 Organização do texto

Para que fosse possível alcançar os resultados esperados em cada objetivo específico proposto nesse estudo, foi realizada uma pesquisa na literatura em cada um dos capítulos para uma melhor fundamentação teórica sobre o assunto.

O Capítulo 1 apresenta um panorama sobre o contexto e pertinência do estudo, descrevendo os objetivos estabelecidos e resultados pretendidos.

O Capítulo 2 aborda uma visão geral sobre as Energias Renováveis, um modelo de geração implementado no Brasil, chamado Geração Distribuída, bem como características ambientais e técnicas que relacionam a energia gerada e poluição direta ou indiretamente produzida pelo processo de geração.

O Capítulo 3 exibe-se os detalhes acerca do Acordo de Paris, tratado firmado por diversos países e que busca o equilíbrio ambiental, representado pela redução da temperatura média do planeta. Esse capítulo ainda correlaciona as energias renováveis com a emissão e redução de emissão de gases poluentes do efeito estufa.

O Capítulo 4 contém uma visão sistêmica acerca de modelos matemáticos, de forma a oportunizar o nivelamento de conhecimentos pertinentes ao objeto de estudo dessa monografia.

Por fim, os Capítulos 5, 6 e 7 apresentam os detalhes relacionados à execução dos estudos, desde a construção do modelo matemático pertinente, a incorporação dos dados ao modelo, elaboração dos indicadores, cálculo dos parâmetros e análise das informações produzidas, bem como conclusões alcançadas sobre o estudo.

2 ENERGIAS RENOVÁVEIS

PACHECO (2006) caracteriza as energias renováveis como aquelas de fontes alternativas, provenientes de técnicas de geração que se utilizam de insumos abundantes e inesgotáveis, com o mínimo impacto no meio ambiente. Ainda segundo o autor, são exemplos de fontes renováveis de energia aquelas baseadas na utilização de matéria orgânica de origem animal e vegetal (biomassa), a partir da força dos ventos (eólica), através da captação da luz solar (fotovoltaica), a partir de pequenas centrais hidrelétricas, entre outras variantes menos expressivas.

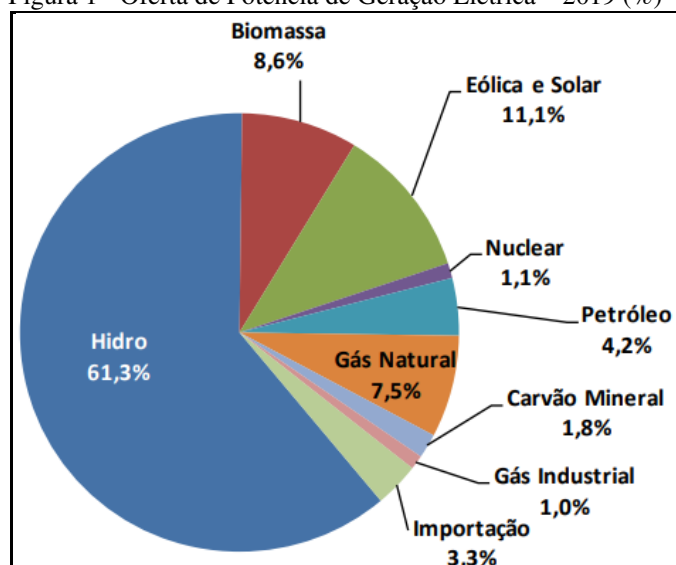
Tais fontes são assim caracterizadas pois, entre os motivos apresentados, elas em geral não produzem dejetos em sua geração, ou quando produzem estes não impactam de forma absolutamente expressiva na depreciação ambiental (LOCH *et al*, 2014).

2.1 Energias Renováveis e Geração Distribuída do Brasil

Quando se fala em geração de energia, de um modo geral, a sua maior expressão se dá na incorporação das fontes de geração à Matriz Energética do país. BRONZATTI *et al* (2008) descreve a Matriz Energética como sendo a composição de todas as fontes de energia que atendem uma determinada região, ou a nação como um todo. As mais diversas fontes de energia podem compor a matriz energética de um país, sendo normalmente representadas em função de sua relevância percentual, em termos de fontes individuais de energia e em função da potência instalada para cada tipo de fonte (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020).

A Figura 1 representa a distribuição da Matriz Energética no Brasil em 2019 em função da potência instalada, caracterizada por tipo de fonte.

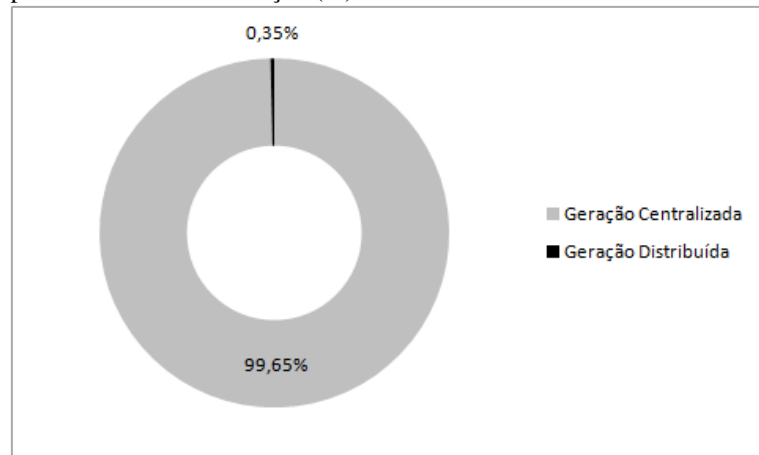
Figura 1 - Oferta de Potência de Geração Elétrica – 2019 (%)



Fonte: adaptado de (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020)

Dentre as fontes de energia apresentada, para o presente estudo optou-se por concentrar o foco na modalidade Geração Distribuída - GD de fontes renováveis de energia que, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2020) e conforme apresentado na Figura 2, ainda não ultrapassa 0,35% da potência disponibilizada para consumidores cativos.

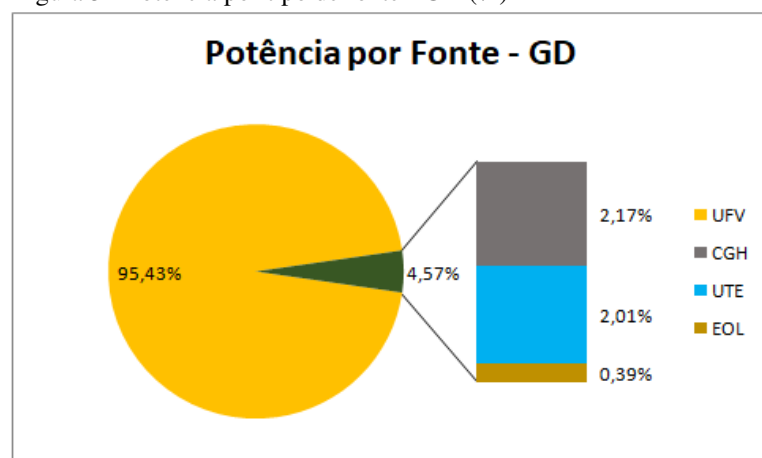
Figura 2 - Disponibilidade de Potência para Consumidores Cativos, por Modalidade de Geração (%)



Fonte: o autor. Dados: (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020)

Os estudos presentes nesse artigo terão como foco as fontes baseadas em geração solar fotovoltaica, em função de sua expressiva participação na modalidade GD, uma vez que, segundo AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2020) e apresentado na Figura 3, a geração fotovoltaica representa 95,43% do total de potência instalada nesse modelo de geração, bem como pela relevância do tema em uma época de grande mobilização legislativa acerca de incentivos e revisão de tributos e taxas ligados a esta modalidade de geração (CRUZ *et al* 2020).

Figura 3 - Potência por tipo de fonte - GD (%)



Fonte: o autor. Dados: (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2020)

2.2 Energias Renováveis x Poluição Ambiental

De acordo com LIRA *et al* (2019) as fontes fósseis de geração de energia elétrica contribuem de maneira significativa para a emissão de gases do Efeito Estufa. Para uma Matriz Energética robusta como a brasileira, sempre que se faz necessário o acionamento de unidades geradoras termelétricas como coadjuvante no fornecimento de energia elétrica, uma grande quantidade de CO₂ é emitida para a atmosfera, fato esse que contrasta com o compromisso assumido pelo Brasil no que tange à redução de emissão do referido gás, por meio do Acordo de Paris.

Por meio de ferramenta para cálculo do fator de emissão para o sistema elétrico disponibilizada por MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (2020), é possível estimar o chamado Fator de Emissão Médio mensal, contabilizado em toneladas de CO₂ por unidade de Megawatt-hora (tCO₂/MWh). Esse indicador corresponde à taxa de emissão de gás carbônico para cada unidade de energia entregue para consumo, e é utilizado para o cálculo da quantidade de gás carbônico emitido na atmosfera, conforme a equação:

$$\text{Energia Produzida} \times \text{Fator de Emissão de CO}_2 = \text{CO}_2 \text{ Produzido.} \quad (1)$$

Para o ano de 2019 os fatores médios mensais de emissão característicos do Sistema Interligado Brasileiro são apresentados na Tabela 1, dados em toneladas de CO₂ por Megawatt-hora.

Tabela 1 - Fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil - 2019

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
0,3540	0,5573	0,5075	0,5095	0,4794	0,4175	0,5914	0,5312	0,5606	0,5370	0,5720	0,5997	0,5181

Fonte: adaptado de (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2020)

Conhecendo os fatores médios de emissão de CO₂ atribuídos à matriz energética, é possível compreender o quão necessária é a atuação sobre as fontes de energia, visando a substituição de fontes não renováveis por fontes sustentáveis e renováveis de energia, de baixo impacto ambiental.

Esses fatores contemplam todas as formas de geração, sejam elas sustentáveis ou não. Para as fontes renováveis de energia, que são objeto de estudo dessa monografia, segundo PEHL *et al* (2017) os fatores de emissão de CO₂, já adequados à mesma ordem de grandeza (toneladas de CO₂ por Megawatt-hora) são apresentados na Tabela 2, bem como sua comparação com o fator estimado para fonte térmica proveniente da queima de combustível fóssil, nesse caso o Carvão Mineral, apresentado por EDENHOFER *et al*, 2014:

Tabela 2 - Fatores médios de emissão de CO₂ por tipo de fonte renovável em comparação com fonte térmica proveniente de combustível fóssil

Geração Fotovoltaica	Geração Eólica	Geração Térmica (Carvão Mineral)
0,006	0,004	0,91

Fonte: adaptado de (PEHL *et al.*, 2017) e (EDENHOFER *et al.*, 2014)

É evidente a importância da incorporação desse tipo de fonte na Matriz Energética em virtude do seu impacto reduzido na emissão de CO₂ no ambiente.

Segundo o INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (2017) a chamada HSP/dia - Hora de Sol Pico diária para cada região do Brasil é observada na Tabela 3, elaborada com base nos dados obtidos na fonte.

Tabela 3 - HSP/dia por Região do Brasil

Geração Solar Fotovoltaica	HSP/dia Média
Nordeste	5,9
Centro Oeste	5,7
Sudeste	5,6
Norte	5,5
Sul	5,0

Fonte: adaptado de (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS 2017)

É importante conhecer esse dado pois, através dele é possível estimar a capacidade de geração diária de energia elétrica, por meio da equação:

$$\text{Energia Produzida} = \text{Potência Instalada} \times \text{HSP Diária.} \quad (2)$$

Assim, conhecendo a estimativa de geração diária, dada em kWh (kilowatts-hora), é possível realizar as devidas comparações por meio da aplicação da Equação (1) apresentada anteriormente.

A quantidade de energia elétrica gerada em um dado período é dada por:

$$E_n = \sum_{i=1}^n E_i, \quad (3)$$

em que

E_n = energia total produzida ao longo de n períodos;

E_i = energia produzida no período i .

Assim, conhecendo os valores de potência instalada ao longo de quaisquer períodos, ou mais conservadoramente conhecendo-se o menor valor de potência instalada para os períodos em questão, a

Equação (3) permite estimar o total de energia gerada e, de posse desse valor, realizar demais estimativas direta ou indiretamente relacionadas.

3 O ACORDO DE PARIS

O Acordo de Paris é um tratado no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (CQNUMC) com o objetivo de conter a emissão de gases de efeito estufa a partir do ano de 2020, a fim de reduzir a temperatura ambiental do planeta em 2 °C, sendo o ideal em torno de 1,5 °C. Também faz parte do acordo reforçar a importância do desenvolvimento de políticas mais sustentáveis. O tratado já havia sido previamente esboçado em 30 de Novembro de 2015, sendo negociado em Paris durante a COP21, e aprovado em 12 de dezembro do mesmo ano, assinado em 22 de Abril de 2016.

É importante salientar que anteriormente já foram discutidas medidas sustentáveis com o mesmo objetivo a nível global, como o Protocolo de Kyoto em 1997, por exemplo. Então esse acordo, que não é uma lei, mas tem grande influência nas políticas globais, surge de uma série de tentativas, acordos e emendas para solucionar a questão das emissões de dióxido de carbono há várias décadas. Sendo, portanto, uma nova implementação CQNUMC com os seguintes objetivos:

- (a) Assegurar que o aumento da temperatura média global fique abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais e prosseguir os esforços para limitar o aumento da temperatura a até 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, reconhecendo que isto vai reduzir significativamente os riscos e impactos das alterações climáticas; (b) Aumentar a capacidade de adaptação aos impactos adversos das alterações climáticas e promover a resiliência do clima e o baixo desenvolvimento de emissões de gases do efeito estufa, de maneira que não ameace a produção de alimentos; (c) Criar fluxo financeiros consistentes na direção de promover baixas emissões de gases de efeito estufa e o desenvolvimento resistente ao clima. (ONU Brasil, 2015)

O Tratado de Paris não só cobra o registro das emissões de gases de efeito estufa a todos os países e pede aos países desenvolvidos políticas públicas sustentáveis, mas surpreende ao também reconhecer a dificuldade dos países emergentes e em desenvolvimento para alcançar suas metas sustentáveis ao mesmo tempo que travam conflitos internos, crises econômicas e guerras civis. Por isso, o acordo flexibiliza essas metas dentro das capacidades, mas estimula os líderes a serem ambiciosos, redefinindo e ampliando as metas ao menos a cada 5 anos, incentivando antecipar esses resultados devido a urgência da situação climática atual.

3.1 Objetivos Práticos e Indicadores do Acordo

Segundo a Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada, tradução de iNDC - *Intended Nationally Determined Contributions*, os indicadores apresentados na Tabela 4 constam nos registros históricos, expectativas e metas brasileiras para momentos específicos no futuro, no que tange à emissão de CO₂ para o meio ambiente.

Tabela 4 - Emissões de CO₂ realizadas, previstas e projetadas em função do período (dado em bilhões de toneladas de CO₂)

2005 (Registro)	2025 (Meta)	2030 (Meta)
1,7	1,0	0,8

Fonte: adaptado de (ONU Brasil, 2015)

Ou seja, para o período de 25 anos (2005 a 2030), é esperada uma redução na emissão de CO₂ para a atmosfera na faixa de 900 milhões de toneladas.

Trazendo esses dados para uma perspectiva de redução na emissão do CO₂ temos o seguinte panorama, apresentado na Tabela 5:

Tabela 5 - Redução de Emissões de CO₂ à partir de 2005, previstas e projetadas (dado em bilhões de toneladas de CO₂)

2005	2025 (acumulado)	2030 (acumulado)
1,7 (100%)	-0,7 (-43%)	-0,9 (-52%)

Fonte: adaptado de (ONU Brasil, 2015)

Por meio desses indicadores, é possível realizar um estudo comparativo da meta acumulada de redução de emissão do CO₂ com a capacidade de contribuição dos sistemas de geração renovável de energia, participantes da Matriz Energética na modalidade Geração Distribuída.

3.2 A contribuição da Geração Distribuída para o cumprimento do Acordo

De posse dos indicadores e metas de redução estabelecidos pelo Brasil frente ao Acordo de Paris, é possível realizar uma comparação entre o que se espera emitir de poluição atmosférica por fontes convencionais de energia e o quanto seria possível reduzir nessas emissões, conforme as fontes recorrentes de geração e com maiores emissões de dióxido de carbono para a atmosfera (os chamados rastros de carbono), a saber, fontes termelétricas de energia (PEHL *et al*, 2017), forem sendo substituídas por fontes renováveis.

É possível realizar a comparação entre o rastro médio de carbono da Matriz Energética Nacional e a assinatura correspondente à fonte solar fotovoltaica, que dentre as renováveis é aquela com maior rastro de carbono. Realizando a divisão entre os indicadores de fator de emissão médio de CO₂ da Matriz Energética Nacional apresentado na Tabela 1 e o fator de emissão médio da fonte fotovoltaica de energia e multiplicando por 100%, chega-se ao resultado de que a Geração Fotovoltaica é 86,35 vezes menos poluente que a composição da Matriz Energética atual. Já operando a diferença entre os dois fatores, resulta em uma redução direta na emissão de CO₂ na ordem de 0,5121 toneladas para cada Megawatt-hora de energia produzido e injetado na Matriz Energética brasileira.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA

A matemática, por meio de suas ferramentas, paradigmas e teoremas, permite a descrição dos mais diversos fenômenos e contextos da realidade e da sociedade. ARAUJO (2009) enfatiza ainda o papel crítico-social da matemática, além de evidenciar a profunda relevância da modelagem matemática como ferramenta imprescindível na construção e desenvolvimento das sociedades.

A pesquisa científica depende da matemática. O pensamento científico é um pensamento de lógica, de coerência e de raciocínio. No contexto de estimativas, análise e previsão de indicadores e de variáveis, a aplicação direta de ferramentas e técnicas matemáticas ocorre para tornar tangíveis e documentáveis os resultados das observações realizadas e sua correlação com expectativas futuras.

Para cada contexto, para cada rol de dados e para cada categoria de estudo, diversos são os modelos matemáticos e ferramentas capazes de prever, com maior ou menor precisão, o comportamento futuro de variáveis. Cabe ao pesquisador, nesses casos, testar cada um dos modelos pertinentes de modo a escolher aquele que melhor se adequa aos objetivos propostos na pesquisa.

4.1 Suavização Exponencial

Cada série de dados pode apresentar um determinado comportamento que, quando criteriosamente observado, permite o estabelecimento adequado do modelo que o melhor descreva (ARAUJO, 2009). A escolha criteriosa do modelo mais adequado é mais intuitiva quando é possível antecipar algumas características acerca da base de dados sob estudo.

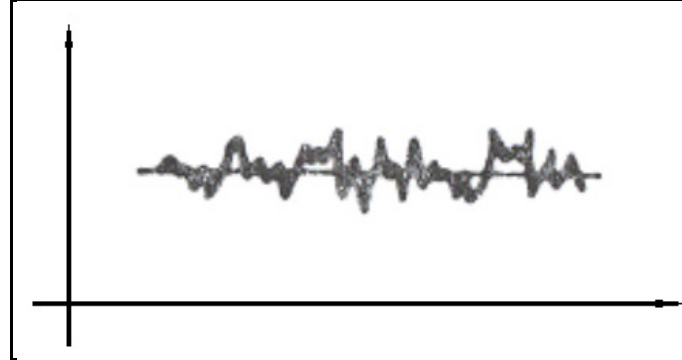
Em se tratando de séries temporais, quando se trata de previsão, a maioria dos métodos é baseada na idéia intuitiva de que as observações passadas podem conter informações sobre o padrão comportamental da série de dados. GIORDANO *et al* (2014) considera que cabe a escolha do método mais adequado que permita distinguir o padrão de quaisquer ruídos eventualmente contidos na observação, de modo a mitigar sua influência sobre os resultados de previsões futuras, assumindo assim que o método em questão é capaz de prever valores futuros minimamente compatíveis com a realidade.

Dentre os mais diversos modelos de previsão existentes, aqueles baseados em suavização assumem que os próprios valores extremos da série de dados correspondem à representação da própria aleatoriedade em si e, por meio da suavização desses valores extremos, é possível definir o padrão básico que será usado na previsão dos valores futuros.

A correta identificação de características, a citar como tendência e sazonalidade, é fundamental para a escolha adequada do modelo de suavização mais apropriado para a descrição e previsão futura dos dados.

As Figuras 4 a 7 apresentam, de forma genérica, exemplos do aspecto gráfico de funções caracterizadas em virtude da existência ou não de tendência e sazonalidade.

Figura 4 - Suavização Exponencial Simples (sem tendência)



Fonte: o autor

Para séries sem tendência, os dados são representados pela média da série, calculada pela expressão:

$$Y_t = \mu + \varepsilon_t, \quad t = 0, 1, 2, 3, \dots, T \quad (4)$$

em que

Y_t = valor médio para o período t ;

μ = nível médio constante;

ε_t = erro para o período t .

É necessário estimar os parâmetros do modelo (neste caso μ), por meio do cálculo das médias móveis segundo a expressão:

$$MM_t(k) = \frac{1}{k} \sum_{i=t-k+1}^t Y_t. \quad (5)$$

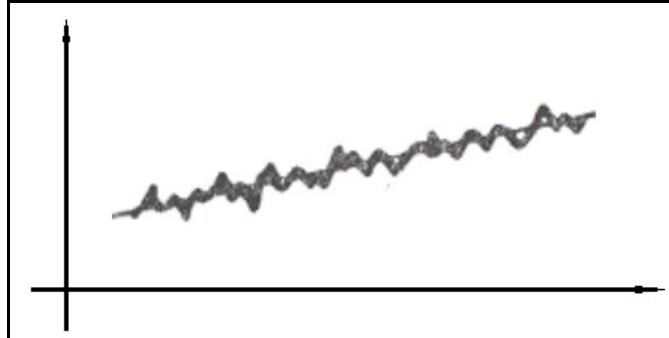
A fórmula (5) fornece a média móvel para um período de tempo t com k observações. Neste caso utiliza-se a média móvel, que nada mais é do que o deslocamento do cálculo da média, agrupando-se 'k' valores passados da série para a definição de um termo futuro. Para cada nova observação disponível, uma nova média deve ser calculada trocando a observação mais antiga e incluindo a mais recente.

A previsão de todos os valores futuros é dada pela última média móvel calculada por meio da expressão:

$$\hat{\mu} = \hat{Y}_t(h) = MM_t(k) \quad \forall h > 0, \quad (6)$$

em que $\hat{Y}_t(h)$ é o valor previsto no tempo t para h passos a frente.

Figura 5 - Suavização Exponencial de Holt (com tendência)



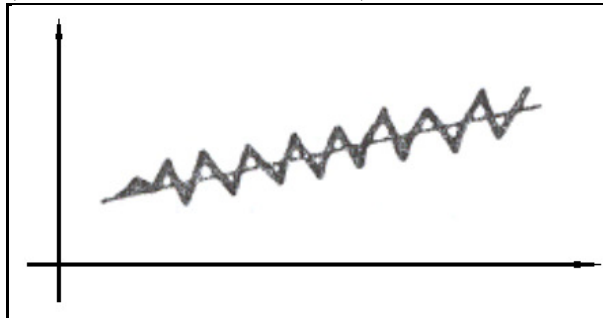
Fonte: o autor

O modelo de Suavização Exponencial de Holt com tendência pode ser expresso por meio da equação:

$$Y_t = \mu + T_t + \varepsilon_t \quad t = 0, 1, 2, 3, \dots, T \quad (7)$$

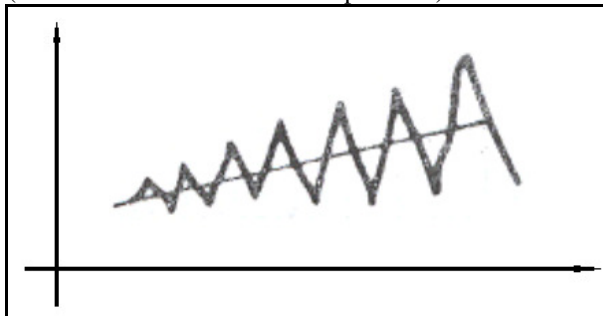
em que T_t denota a componente de tendência no período t .

Figura 6 - Suavização Exponencial de Holt-Winter (tendência e sazonalidade aditiva)



Fonte: o autor

Figura 7 - Suavização Exponencial de Holt-Winter (tendência e sazonalidade multiplicativa)



Fonte: o autor

Estes tipos de modelos podem ser expressos por meio da expressão (8), quando a componente sazonal tem comportamento aditivo, e pela expressão (9), quando a componente sazonal tem comportamento multiplicativo:

$$Y_t = \mu + T_t + S_t + \varepsilon_t \quad t = 0, 1, 2, 3, \dots, T \quad (8)$$

$$Y_t = (\mu + T_t) \cdot S_t + \varepsilon_t \quad t = 0, 1, 2, 3, \dots, T, \quad (9)$$

em que S_t denota a componente de sazonalidade no período t .

Para atender o propósito desse trabalho, será abordado com relevante profundidade o modelo de Suavização Exponencial de Holt, que contempla tendência sem considerar qualquer característica de sazonalidade.

4.1.1 Suavização de Holt

Em 1957 Holt aprimorou o método de Suavização Exponencial Simples, com o objetivo de obter previsões para dados que apresentassem tendência característica (HOLT, 2004). A motivação deste aperfeiçoamento do método ocorreu pois ao aplicar o método de Suavização Exponencial Simples a uma série com tendência linear positiva ou negativa, essa fornecerá previsões que superestimam ou subestimam, respectivamente, os valores reais da série.

O modelo de Suavização de Holt é uma extensão da Suavização Exponencial Simples, com a diferença de que, além utilizar a constante ' α ' para a suavização do valor médio, ele apresenta uma segunda constante ' β ' de suavização, que modela a tendência da série.

O nível médio e a inclinação da série são estimados por L_t e T_t respectivamente, de acordo com as expressões (10) e (11):

$$L_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \quad 0 < \alpha < 1 \quad (10)$$

$$T_t = \beta \cdot (L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad 0 < \beta < 1, \quad (11)$$

Além disso, as previsões futuras são definidas por meio da expressão:

$$\hat{Y}_t(h) = L_t + hT_t \quad \forall h > 0. \quad (12)$$

Cabe reforçar que este modelo de suavização é o mais indicado quando o fator predominante na série temporal é a tendência (HOLT, 2004), pois é o diferencial do modelo, utilizar a tendência para diferenciar e aproximar mais as previsões.

4.2 Medidas de Acurácia

No sentido de se averiguar a real precisão ou desempenho de um modelo estatístico aplicado à previsão, são usadas medidas estatísticas de acurácia (XAVIER, 2000). São alguns exemplos de importantes medidas estatísticas de acurácia:

Média Percentual Absoluta do Erro - MAPE (do inglês *Mean Absolute Percentage Error*), que representa as diferenças percentuais entre os valores reais e previstos, realizando uma média simples dos valores. Quanto menor o valor, mais preciso será o modelo.

Desvio Padrão Absoluto da Média - MAD (do inglês *Mean Absolute Deviation*), que representa o desvio padrão do ajuste em relação à média nas mesmas unidades dos dados.

Desvio Padrão Quadrático da Média - MSD (do inglês *Mean Squared Deviation*), sendo uma medida de acurácia bastante comum em ajustes de séries temporais. Quando ocorrem dados discrepantes e que aparentam ser “falsos positivos” (mais conhecidos na literatura como *outliers*) no conjunto de dados, essa medida é mais afetada do que o MAD. Portanto se há um indicador MAD baixo e um MSD alto é possível identificar a presença de *outliers* no conjunto de dados.

Erro Quadrático Médio - MSE (do inglês *Mean Squared Error*), que é considerado um relevante indicador para avaliar a performance do modelo de previsão.

Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio - RMSE (do inglês *Root Mean Square Error*), uma verificação mais refinada do MSE mas construído de forma semelhante.

Dos indicadores apresentados, serão explorados o **MSE** e o **MAPE**, sendo o primeiro usado para o estabelecimento dos fatores de suavização, e o último por sua relevância enquanto indicador que servirá para assegurar a acurácia do modelo. Suas fórmulas características são apresentadas por meio das expressões:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{r,i} - R_{p,i})^2 \quad (13)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|R_{r,i} - R_{p,i}|}{R_{r,i}} \right) \times 100, \quad (14)$$

em que:

N = número de observações;

$R_{r,i}$ = valor real identificado no instante i ;

$R_{p,i}$ = valor previsto para o instante i .

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados a serem observados e analisados correspondem à potência elétrica instalada na modalidade de Geração Distribuída no território nacional, no período de janeiro de 2012 a setembro de 2020, totalizando 105 meses. Tais dados são abertos e disponibilizados integralmente por AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2020).

De posse dos dados coletados, coube a escolha do método de Suavização Exponencial de Holt, em função da aparente tendência dos dados, porém sem uma percepção óbvia de sazonalidade. A escolha do modelo passará por teste através do cálculo de medidas de acurácia, mais precisamente a MSE, através da Equação (13).

O modelo matemático do algoritmo de previsão foi construído conforme Equações (10), (11) e (12).

Aqui cabe observar que é necessário resolver dois problemas iniciais para a aplicação do método:

- Escolher os valores iniciais L_1 e T_1 ;
- Escolher os valores mais apropriados para α e β .

Para solucionar o primeiro problema, foi escolhida para L_1 a primeira observação da base de dados (equivalente a Y_1). Para T_1 no entanto, existem duas opções de escolha do valor inicial:

- A diferença entre a segunda observação e a primeira, conforme demonstrado pela Equação (15).

$$T_1 = Y_2 - Y_1 \quad (15)$$

- A diferença entre a última observação e a primeira, dividido pelo número total de observações menos um, de acordo com o apresentado pela Equação (16)

$$T_1 = \frac{Y_N - Y_1}{N - 1} \quad (16)$$

Para resolver o segundo problema foi utilizado um método iterativo onde são definidos valores arbitrários para α (0,1 a 0,9) e β (0,1 a 0,9), para que então seja possível calcular a medida MSE para cada combinação de valores de α e β . Assim, são escolhidos os valores de ambas as variáveis que correspondam ao menor valor de MSE, tornando o modelo mais assertivo.

Em seguida, foi possível aplicar os fatores de suavização α e β nas Equações (10) e (11) e, de posse dos valores reais e previstos de L e T , aplicar a Equação (12) para h previsões futuras.

Por fim, para assegurar a confiabilidade dos dados resultantes do modelo de previsão utilizado, foram verificadas as medidas de acurácia MAPE e RMSE.

Todo esse processo permite a definição tanto do valor acumulado de potência instalada até 30 de setembro de 2020, quanto permite uma projeção futura. A seguir, utilizando a referência de rastro de carbono da fonte fotovoltaica de geração da Tabela 2, é possível estimar tanto a emissão horária de gás CO₂ bem como a economia de emissão, quando comparado com o rastro de carbono da Matriz Energética como um todo.

Estes levantamentos permitem verificar a participação, em termos percentuais, desta modalidade de geração no avanço do Brasil em direção ao cumprimento das metas do Acordo de Paris, mais especificamente aquelas ligadas à redução de emissão dos gases do efeito estufa. Dessa forma, é cumprido o objetivo geral do trabalho, bem como permite estabelecer propostas de estudos futuros.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 6 apresenta os valores reais de potência instalada na Matriz Energética Nacional, modalidade Geração Distribuída, acumulados no período de janeiro de 2012 a setembro de 2020.

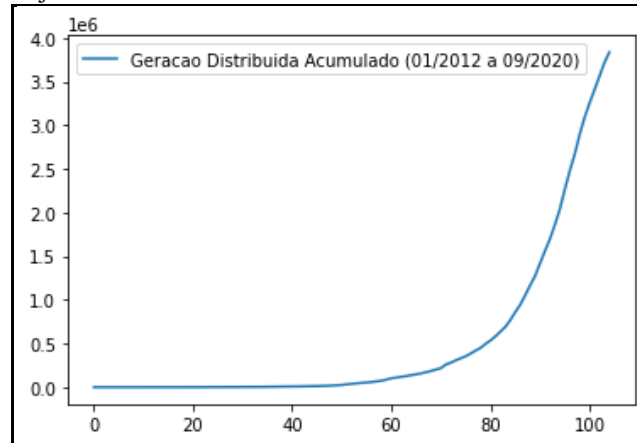
Tabela 6 – GD na Matriz Energética Brasileira – jan/2012 a set/2020

Mês	Pot (kW)	Mês	Pot (kW)	Mês	Pot (kW)	Mês	Pot (kW)
jan/12	0,00	abr/14	2235,46	jun/16	28483,77	ago/18	370041,80
fev/12	0,00	mai/14	2761,88	jul/16	33559,04	set/18	408703,01
mar/12	403,00	jun/14	2876,61	ago/16	37382,14	out/18	449354,32
abr/12	413,00	jul/14	2946,21	set/16	40952,05	nov/18	493793,18
mai/12	413,00	ago/14	3532,59	out/16	46078,56	dez/18	540871,00
jun/12	413,00	set/14	3686,21	nov/16	53376,03	jan/19	589558,39
jul/12	430,42	out/14	3902,80	dez/16	58067,15	fev/19	659590,57
ago/12	433,42	nov/14	4086,89	jan/17	63548,07	mar/19	734482,67
set/12	460,42	dez/14	4261,37	fev/17	68827,60	abr/19	821031,59
out/12	460,42	jan/15	4458,69	mar/17	73374,21	mai/19	919151,18
nov/12	460,42	fev/15	4887,33	abr/17	79787,68	jun/19	1031433,63
dez/12	460,42	mar/15	5343,38	mai/17	86057,00	jul/19	1143767,93
jan/13	467,22	abr/15	5636,79	jun/17	95990,81	ago/19	1281687,93
fev/13	467,22	mai/15	6031,11	jul/17	104243,16	set/19	1417019,19
mar/13	530,10	jun/15	6598,07	ago/17	113892,18	out/19	1559145,93
abr/13	530,10	jul/15	7045,15	set/17	127310,86	nov/19	1717182,02
mai/13	560,10	ago/15	8318,58	out/17	139064,64	dez/19	1881778,45
jun/13	560,10	set/15	9110,83	nov/17	155453,17	jan/20	2106495,02
jul/13	611,10	out/15	10110,03	dez/17	170984,66	fev/20	2319201,67
ago/13	613,10	nov/15	10996,36	jan/18	191431,23	mar/20	2509127,58
set/13	686,31	dez/15	12323,78	fev/18	211899,88	abr/20	2743828,63
out/13	735,36	jan/16	14146,52	mar/18	237522,93	mai/20	2919330,35
nov/13	778,56	fev/16	16482,35	abr/18	259301,12	jun/20	3089148,76
dez/13	806,23	mar/16	19720,97	mai/18	280746,97	jul/20	3239368,50
jan/14	1941,48	abr/16	22391,84	jun/18	307454,55	ago/20	3388242,55
fev/14	1966,39	mai/16	24790,74	jul/18	338826,93	set/20	3544979,99
mar/14	2061,48						

Fonte: adaptado de (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2020)

O comportamento gráfico dos dados pode ser verificado conforme Figura 8.

Figura 8 - Potência Instalada Acumulada (MW) no período de jan/2012 a set/2020



Fonte: o autor

Por meio de laço iterativo, os valores ótimos dos fatores α e β , com base no melhor MSE relacionado a estes fatores, são definidos.

Melhor MSE = 1115502,4286145247

Valor ótimo de α = 0,9

Valor ótimo de β = 0,9

Por meio das equações características do modelo de Suavização Exponencial de Holt, são alcançadas todas as previsões pertinentes à base de dados. Os valores reais, valores previstos e a variação percentual entre eles são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Potência real e estimada da GD no período de jan/2012 a set/2020

Mês	Pot. real (kW)	Pot. prevista (kW)	Dif. abs.	Dif. %
jan/12	0,00	0,00	0	0
fev/12	0,00	0,00	0	0
mar/12	403,00	362,70	40,3	-10
abr/12	413,00	440,61	27,613	6,68596
mai/12	413,00	426,04	13,0378	3,15685
jun/12	413,00	414,02	1,01965	0,246889
jul/12	430,42	427,67	2,75008	-0,638929

Mês	Pot. real (kW)	Pot. prevista (kW)	Dif. abs.	Dif. %
ago/12	433,42	433,96	0,542513	0,12517
set/12	460,42	458,45	1,96766	-0,427363
out/12	460,42	462,50	2,07513	0,450703
nov/12	460,42	461,22	0,798553	0,17344
dez/12	460,42	460,44	0,0240677	0,0052273
jan/13	467,22	466,47	0,752874	-0,161139
fev/13	467,22	467,68	0,459258	0,098296
mar/13	530,10	524,02	6,07953	-1,14686
abr/13	530,10	534,58	4,47901	0,844937
mai/13	560,10	559,01	1,09313	-0,195168
jun/13	560,10	562,34	2,23509	0,399052
jul/13	611,10	606,76	4,34251	-0,710606
ago/13	613,10	616,52	3,41716	0,557358
set/13	686,31	680,61	5,69577	-0,829913
out/13	735,36	735,78	0,422513	0,0574566
nov/13	778,56	779,84	1,2771	0,164034
dez/13	806,23	808,11	1,88111	0,233322
jan/14	1941,48	1831,14	110,34	-5,6833
fev/14	1966,39	2045,24	78,8472	4,00975
mar/14	2061,48	2088,36	26,8817	1,304
abr/14	2235,46	2227,48	7,97802	-0,356885
mai/14	2761,88	2721,63	40,2458	-1,45719
jun/14	2876,61	2906,91	30,2955	1,05317
jul/14	2946,21	2963,53	17,3233	0,587986
ago/14	3532,59	3482,91	49,6838	-1,40644
set/14	3686,21	3713,35	27,1354	0,736132
out/14	3902,80	3909,34	6,54062	0,167588
nov/14	4086,89	4089,32	2,43327	0,0595383
dez/14	4261,37	4262,38	1,01255	0,0237611

Mês	Pot. real (kW)	Pot. prevista (kW)	Dif. abs.	Dif. %
jan/15	4458,69	4456,46	2,23365	-0,0500965
fev/15	4887,33	4863,45	23,881	-0,488632
mar/15	5343,38	5333,94	9,4431	-0,176725
abr/15	5636,79	5652,70	15,9136	0,282316
mai/15	6031,11	6026,58	4,53172	-0,0751391
jun/15	6598,07	6577,90	20,1696	-0,305689
jul/15	7045,15	7051,74	6,59199	0,0935677
ago/15	8318,58	8239,87	78,7064	-0,946152
set/15	9110,83	9135,46	24,634	0,270381
out/15	10110,03	10104,35	5,68053	-0,0561871
nov/15	10996,36	11003,54	7,17626	0,0652603
dez/15	12323,78	12282,32	41,4598	-0,336421
jan/16	14146,52	14084,25	62,2729	-0,440199
fev/16	16482,35	16417,13	65,2222	-0,39571
mar/16	19720,97	19618,00	102,966	-0,522116
abr/16	22391,84	22425,28	33,4372	0,149328
mai/16	24790,74	24837,93	47,1903	0,190355
jun/16	28483,77	28364,70	119,071	-0,418033
jul/16	33559,04	33381,57	177,474	-0,52884
ago/16	37382,14	37467,80	85,6565	0,229138
set/16	40952,05	41019,96	67,9069	0,165821
out/16	46078,56	45934,03	144,532	-0,313665
nov/16	53376,03	53110,23	265,802	-0,497979
dez/16	58067,15	58265,15	198,006	0,340995
jan/17	63548,07	63553,09	5,02152	0,0079019
fev/17	68827,60	68829,40	1,79467	0,0026075
mar/17	73374,21	73447,52	73,3105	0,0999132
abr/17	79787,68	79622,07	165,605	-0,207558
mai/17	86057,00	86016,06	40,9418	-0,0475752

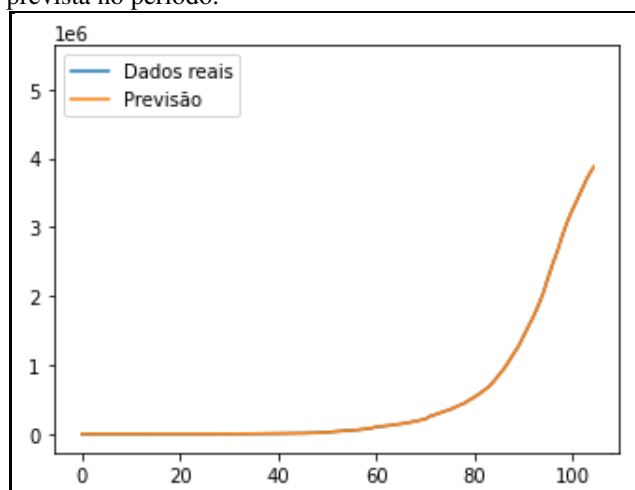
Mês	Pot. real (kW)	Pot. prevista (kW)	Dif. abs.	Dif. %
jun/17	95990,81	95629,05	361,762	-0,376871
jul/17	104243,16	104310,49	67,3301	0,0645895
ago/17	113892,18	113808,21	83,9661	-0,0737242
set/17	127310,86	126902,81	408,049	-0,320514
out/17	139064,64	139121,19	56,5523	0,0406662
nov/17	155453,17	155046,90	406,27	-0,261346
dez/17	170984,66	170946,89	37,7688	-0,022089
jan/18	191431,23	190969,40	461,835	-0,241254
fev/18	211899,88	211767,51	132,362	-0,0624642
mar/18	237522,93	237015,29	507,644	-0,213724
abr/18	259301,12	259551,63	250,507	0,0966085
mai/18	280746,97	280903,61	156,646	0,0557961
jun/18	307454,55	306948,76	505,798	-0,164512
jul/18	338826,93	338198,11	628,824	-0,185589
ago/18	370041,80	369925,78	116,029	-0,0313557
set/18	408703,01	407987,60	715,397	-0,175041
out/18	449354,32	448959,44	394,875	-0,087876
nov/18	493793,18	493371,46	421,73	-0,0854062
dez/18	540871,00	540524,29	346,708	-0,0641018
jan/19	589558,39	589339,05	219,329	-0,0372022
fev/19	659590,57	657427,15	2163,42	-0,327994
mar/19	734482,67	733391,24	1091,45	-0,148601
abr/19	821031,59	819765,71	1265,85	-0,154179
mai/19	919151,18	917736,16	1415,03	-0,153949
jun/19	1031433,63	1029733,57	1700,05	-0,164824
jul/19	1143767,93	1143411,18	356,694	-0,0311859
ago/19	1281687,93	1279195,86	2492,01	-0,194432
set/19	1417019,19	1416591,10	428,151	-0,0302149
out/19	1559145,93	1558591,39	554,488	-0,0355636

Mês	Pot. real (kW)	Pot. prevista (kW)	Dif. abs.	Dif. %
nov/19	1717182,02	1715473,06	1708,94	-0,0995198
dez/19	1881778,45	1880682,32	1096,18	-0,0582524
jan/20	2106495,02	2100336,00	6159	-0,292381
fev/20	2319201,67	2318726,23	475,517	-0,0205035
mar/20	2509127,58	2511883,60	2756,1	0,109843
abr/20	2743828,63	2740198,02	3630,73	-0,132323
mai/20	2919330,35	2923921,70	4591,45	0,157278
jun/20	3089148,76	3091411,64	2262,89	0,073253
jul/20	3239368,50	3241525,47	2156,97	0,0665861
ago/20	3388242,55	3388776,31	533,807	0,0157547
set/20	3544979,99	3544132,76	847,243	-0,0238998

Fonte: o autor

O aspecto dos valores previstos sobrepostos aos reais no gráfico pode ser verificado conforme Figura 9.

Figura 9 - Geração Distribuída Acumulada (MWp) real x prevista no período.



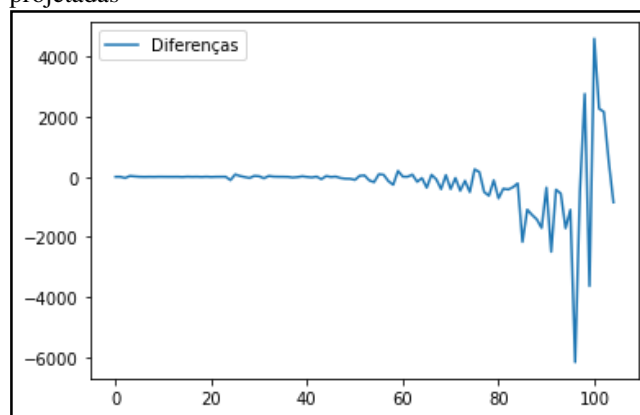
Fonte: o autor

É evidente que, por meio do gráfico ilustrado na Figura 8, não é possível distinguir as curvas características dos dados reais e dos projetados. A escala utilizada no eixo de ordenadas do gráfico prejudica a visualização das curvas sobrepostas.

É possível, no entanto, ponderar acerca das diferenças entre cada um dos valores ao longo de todas as leituras, observando-os em termos absolutos e percentuais. As Figuras 10 e 11 trazem esta percepção gráfica.

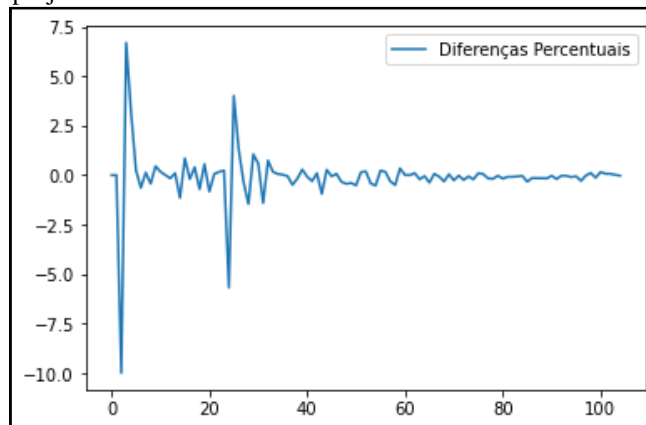
Cabe ressaltar que em termos absolutos as discrepâncias entre os valores reais e projetados de potência parece oscilar de forma divergente mas, ao observar a mesma variação em termos percentuais, fica evidente que as variações são cada vez menos representativas em relação à ordem de grandeza das leituras, que no início ficavam na casa das centenas e no fim alcançou a casa dos milhões.

Figura 10 - Diferenças absolutas entre as potências reais e projetadas



Fonte: o autor

Figura 11 - Diferenças percentuais entre as potências reais e projetadas



Fonte: o autor

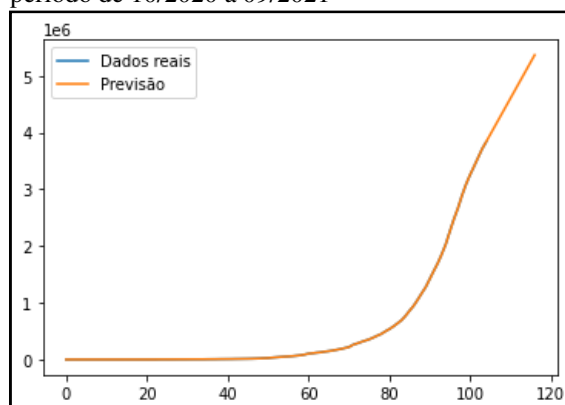
Para que se pudesse averiguar a acurácia do procedimento, coube inspecionar o indicador MAPE, por meio dos dados coletados e projetados, e através da Equação (14) característica:

$$\text{MAPE: } 0,0002276171070159102$$

Um valor tão baixo deste indicador, corresponde a uma elevada capacidade do modelo em estimar valores que representam com precisão a realidade. Além disso, este valor MAPE reduzido sugere que existe uma baixíssima influência de quaisquer variáveis não consideradas no estudo, sobre a entrada mensal de potência nesta modalidade de geração.

Dessa forma, é possível propor uma estimativa de potência instalada na modalidade em estudo para períodos futuros. Por meio da Figura 12 e da Tabela 8 exemplifica-se a previsão de incremento de potência na Matriz por meio da Geração Distribuída para os 12 meses seguintes ao período observado.

Figura 12 – Previsão de Potência Instalada para o período de 10/2020 a 09/2021



Fonte: o autor

Tabela 8 – Potência futura estimada (out/2020 a set/2021)

Mês	Pot (kW)
out/20	3698726,69
nov/20	3853320,62
dez/20	4007914,55
jan/21	4162508,48
fev/21	4317102,42
mar/21	4471696,35
abr/21	4626290,28
mai/21	4780884,21
jun/21	4935478,14
jul/21	5090072,07
ago/21	5244666,01
set/21	5399259,94

Fonte: o autor

Cada um dos valores apresentados, quer sejam os valores reais ou estimados, representam a potência instalada disponível (real ou prevista) no primeiro dia de cada mês. Uma vez que a série de dados é absolutamente crescente, isso conduz o raciocínio de que os valores iniciais de cada mês representa a menor potência instalada para o mês em questão. Por meio das Equações (2) e (3), buscando apresentar um cenário conservador ao utilizar o menor valor mensal de potência instalada bem como o menor valor de HSP disponível na Tabela 3, é possível estimar a produção por fontes distribuídas de energia fotovoltaica para quaisquer períodos.

Dessa forma, ao aplicar as Equações (2) e (3), para o período descrito na Tabela 8, são estimados os valores integralizados de geração de energia, apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Geração mínima estimada (out/2020 a set/2021)	
Mês	Energia (MWh)
out/20	573302,64
nov/20	577998,09
dez/20	621226,76
jan/21	645188,82
fev/21	604394,34
mar/21	693112,93
abr/21	693943,54
mai/21	741037,05
jun/21	740321,72
jul/21	788961,17
ago/21	812923,23
set/21	809888,99
TOTAL	8302299,28

Fonte: o autor

Da Tabela 9 temos que a previsão de geração conservadora, ao longo dos 12 meses futuros é de 8.302.299,28 MWh de energia elétrica. Esse dado permite estimar a emissão de CO₂ relacionada a essa quantidade de energia produzida por fonte fotovoltaica na modalidade GD e compará-la com a mesma quantidade produzida por uma geração equivalente de energia, proveniente de sistemas termelétricos baseados em combustível fóssil. As referências para este cálculo são a Equação (1) e a Tabela 2.

CO₂ produzido por fonte fotovoltaica = **49.813,8 [tCO₂]**

CO₂ produzida por fonte termelétrica = **7.555.092,0 [tCO₂]**

Assim, ao incorporar a fonte fotovoltaica por meio do modelo de Geração Distribuída, provocando assim a redução de acionamento de fontes termelétricas não-renováveis de energia, alcança-se uma redução, para o período destacado, de aproximadamente 7,5 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera.

Considerando a meta nacional de redução de emissão de gases poluentes apresentada na Tabela 4 de aproximadamente 0,9 bilhão de toneladas de CO₂, a substituição da fonte poluente para a fonte renovável representa uma contribuição de aproximadamente 0,834% no cumprimento da meta brasileira no Acordo de Paris.

Se fosse projetado para 120 meses no futuro, em vez dos 12 meses calculados, utilizando o modelo aplicado, esta contribuição se aproximaria de 8,34%, o que pode ser considerado bastante relevante para o objetivo estabelecido.

7 CONCLUSÃO

De posse dos dados levantados e por meio dos modelos aplicados e dos valores projetados, fica evidente a importância do Brasil investir em fontes renováveis.

Cabe ressaltar que este trabalho contemplou apenas a geração de energia proveniente de sistemas fotovoltaicos conectados à matriz energética nacional na modalidade Geração Distribuída. Segundo os próprios dados disponibilizados por AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2020) quando comparados com os valores apresentados por MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2020), a Geração Distribuída fotovoltaica ainda não representa nem 0,25% da Matriz Energética brasileira. Existe um imenso mercado a ser atendido pelas empresas atuantes neste setor. Investir nessa modalidade, seja com incentivos fiscais ou subsídios, representa não apenas a geração de empregos e a movimentação da economia, mas também uma excelente oportunidade para o Brasil atuar diretamente na redução de emissão de CO₂, caminhando em direção ao cumprimento da meta pretendida no Acordo de Paris.

Esse estudo certamente não é conclusivo, restando como oportunidade de estudos futuros o aprimoramento dos modelos aplicados, contemplando outras tecnologias de geração renovável como a Eólica, Pequenas Centrais Hidrelétricas, bem como outras modalidades de geração, como a Geração Centralizada de Energia.

Além disso, é pertinente o constante aprimoramento do modelo, visando tornar os dados futuros sempre mais assertivos, buscando confrontar os dados previstos com os dados reais, assim comprovando a eficácia da aplicação do modelo apresentado.

Ainda como proposta de estudos futuros, convém a aplicação de novos modelos matemáticos, bem como a implementação de algoritmos baseados em inteligência artificial, para fins de comparação com o modelo abordado nessa monografia e verificação dos resultados. Além disso, a utilização de outras medidas de acurácia corroborarão a eficácia deste modelo.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Geração Distribuída - Busca por data de conexão. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/VerGD.asp>>. Acesso em: 08 de outubro de 2020.
- ANDREOLI, Cleverson V.; ANDREOLI, Fabiana de Nadai; PICCININI, Cristiane *et al.* Biodiversidade: a importância da preservação ambiental para manutenção da riqueza e equilíbrio dos ecossistemas. Coleção Agrinho, Paraná, p. 1-22, 2018.
- ARAUJO, Jussara de L. Uma Abordagem Sócio-Crítica da Modelagem Matemática: a perspectiva da educação matemática crítica. Revista de Educação em Ciência e Tecnologia, v.2, n.2, p.55-68, jul. 2009
- BRONZATTI, Fabricio Luiz; IAROZINSKI NETO, Alfredo. MATRIZES ENERGÉTICAS NO BRASIL: cenário 2010-2030. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção: enegep, Rio de Janeiro, p. 1-15, out. 2008.
- CRUZ, Tamirez P. R. *et al.* Análise socioambiental e legislativa dos impactos da energia solar fotovoltaica no Brasil. Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 6, n. 8, p. 63495-63511 agosto de 2020.
- EDENHOFER, O., R. PICHS-MADRUGA, Y. SOKONA *et al.* Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2014
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional (BEN) 2020: Relatório Síntese / Ano base 2019. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br> >. Acesso em nov/2020.
- Giordano, Frank R. *et al.* A First Course in Mathematical Modeling. Cengage Learning. Boston, USA. 2014.
- Holt, C. C. Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. International Journal of Forecasting, v. 20, p. 5-10, (2004)
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, CENTRO DE CIÊNCIA DO SISTEMA TERRESTRE. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2.ed. -- São José dos Campos : INPE, 2017.
- LIRA, Marcos A. T. *et al.* Contribuição dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica para a Redução de CO₂ no Estado do Ceará. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 34, n. 3, 389-397, 2019.
- LOCH, Éder; HENKES, Jairo Afonso. Alternativas para reduzir a poluição gerada por automóveis a partir do uso de energias renováveis. Gestão & Sustentabilidade Ambiental, Florianópolis, v. 3, n. 1, p. 565-583, set. 2014.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil - Ano Base 2019. Disponível em: <http://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/arquivos/emissoes_co2/Despacho_2019_nov_d_ez.xlsx>. Acesso em: 25 de outubro de 2020.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. RESENHA ENERGÉTICA BRASILEIRA - Ano Base 2019. Disponível em <http://www.mme.gov.br/documents/36208/948169/Resenha+Energética+Brasileira+-+edição+2020>. Acesso em: 25 de outubro de 2020.
- NICOLAA, Maria; ALSAF, Zaid; SOHRABI, Catrin *et al.* The socio-economic implications of the coronavirus pandemic (COVID-19): a review. International Journal Of Surgery. [S. L.], p. 185-193. abr. 2020.
- ONU Brasil. Adoção do Acordo de Paris. Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima — Conferência das Partes, Vigésima primeira sessão. Paris, 30/11-11/12/2015)
- PACHECO, Fabiana. Energias Renováveis: breves conceitos. Conjuntura e Planejamento: SEI, Salvador, v. 1, p. 4-11, out. 2006.

Pehl, M., Arvesen, A., Humpenöder, F. *et al.* Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. *Nat Energy* 2, 939–945 (2017).

SANTOS, Veronica Solimar dos; BLANCO, Claudio José Cavalcante. ESTIMATIVA DE CRÉDITO DE CARBONO NA GERAÇÃO DE ENERGIA COM FONTES RENOVÁVEIS NA ILHA DE MARIMARITUBA-SANTARÉM-PA. *Rea: Revista de estudos ambientais*, Belém, v. 18, n. 1, p. 17-29, jun. 2016.

SCHRAMM, Juliana. ESTUDO DA DISPERSÃO DE POLUENTES EM UMA USINA TERMELÉTRICA LOCALIZADA EM LINHARES UTILIZANDO O MODELO CALPUFF. 2016. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

TEIXEIRA, Enise Barth. A análise de dados na pesquisa científica: importância e desafios em estudos organizacionais. *Desenvolvimento em Questão*, [S. L.], v. 1, p. 177-201, 2003.

TIEPOLO, Gerson M.; CASTAGNA, Annemahlen Gehrke; CANGIOLIERI JUNIOR, Osiris *et al.* Fontes Renováveis de Energia e a Influência no Planejamento Energético Emergente no Brasil. VIII Cbpe: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Curitiba, p. 1-15, ago. 2012.

XAVIER, Lara H. Modelos univariado e multivariado para análise de medidas repetidas e verificação de acurácia do modelo univariado por meio de simulação. Dissertação (mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2000.