

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* FORMIGA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Ludimila Patrícia da Silva de Llamas

**MODELO DE PREVISÃO UTILIZANDO REGRESSÃO MÚLTIPLA POLINOMIAL  
APLICADO A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**

Formiga

2022

LUDIMILA PATRÍCIA DA SILVA DE LLAMAS

**MODELO DE PREVISÃO UTILIZANDO REGRESSÃO MÚLTIPLA POLINOMIAL  
APLICADO A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Formiga para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia elétrica.

Orientador: Dr. Renan Souza Moura

Coorientadora: Dr<sup>a</sup>. Luzia Aparecida Costa

Formiga

2022

Llamas, Ludimila Patrícia da Silva de

L791m            Modelo de previsão utilizando regressão múltipla polinomial aplicado a  
geração distribuída de energia elétrica no Brasil / Ludimila Patrícia da Silva de Llamas

-- Formiga : IFMG, 2022.

70p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Renan Souza Moura

Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Luzia Aparecida Costa

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga.

1. Geração distribuída. 2. Regressão múltipla polinomial. 3. Previsão de  
geração. 4. Suavização exponencial tripla. 5. Aplicação de método estatístico  
quantitativo. I. Moura, Renan Souza. II. Costa, Luzia Aparecida. III. Título.

CDD 621.3

LUDIMILA PATRÍCIA DA SILVA DE LLAMAS

**MODELO DE PREVISÃO UTILIZANDO REGRESSÃO MÚLTIPLA POLINOMIAL  
APLICADO A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Bacharelado em Engenharia  
Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais -  
*Campus* Formiga para obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia elétrica.

Avaliado em 30 de junho de 2022.

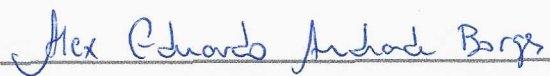
Nota: 81

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Renan Souza Moura (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup> Dra. Luzia Aparecida Costa (Coorientadora)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Lucas Frederico Jardim Meloni

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Msc. Alex Eduardo Andrade Borges

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup> Msc. Cintia Arantes Silva

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, aos meus pais Ana Maria e Jose Luis pelo carinho e ensinamentos de vida, a minha avó Maria de Lourdes e a minha bisavó Clarinda (*in memoriam*) que sempre me incentivaram a alçar voos mais altos, aos meus irmãos Héctor e Fabrício pelo carinho e pela torcida a realização dos meus sonhos.

Agradeço aos meus orientadores Dr. Renan Souza Moura pelo incentivo, atenção, disposição e todos os ensinamentos de vida e a Dr<sup>a</sup>. Luzia Aparecida Costa pela orientação, apoio, paciência e por ter iluminado o caminho certo para a realização dessa pesquisa, vocês foram a árvore que originou a semente deste trabalho, sem vocês não seria possível.

Agradeço ao Setor de Assistência Estudantil pela bolsa de auxílio estudantil que me possibilitou continuar no curso integral e ao Setor de Pesquisa e Extensão pelos incentivos.

Agradeço as minhas amigas e amigos, e a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão desse sonho, essa conquista é nossa!

“E apesar de tudo, o Senhor estava sempre ao meu lado, segurando bem firme a minha mão.”

Salmos, 73:23

## RESUMO

Neste trabalho são utilizados dados de geração distribuída hidrelétrica, eólica, fotovoltaica e termelétrica com o intuito de estimar o aumento da capacidade instalada total da geração distribuída, com auxílio de métodos estatísticos de regressão múltipla polinomial. Os resultados obtidos demonstraram que em meados de 2047 a geração distribuída no âmbito nacional alcançará a geração hidrelétrica, sendo um importante dado para o planejamento de energia do país.

**Palavras-chave:** Geração distribuída; Regressão múltipla polinomial; Previsão de geração.

## **ABSTRACT**

In this work, data from hydroelectric, wind, photovoltaic and thermoelectric distributed generation are used to estimate the increase in the total installed capacity of distributed generation, with the aid of statistical methods of polynomial multiple regression. The results obtained showed that in mid-2047 the generation distributed at the national level will reach hydroelectric generation, being an important data for the country's energy planning.

**Keywords:** Distributed generation; Polynomial multiple regression; Generation forecast.



## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ABRAPCH – Associação Brasileira de CGHs e PCHs

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CGH – Usina central geradora hidrelétrica de pequeno porte

EOL – Usina de energia eólica

ERD – Conexão de Geração Remota e Encargo de Responsabilidade da Distribuidora

ETENE – Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste

GD – Geração distribuída de energia elétrica

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MAPE – Erro absoluto percentual médio

ONS – Operador Nacional de Sistema Elétrico

RC – Região crítica

SEP – Sistema elétrico de potência

SIN – Sistema Interligado Nacional

SMAPE – Erro médio simétrico de porcentagem absoluta

UFV – Usina de energia fotovoltaica

UTE – Usina de energia termelétrica

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Dados nacionais de crescimento de geração distribuída no Brasil, 2015 a 2022...	34
Gráfico 2 - Crescimento da geração distribuída fotovoltaica das regiões brasileiras de 2015 a 2022 .....	35
Gráfico 3 - Modelo da geração distribuída no Brasil de 2015 a 2022.....	36
Gráfico 4 - Previsão da geração distribuída nacional para 2032 .....	36
Gráfico 5 - Previsão da geração distribuída nacional para 2042 .....	37
Gráfico 6 - Crescimento da geração distribuída no centro oeste, 2015 a 2022 .....	38
Gráfico 7 - Modelos linear e polinomial da geração CGH na região Centro oeste.....	38
Gráfico 8 - Modelos linear e polinomial da geração UFV na região Centro oeste .....	39
Gráfico 9 - Modelos linear e polinomial da geração UTE na região Centro oeste.....	39
Gráfico 10 - Crescimento da geração distribuída na região nordeste entre 2015 e 2022 .....	40
Gráfico 11 - Crescimento da geração distribuída CGH na região nordeste entre 2015 e 2022	40
Gráfico 12 - Crescimento da geração distribuída EOL na região nordeste entre 2015 e 2022	41
Gráfico 13 - Crescimento da geração distribuída UFV na região nordeste entre 2015 e 2022	41
Gráfico 14 - Crescimento da geração distribuída UTE na região nordeste entre 2015 e 2022	42
Gráfico 15 - Crescimento da geração distribuída na região norte entre 2015 e 2022 .....	43
Gráfico 16 - Crescimento da geração distribuída CGH na região norte entre 2015 e 2022 .....	43
Gráfico 17 - Crescimento da geração distribuída UFV na região norte entre 2015 e 2022 .....	44
Gráfico 18 - Crescimento da geração distribuída UTE na região norte entre 2015 e 2022.....	44
Gráfico 19 - Crescimento da geração distribuída na região sudeste entre 2015 e 2022.....	45
Gráfico 20 - Crescimento da geração distribuída CGH na região sudeste entre 2015 e 2022 .....	46
Gráfico 21 - Crescimento da geração distribuída EOL na região sudeste entre 2015 e 2022 .....	46
Gráfico 22 - Crescimento da geração distribuída UFV na região sudeste entre 2015 e 2022 .....	47
Gráfico 23 - Crescimento da geração distribuída UTE na região sudeste entre 2015 e 2022 .....	47
Gráfico 24 - Crescimento da geração distribuída na região sul entre 2015 e 2022.....	48
Gráfico 25 - Crescimento da geração distribuída CGH na região sul entre 2015 e 2022 .....	48
Gráfico 26 - Crescimento da geração distribuída EOL na região sul entre 2015 e 2022 .....	49
Gráfico 27 - Crescimento da geração distribuída UFV na região sul entre 2015 e 2022 .....	49
Gráfico 28 - Crescimento da geração distribuída UTE na região sul entre 2015 e 2022 .....	50
Gráfico 29 - Previsão do crescimento de geração UFV na região centro oeste .....	50
Gráfico 30 - Previsão do crescimento de geração UFV na região nordeste .....	51

Gráfico 31 - Previsão do crescimento de geração UFV na região sudeste.....	52
Gráfico 32 - Previsão do crescimento de geração UFV na região sul.....	52
Gráfico 33 - Previsão do crescimento de geração UFV na região norte.....	52
Gráfico 34 - Previsão do crescimento de geração EOL na região nordeste.....	53
Gráfico 35 - Previsão do crescimento de geração EOL na região sudeste.....	54
Gráfico 36 - Previsão do crescimento de geração EOL na região sul.....	54
Gráfico 37 - Previsão do crescimento de geração UTE na região norte.....	55
Gráfico 38 - Previsão do crescimento de geração UTE na região nordeste.....	56
Gráfico 39 - Previsão do crescimento de geração UTE na região centro oeste.....	56
Gráfico 40 - Previsão do crescimento de geração UTE na região sul.....	57
Gráfico 41 - Crescimento da geração distribuída UFV nacional entre 2015 e 2022.....	57
Gráfico 42 - Previsão da geração distribuída UFV nacional para 2032.....	58

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fontes de energia: Origens .....	10
Figura 2 - Potência em MW por ano e combustível. ....	12
Figura 3 - Mapa do Brasil e usinas distribuídas, 2022 .....	12
Figura 4 - Região crítica para teste de hipóteses bilateral. ....	19
Figura 5 - Gráfico de dados e modelos polinomial e linear .....	20
Figura 6 - Distribuição das unidades de CGHs no Brasil.....	25
Figura 7 - CGH Nicolau Klüppel em Curitiba - PR .....	25
Figura 8 - Complexo Eólico no nordeste do Brasil. ....	26
Figura 9 - Localização dos parques eólicos no Brasil, 2022 .....	27
Figura 10 - Sistema fotovoltaico residencial .....	28
Figura 11 - Localização das usinas fotovoltaicas no Brasil, 2022.....	29
Figura 12 - Usina termelétrica de Igarapé, MG.....	30
Figura 13 - Localização das usinas termelétricas no Brasil, 2022.....	31
Figura 14 - Valores de preços médios dos leilões por fonte, em R\$/MWh, atualizados pelo ETENE, 2021 .....	33

## SUMÁRIO

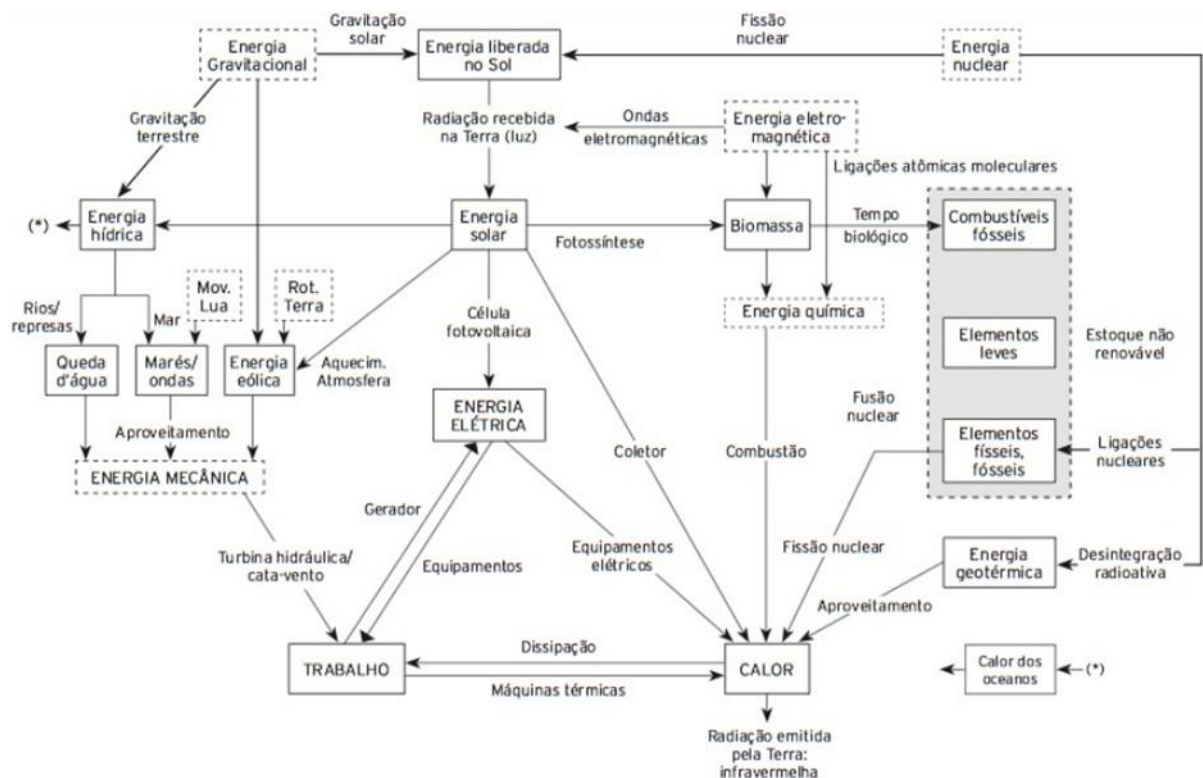
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1	Problemática	15
1.2	Justificativa	15
1.3	Objetivos	16
1.3.1	<i>Objetivos gerais</i>	16
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>17</b>
2.1	Regressão linear por mínimos quadrados	19
2.2	Regressão polinomial	22
2.3	Método de suavização exponencial	23
2.4	Geração distribuída por centrais geradoras hidrelétricas (CGH)	24
2.5	Geração distribuída eólica (EOL)	26
2.6	Geração distribuída fotovoltaica (UFV)	27
2.7	Geração distribuída termelétrica (UTE)	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>32</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS DADOS HISTÓRICOS DE GD DO BRASIL</b>	<b>33</b>
4.1	Nacional	34
4.2	Centro oeste	37
4.3	Nordeste	40
4.4	Norte	43
4.5	Sudeste	45
4.6	Sul	47
4.7	Previsão regional da geração distribuída UFV	50
4.8	Previsão regional da geração distribuída EOL	53
4.9	Previsão regional da geração distribuída UTE	55
4.10	Modelo e previsão para UFV nacional	57
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>62</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo (REIS, 2003), as fontes básicas de energia, suas relações no sistema solar e o impacto no tempo, de acordo com os processos de transformação para a geração de eletricidade acontecem das formas: transformações de trabalho gerado por energia mecânica, por meio do uso de turbinas hidráulicas (acionadas por quedas d’água, marés) e pás (acionadas pelo vento), transformação direta da energia solar, por meio do uso de células fotovoltaicas, transformação de trabalho resultante de aplicação de calor gerado pelo sol, por combustão (da energia química), fissão nuclear ou energia geotérmica, através da aplicação de máquinas térmicas, e transformação de trabalho resultante de reações químicas (através das células e combustível).

A Figura 1 mostra os processos de transformações de energia em energia elétrica.

Figura 1 - Fontes de energia: Origens



Fonte: Imagem retirada de (REIS, 2003)

É possível observar os processos de geração de energia elétrica através de energia hídrica, solar, biomassa e combustíveis fósseis e suas particularidades de geração.

A geração elétrica brasileira passou por mudanças significativas nas últimas décadas,

e o setor elétrico deverá sofrer outras alterações no futuro levando em consideração o nível de desenvolvimento tecnológico atual, que modificará mercados consumidores e as legislações brasileiras frente a geração distribuída.

Um sistema interligado é constituído pela interconexão de dois ou mais sistemas de potência (também chamados de subsistemas ou áreas), cada um com suas usinas, transformadores, linhas de transmissão e cargas próprias. Segundo o Operador Nacional de Serviço (ONS), sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários.

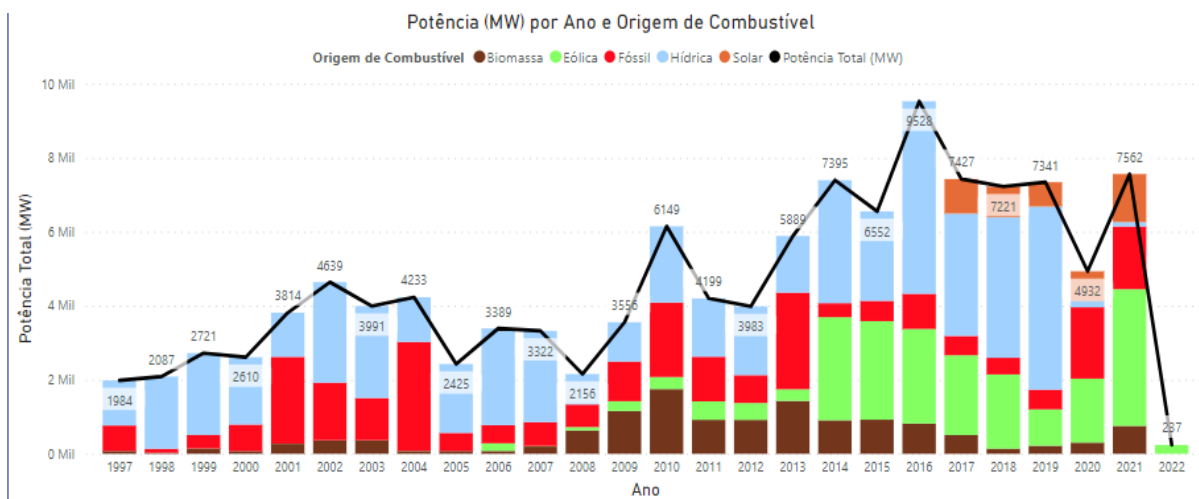
A interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, propicia a transferência de energia entre subsistemas, permite a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias, permitindo o atendimento ao mercado com segurança e economicidade. (ONS, 2022)

O SEP centralizado possui grandes centrais geradoras distantes das cargas, conectadas por linhas de transmissão de alta tensão, enquanto o SEP descentralizado possui centrais de pequeno ou médio porte desenvolvidas para atender o consumo local ou regional das cargas próximas.

O Brasil possui grande extensão territorial e alto potencial hídrico e por isso, tem o maior percentual de geração hidráulica. Na década de 1990 a geração hidrelétrica correspondia a 90% da geração de todo o país. Segundo (ANEELc, 2022) em junho de 2022, com a maior participação de outras formas de geração, a energia produzida pelas usinas hidrelétricas representa 59,65% da geração total.

É perceptível que nos últimos seis anos a matriz elétrica brasileira sofreu mudanças significativas. Novas tecnologias de geração foram incorporadas e a matriz passou a ter características diferentes por região e por tipo de geração. A Figura 1 mostra o acompanhamento das centrais geradoras de 1997 a 2021 por origem de combustível.

Figura 2 - Potência em MW por ano e combustível.



Fonte: imagem retirada de (ANEELa, 2022)

É notável o crescimento de geração eólica a partir de 2014 e solar a partir do ano de 2017, sendo tipos de geração distribuída. É possível observar na Figura 3 a localização e distribuição das usinas de geração distribuída por modalidade.

Figura 3 - Mapa do Brasil e usinas distribuídas, 2022



Fonte: imagem retirada de (ANEELa, 2022)



A energia eólica e solar fotovoltaica são as tecnologias que estão sendo utilizadas com maior frequência no Brasil, com maior potencial para utilização na geração distribuída de eletricidade e com maior aplicabilidade a curto prazo. A geração distribuída descentraliza a produção de energia, produzindo eletricidade perto do local de consumo e permitindo aliviar as linhas de transmissão e os sistemas de distribuição. (REIS, 2003)

A geração distribuída se refere ao uso de pequenos dispositivos modulares de geração de eletricidade sendo autônomos ou conectados a rede e localizados próximo ao ponto de consumo. Sobre esse tipo de geração, tem-se vantagens:

- Maior participação do consumidor na expansão do sistema e redução das perdas técnicas na rede de transmissão;
- Diversificação da matriz energética do Brasil e postergação de investimentos no sistema de transmissão e distribuição;
- Diminuição da necessidade de investimentos na expansão da geração, estabilidade e confiabilidade devido a geração próxima a carga.

Entretanto há também desvantagens:

- Maior complexidade na operação do sistema devido a injeção de potência em diversos pontos e necessidade de investimentos nas redes de distribuição em equipamentos de proteção e reguladores de tensão para locais com baixo carregamento de rede;
- Subsídios cruzados entre consumidores com e sem geração distribuída dependendo do sistema de compensação utilizado e impactos nos contratos de comercialização de energia (com a redução do mercado consumidor as distribuidoras podem ficar sobre contratadas);
- Impactos nos planejamentos da geração, transmissão e distribuição devido ao comportamento incerto da geração distribuída devido a aspectos naturais.

O faturamento da unidade consumidora é feito pelo modelo *net metering* que significa “medição líquida”. Neste sistema há troca de energia entre o consumidor que também é gerador e a rede de distribuição sem a circulação de moeda. Quando a geração do consumidor é maior que o seu consumo, o excedente é injetado na rede da concessionária e quando o consumo é

menor que a produção, existe a absorção de potência. Segundo (SIMONE; LUCAS, 2019) os custos das distribuidoras com cobertura tarifária são divididos em três grupos:

1. Energia (geração);
2. Transporte (transmissão e distribuição);
3. Encargos setoriais.

Os impostos, que são calculados sobre o valor consumido, são repassados ao consumidor (Pis/Cofins, ICMS) em conjunto com a taxa de iluminação pública. Os custos são ainda divididos em:

- Parcela A: custos não gerenciáveis pela distribuidora, equivalentes a 52,7% da tarifa (energia, transmissão e encargos);
- Parcela B: itens gerenciáveis da distribuição, responsáveis por 18,8% da tarifa.

A concessionária/distribuidora de energia fica exposta ao alto risco de variação do mercado ao administrar 80% dos custos não diretamente gerenciáveis por ela, porém intrinsecamente ligados aos resultados da concessionária. A diminuição do consumo é um sério problema levando em consideração o sistema tarifário que trata apenas do volume consumido, tendo consequências também no planejamento de demanda das redes de distribuição. É interessante ressaltar que na geração distribuída os parâmetros são diferentes, e isso deveria afetar a tarifação e consequentemente a arrecadação de imposto, mas não é o que ocorre na prática.

A distribuidora de MG realizou análises em um Grupo de Estudos de Sistemas de Distribuição sobre a avaliação do impacto da inserção de GD no sistema elétrico da CEMIG, identificando aspectos benéficos para maximizá-los e mitigar efeitos negativos. Esses estudos foram publicados no XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica realizado em novembro de 2019 em Belo Horizonte – MG. Os efeitos da conexão e adaptação da rede frente a inserção de GD são:

1. Impacto nas perdas técnicas em função da conexão da GD na média tensão;
2. Impacto no controle de tensão em função da conexão da GD na média tensão;
3. Impacto na flexibilidade operativa em em função da conexão da GD na média tensão;

4. Impacto para o sistema de alta tensão em função da conexão da GD na média tensão;
5. Impacto financeiro para o plano de desenvolvimento da distribuidora devido a GD;
6. Custos relacionados as obras para conexão de GD;
7. Conexão de Geração Remota e Encargo de Responsabilidade da Distribuidora (ERD).

É possível notar que os impactos negativos da GD ocorrem mais significativamente na média tensão, e ocasiona custos relevantes para as concessionárias de energia.

A utilização do método estatístico de regressão linear múltipla é uma técnica fundamentada e eficaz para a análise de dados de crescimento. Dado o crescimento da geração distribuída no Brasil, com ênfase na geração eólica, fotovoltaica e termelétrica, é uma estratégia importante para a tomada de decisões com relação aos resultados a longo prazo de investimentos no setor de energia.

## **1.1 Problemática**

É possível prever o montante de geração distribuída que será instalado no Brasil e nas suas regiões por meio de técnicas de regressão múltipla?

## **1.2 Justificativa**

O desenvolvimento de um país depende de fatores como por exemplo a segurança energética. O abastecimento de energia elétrica garante a continuidade de processos de infraestrutura que por sua vez influenciam o desenvolvimento econômico. Avaliar os impactos da geração distribuída no panorama futuro de geração de energia elétrica é interessante pois possibilita prever as formas de geração que terão maiores e menores crescimentos e assim determinar os investimentos a serem realizados em determinados tipos de geração para atender a demanda local. Através das análises dos dados de crescimento coletados, é possível inferir o crescimento e determinar quais usinas não é interessante realizar o investimento para aumento de geração de energia.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivos gerais***

Apresentar a técnica de modelagem de regressão polinomial aplicada a geração distribuída de energia de centrais geradoras hidrelétricas, eólica, fotovoltaica, e termelétrica no Brasil.

Prever a capacidade de geração distribuída nacional futura no Brasil e a previsão da geração distribuída fotovoltaica regional através dos dados históricos.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

Verificar a correlação existente entre as variáveis unidades geradoras e potência instalada. Constatada a correlação, prever o futuro modelo nacional e regional de geração distribuída.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como forma de auxiliar para um melhor entendimento da metodologia utilizada nesse TCC, este capítulo apresentará os conceitos básicos sobre o tema estudado. A análise de regressão é uma técnica estatística para investigar e realizar uma modelagem matemática entre as variáveis. As aplicações da regressão são inúmeras e ocorrem em quase todos os campos da ciência. Através dessa técnica é possível conhecer a dependência ou independência entre variáveis, tipos de relações (linear, exponencial, entre outras) e relacioná-las por meio de uma expressão matemática, qual é útil para se estimar o valor de uma das variáveis quando existe o conhecimento os valores das outras, sob determinadas condições. (MACIEL, 2019) Genericamente, tais relações funcionais podem ser representadas pela Equação (1):

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) \quad (1)$$

onde  $Y$  representa a variável resposta (dependente) e os  $X_h$  ( $h = 1, 2, \dots, k$ ) são as variáveis regressoras (covariáveis).

As técnicas de ajuste de curvas, consistem em determinar curvas que descrevam o comportamento geral dos dados colhidos experimentalmente e desenvolver a sua relação de previsão. (SOUZA NETO, 2018) Segundo (SILVA e col., 2019), para analisar a relação linear entre duas variáveis quantitativas, é possível utilizar duas técnicas: a correlação (quantifica a força da relação linear com uma medida que resume o grau de relacionamento entre duas variáveis) e a regressão (modela a forma dessa relação, tendo como resultado uma equação matemática que descreve o relacionamento entre variáveis).

É importante ressaltar que o conceito de correlação se refere a uma associação numérica (relação estatística) entre duas variáveis, não necessariamente sendo relação de causa e efeito. A análise gráfica possibilita observar a existência e tipo de relação estatística entre duas variáveis. O coeficiente de correlação linear de Pearson é uma medida do grau e do sinal da correlação linear entre duas variáveis ( $X, Y$ ) sendo expresso pela Equação (2):

$$r = \frac{Cov(X, Y)}{S_x S_y} \quad (2)$$

em que  $S_x$  e  $S_y$  representam o desvio padrão amostral das variáveis  $X$  e  $Y$

respectivamente e  $Cov(X, Y)$  é a covariância entre elas, definida pela Equação (3):

$$Cov(X, Y) = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1} \quad (3)$$

O sinal positivo deste coeficiente indica que a relação entre as variáveis é diretamente proporcional, enquanto que o sinal negativo indica relação inversamente proporcional. Após analisar o resultado do coeficiente de correlação de Pearson nas variáveis escolhidas, é interessante realizar um teste de hipóteses. A definição de hipóteses para o coeficiente de correlação linear de Pearson é:

$$H_0: p = 0 \text{ (não existe correlação linear)}$$

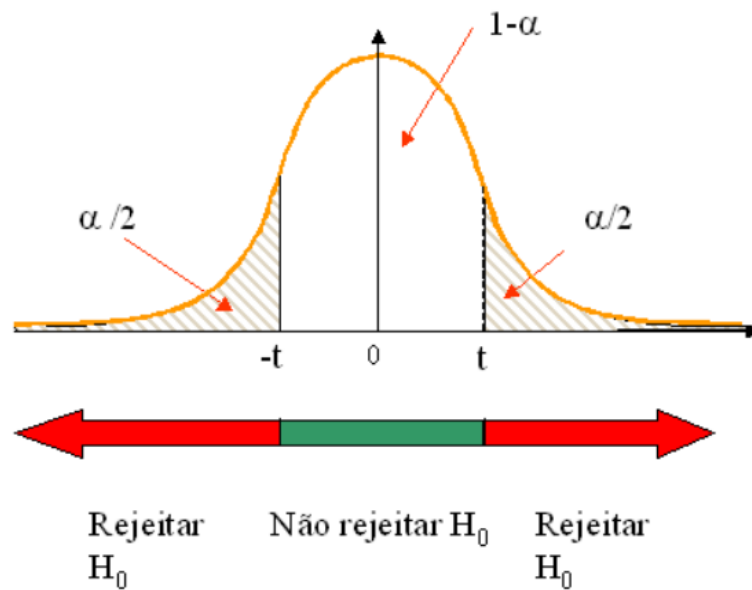
$$H_1: p \neq 0 \text{ (existe correlação linear)}$$

É necessário fixar o valor de significância de  $\alpha$  (geralmente 5%) e definir a estatística do teste e sua distribuição sob a hipótese nula através da Equação (4):

$$T = r \sqrt{\frac{n - 2}{1 - r^2}} \quad (4)$$

É necessário definir a região crítica (RC) do teste, conforme pode ser observado na Figura 4, os dados devem estar dentro do intervalo  $-t$  até  $t$ , dentro dos 95% de confiança.

Figura 4 - Região crítica para teste de hipóteses bilateral.



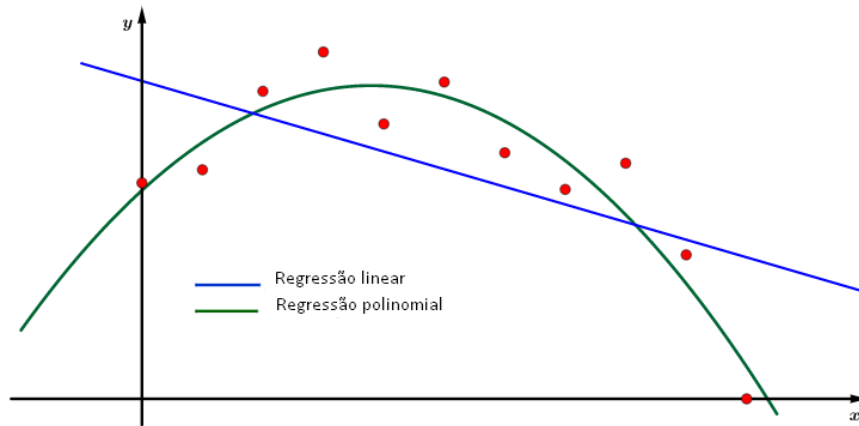
Fonte: (SILVA e col., 2019)

É necessário realizar a estatística do teste de correlação ( $T_c$ ) e verificar se  $T_c$  pertence a região crítica ( $\alpha / 2$ ), nesse caso deve-se rejeitar a hipótese nula ( $H_0$ ) para um nível de significância baixo. Caso  $T_c$  não pertença a RC, a hipótese  $H_0$  não é rejeitada.

## 2.1 Regressão linear por mínimos quadrados

A regressão linear por mínimos quadrados é um método estatístico que determina uma reta adequada aos dados em análise  $((x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n))$ . A Figura 5 mostra um mesmo conjunto de dados com modelos de regressão linear e polinomial.

Figura 5 - Gráfico de dados e modelos polinomial e linear



Fonte: Imagem retirada de (ECT-UFRN, 2022)

A reta é descrita pela equação (5):

$$y = a_0 + a_1x + e \quad (5)$$

Onde  $a_0$  é o coeficiente que representa a interseção da reta de regressão com o eixo  $y$ ;  $a_1$  é o coeficiente que representa a inclinação da reta;  $e$  é o erro ou resíduo entre a reta de regressão e os pontos dados. (SOUZA NETO, 2018) Se isolarmos o erro  $e$  na equação (5), pode-se ver na equação (6) com maior clareza que o mesmo representa a discrepância entre o valor verdadeiro do dado, que está sendo representado por  $y$ , e o valor aproximado,  $a_0 + a_1x$ , proposto pela equação linear (5):

$$e = y - a_0 - a_1x \quad (6)$$

Com o objetivo de encontrar uma reta com ótimo ajuste aos dados, é necessário minimizar o erro (valor medido e valor calculado pelo modelo), através da Equação 7. Este critério fornece uma única reta para um conjunto de dados, evitando assim várias soluções para o mesmo problema.

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i)^2 \quad (7)$$



Para determinar os valores dos coeficientes  $a_0$  e  $a_1$  que minimizem o erro na equação (7), é necessário derivar a equação em relação aos coeficientes e iguala-se a zero para obter seu valor de máximo ou de mínimo. Observa-se, no entanto, que o coeficiente angular  $a_1$  é negativo e, portanto, obtém-se o valor de mínimo. A derivada com relação a cada coeficiente é descrita através do sistema de equações (8):

$$\begin{cases} \frac{\partial S_r}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i) = 0; \\ \frac{\partial S_r}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n [(y_i - a_0 - a_1 x_i) x_i] = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \sum y_i - \sum a_0 - \sum a_1 x_i = 0 \\ \sum y_i x_i - \sum a_0 x_i - \sum a_1 x_i^2 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\sum a_0 = n a_0;$$

$$\begin{cases} n a_0 + (\sum x_i) a_1 = \sum y_i \\ (\sum x_i) a_0 + (\sum x_i^2) a_1 = \sum x_i y_i \end{cases} \quad (10)$$

Para que o sistema de equações (10) tenha uma única solução, a matriz formada a partir dos coeficientes das equações (2.6), deve ter determinante diferente de zero, ou seja:

$$\det A = \begin{vmatrix} n & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{vmatrix} \neq 0$$

Resolvendo o sistema de equações (10) para a variável  $a_1$ , tem-se:

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (11)$$

Isolando  $a_0$  na primeira Equação do sistema (10), tem-se que:

$$a_0 = \frac{\sum y_i}{n} - a_1 \frac{\sum x_i}{n} \quad (12)$$

Conclui-se que o coeficiente  $a_0$  é formado pelos valores médios de  $y_i$  e  $x_i$ .

## 2.2 Regressão polinomial

Para um polinômio de grau 2, o método da regressão polinomial, consiste em descrever a equação da curva, segundo a Equação (13):

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + e \quad (13)$$

onde  $e$  é o erro entre o ponto verdadeiro da curva e o ponto encontrado pelo polinômio de grau 2. Deve-se diminuir esse resíduo. A soma dos quadrados dos resíduos é dada pela Equação (14)

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2)^2 \quad (14)$$

Tomando a derivada da Equação (14) em relação a cada um de seus coeficientes e igualando a zero, tem-se o sistema de Equações (15):

$$\begin{cases} \frac{\partial S_r}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2) = 0; \\ \frac{\partial S_r}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2)x_i = 0; \\ \frac{\partial S_r}{\partial a_2} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i - a_2x_i^2)x_i^2 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

Essas equações podem ser reorganizadas para determinar o seguinte sistema de

equações lineares em três variáveis  $(a_0, a_1, a_2)$ , conforme as Equações do sistema (16).

$$\begin{cases} na_0 + \sum_{i=1}^n x_i a_1 + \sum_{i=1}^n a_2 x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i a_0 + \sum_{i=1}^n a_1 x_i^2 + \sum_{i=1}^n a_2 x_i^3 = \sum_{i=1}^n y_i x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 a_0 + \sum_{i=1}^n x_i^3 a_1 + x_i^4 a_2 = \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 \end{cases} \quad (16)$$

Assim, conclui-se que determinar o polinômio de grau 2 por mínimos quadrados, se resume em encontrar a solução do sistema de três equações lineares com três variáveis. O coeficiente de determinação,  $r^2$ , indica a quantidade de variabilidade dos dados que o modelo de regressão é capaz de explicar, quanto mais próximo o valor de  $r^2$  está de 1, mais adequado é o modelo de regressão. Para um ajuste ótimo, espera-se  $r^2 \geq 0,9$  isso representa que a função contém 90% dos pontos dados.

### 2.3 Método de suavização exponencial

Segundo (TEBALDI, 2019), o algoritmo Holt-Winter, também chamado de método de suavização exponencial tripla, é muito utilizado quando há a necessidade de calcular previsões em séries temporais que possuam tendência e sazonalidade. Apesar de existir há décadas, ele ainda é muito utilizado em aplicativos voltados para fins de detecção de anomalias e, especialmente, na previsão de tempo.

Esse modelo é uma extensão do modelo de Holt (suavização exponencial dupla), desenvolvido por Winter. A sua capacidade de previsão é simples, mas muito poderosa. Ele pode lidar com muitos padrões sazonais complicados, simplesmente encontrando o valor central e adicionando os efeitos de inclinação e sazonalidade. As técnicas da série temporal trabalham com dados numéricos coletados em um período de tempo. Dessa forma, esse método é usado para prever valores futuros da série, compreendendo as observações numéricas anteriores.

São necessárias apenas 3 informações para a sua aplicação: previsão para o período mais recente, valor real para esse período e o valor da constante de suavização, um fator de

ponderação que reflete o peso concedido aos valores de dados mais recentes. Um método de suavização exponencial produz uma previsão para um período futuro. Ao se utilizar a técnica de projeção de tendência, previsões futuras poderão ser geradas. Ela é considerada precisa por levar em consideração a diferença entre as projeções reais e o que realmente aconteceu.

Segundo (MIRANDA, 2014), o erro absoluto percentual médio (MAPE) expressa a porcentagem média dos erros, em valor absoluto, cometidos na previsão da série temporal. Quanto menor o valor desse erro, melhor é a previsão. O erro médio simétrico de porcentagem absoluta abreviado como SMAPE também é usado para medir a precisão com base nos erros relativos. É basicamente uma técnica de precisão de previsão, geralmente representado em porcentagem, pode ser calculado conforme a Equação (17).

$$SMAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|valor\ previsto - valor\ atual|}{(|valor\ atual| + |valor\ previsto|)/2} \quad (17)$$

Neste trabalho, as previsões nacionais e regionais tiveram o valor do SMAPE variando entre 1% e 10%.

## 2.4 Geração distribuída por centrais geradoras hidrelétricas (CGH)

De acordo com a ANEEL, as geradoras de energia elétrica de porte pequeno podem ser classificadas em Pequena Central Hidrelétrica (PCH) e Central Geradora Hidráulica (CGH). As Pequenas Centrais Hidrelétricas são usinas com reservatório de até três quilômetros quadrados e com potência instalada entre 1 e 30 MW. As Centrais Geradoras Hidráulicas, por outro lado, são usinas com potência máxima de até 1 MW. (ABRACPH, 2022)

Por serem menores, essas centrais de energia são mais baratas de construir e causam um dano ambiental menor, pois não alagam grandes áreas, preservando o habitat natural das espécies que vivem próximas a elas. Além disso, podem ser construídas em rios com menor vazão, onde esses, proporcionam para a descentralização da geração de eletricidade no país. (ABRACPH, 2022) Existem atualmente 731 unidades de CGH de energia em operação, gerando aproximadamente 851.389,42 kW. A Figura 6 mostra a distribuição das usinas CGHs no Brasil segundo a ANEEL.

Figura 6 - Distribuição das unidades de CGHs no Brasil



Fonte: Imagem retirada de (ANEELd, 2022)

Na capital Curitiba – PR, a CGH Nicolau Klüppel foi inaugurada em 04/10/2019 no Parque Barigui, sendo capaz de gerar 21.600 kwh/mês, como ilustra a Figura 7.

Figura 7 - CGH Nicolau Klüppel em Curitiba - PR



Fonte: Imagem retirada de (CURITIBA, P., 2019)

## 2.5 Geração distribuída eólica (EOL)

Segundo (GUITARRARA, 2022), a energia eólica é produzida pela força dos ventos em um processo de conversão de energia cinética, proveniente do movimento das pás, em eletricidade. É um tipo de energia renovável. Isso é possível de ser feito por meio das turbinas eólicas ou aerogeradores, que se assemelham aos moinhos de ventos e formam os parques eólicos.

A estrutura da turbina é composta por uma torre, pelo rotor e pelas pás. O vento faz com que as pás girem a uma velocidade que varia de 10 a 25 rotações por minuto (rpm), acionando assim o rotor, a peça na qual as pás estão conectadas. O movimento do rotor é multiplicado pelo conjunto de engrenagens no interior da nacela, a estrutura retangular que fica posicionada atrás das pás e na qual está conectada a torre da turbina.

No interior da nacela, fica o gerador, responsável pela conversão da energia cinética em energia elétrica. Uma vez produzida, a eletricidade é conduzida por meio dos dutos, localizados no interior da torre, para transformadores antes de ser enviada à rede. Finalmente, a rede de distribuição faz com que a energia eólica seja distribuída para os consumidores finais. (GUITARRARA, 2022) A Figura 8 mostra o Complexo Eólico Faísas localizado no município de Trairi, a 143 km de Fortaleza, com potência instalada de 136,5 MW.

Figura 8 - Complexo Eólico no nordeste do Brasil.



Fonte: (g1, 2019)

A Figura 9 mostra a localização dos parques eólicos no Brasil através da sinalização azul.

Figura 9 - Localização dos parques eólicos no Brasil, 2022



Fonte: Imagem retirada de (ANEELd, 2022).

## 2.6 Geração distribuída fotovoltaica (UFV)

Energia fotovoltaica é a energia elétrica produzida a partir de luz solar, e pode ser produzida mesmo em dias nublados ou chuvosos. Quanto maior for a radiação solar maior será a quantidade de eletricidade produzida. O termo "fotovoltaica" vem do grego (Phos), que significa "luz", e "volt", a unidade de força eletromotriz, que por sua vez vem do sobrenome do físico italiano Alessandro Volta, inventor da pilha. O termo "fotovoltaica" tem sido usado em Inglês desde 1849. A placa de energia solar é o equipamento utilizado para captar a energia do sol e iniciar o processo de transformação em energia elétrica. (PORTAL SOLAR, 2022)

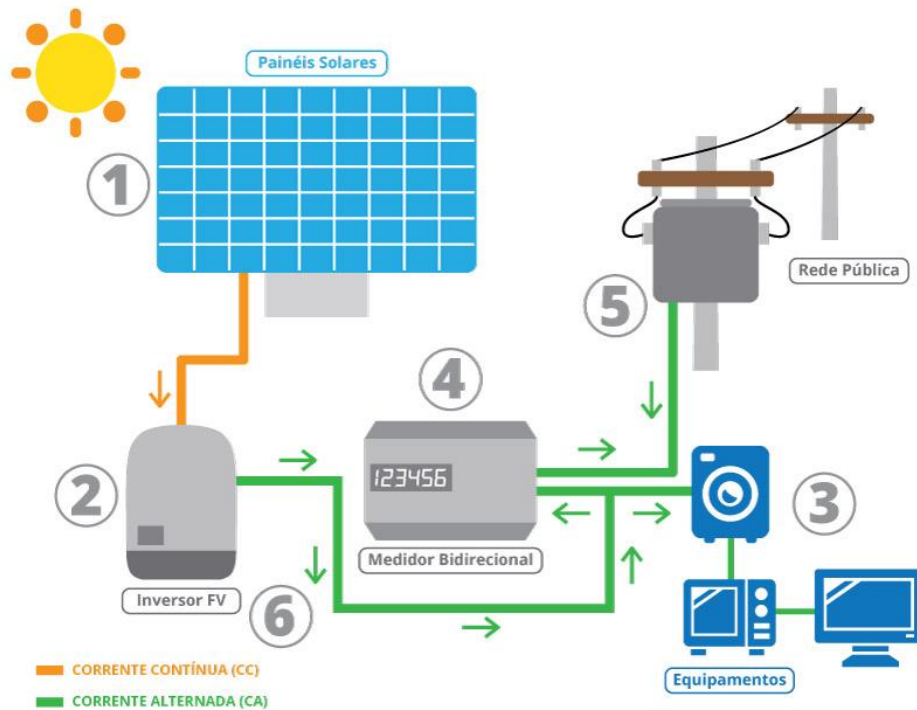
O processo da energia solar para produção de energia, chamado de efeito fotovoltaico, utiliza placas solares produzidas em material semicondutor para, quando as partículas de luz solar (fótons) incidirem, os elétrons do material semicondutor entrarem em movimento, gerando eletricidade.

A energia solar é gerada pelas placas solares e levada ao inversor solar, equipamento responsável por transformar a corrente elétrica contínua em alternada e, então, ser distribuída

para o local de consumo e utilizada pelos equipamentos. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica já são utilizados há mais de 30 anos. (PORTAL SOLAR, 2022)

A Figura 10 mostra o esquemático de um sistema fotovoltaico residencial.

Figura 10 - Sistema fotovoltaico residencial



Fonte: Imagem retirada de (SOLARIX, 2020)

A Figura 11 mostra a localização das usinas fotovoltaicas no Brasil através da sinalização em amarelo.



Figura 11 - Localização das usinas fotovoltaicas no Brasil, 2022



Fonte: Imagem retirada de (ANEELd, 2022).

## 2.7 Geração distribuída termelétrica (UTE)

Segundo (GUITARRARA, 2022), a energia termoelétrica é gerada por meio da obtenção de calor de uma determinada fonte, através da conversão de energia térmica em energia elétrica. Esse processo acontece dentro das usinas termoelétricas e tem início com a queima de um determinado material, como combustíveis fósseis ou biomassa, para a obtenção de calor.

A fonte de calor e a água são os dois elementos principais para a geração de energia termoelétrica. Inicia-se com a queima do combustível para geração de calor. Esse calor causa o aquecimento de uma caldeira com água líquida, que gradativamente é convertida em vapor. O vapor advindo do aquecimento da água aciona turbinas que movimentam os geradores que fazem a conversão da energia cinética em energia elétrica. Então a energia elétrica é direcionada para as torres de transmissão, a partir das quais é distribuída até chegar no seu consumidor final.

Após a conversão, o vapor d'água é direcionado para um condensador, dispositivo onde a água retorna para o estado líquido e, mediante o auxílio de uma bomba, é conduzida

novamente à caldeira. É muito viável em áreas onde há escassez de outras fontes, além da flexibilidade quanto à localização das usinas. Apesar disso, o processo de geração de energia emite gases poluentes na atmosfera, além de seu custo ainda ser bastante elevado. As usinas termelétricas são acionadas em momentos de crise hídrica, que ocasionam a redução no nível dos reservatórios de água que abastecem as usinas hidrelétricas, para complementar a geração de energia e, assim, suprir a demanda do território nacional. A Figura 12 mostra a usina termelétrica de Igarapé, localizada na cidade de Juatuba – MG.

Figura 12 - Usina termelétrica de Igarapé, MG



Fonte: Imagem retirada de (Jornal Estado de Minas, 2021).

A Figura 13 mostra a localização das usinas termelétricas no Brasil.

Figura 13 - Localização das usinas termelétricas no Brasil, 2022



Fonte: imagem retirada de (ANEELd, 2022).

### 3 METODOLOGIA

Os dados mensais coletados em (ANEEL, 2022) para análise se referem ao período de 01/01/2015 até 20/03/2022. Dispostos em uma tabela utilizando o software Microsoft Excel com as seguintes informações por tipo de geração (CGH – Centrais geradoras hidrelétricas, Eólica – EOL, Fotovoltaica – UFV e Termelétrica – UTE):

1. Período;
2. Quantidade de unidades geradoras;
3. Potência instalada (MW);
4. Modalidade de geração;
5. Classe de consumo.

A coleta de dados da geração nacional abrangeu as cinco regiões Centro oeste, Norte, Nordeste, Sudeste e Sul. Além das quatro formas de geração distribuídas selecionadas prioritariamente neste trabalho (CGH, EOL, UFV e UTE), foram incluídas indiretamente as seguintes formas de geração menos significativas:

- a. Biomassa (agroindustriais, floresta, resíduos sólidos urbanos, biocombustíveis líquidos);
- b. Fóssil (carvão mineral, gás natural, petróleo, e outros fósseis);
- c. Undi-elétrica (cinética da água).

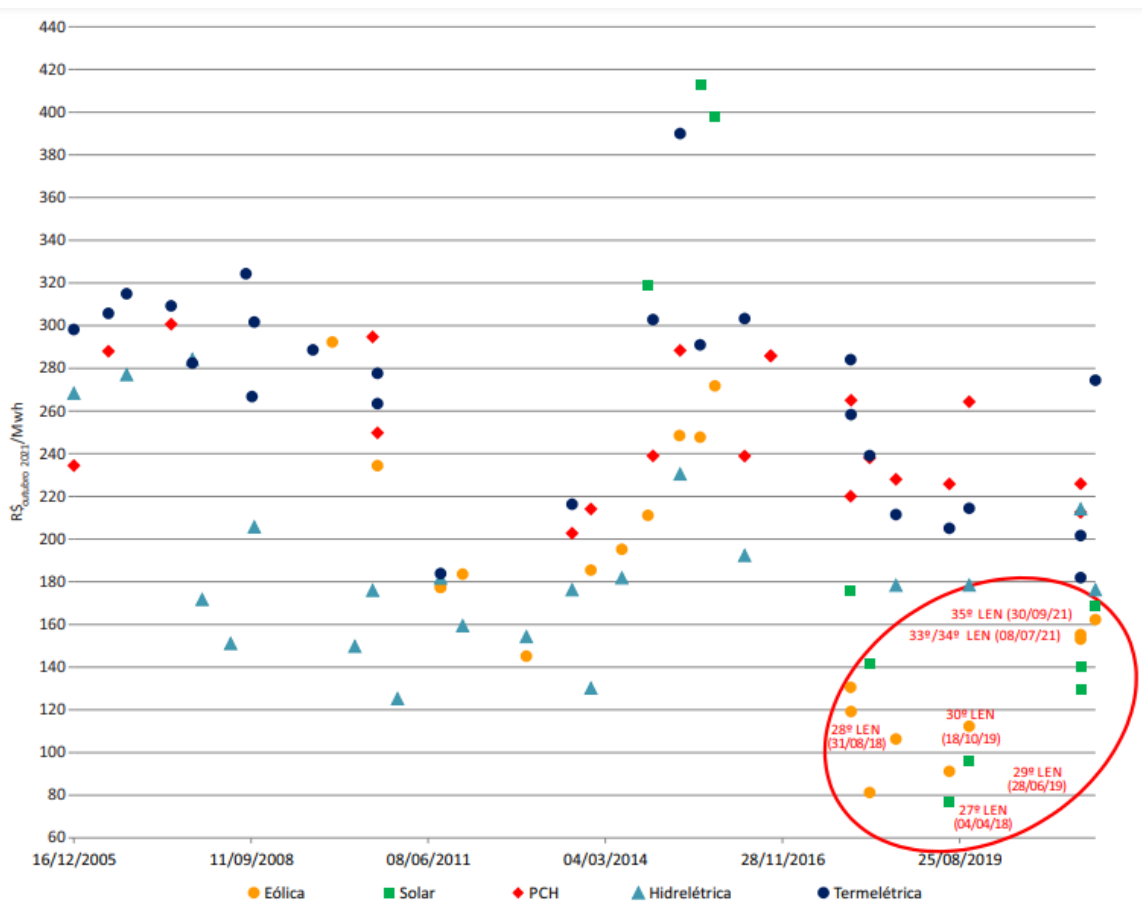
Finalizada a coleta, os dados foram organizados no software Microsoft Excel e agrupados em seis tabelas a saber: Nacional, Centro Oeste, Nordeste, Norte, Sudeste e Sul. O software RStudio, gratuito para utilização e download, e o software Microsoft Excel foram utilizados para análise dos dados.

Para a análise dos modelos de geração foi utilizada a técnica de regressão múltipla polinomial, e para a análise de previsão de potência instalada foi utilizado o método de suavização exponencial tripla.

#### 4 ANÁLISE DOS DADOS HISTÓRICOS DE GD DO BRASIL

Os dados coletados quando analisados podem transmitir informações precisas e relevantes, principalmente quando são realizadas técnicas de regressão e análise afim de projetar o comportamento futuro das variáveis em estudo. Portanto, para melhor definição das curvas de crescimento, os dados de geração distribuída foram cuidadosamente separados por região, e tipo de geração. A Figura 14 mostra um estudo do Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE) de outubro de 2021 com o posicionamento da geração distribuída nos leilões de energia elétrica realizados pelo Governo Federal. É possível visualizar que os menores valores de reais em outubro de 2021 em mega watt por hora ( $R\$_{outubro\ 2021}/MWh$ ) foram da geração solar, eólica, hidrelétrica, termelétrica e PCH respectivamente.

Figura 14 - Valores de preços médios dos leilões por fonte, em R\$/MWh, atualizados pelo ETENE, 2021



Fonte: ETENE, 2021.

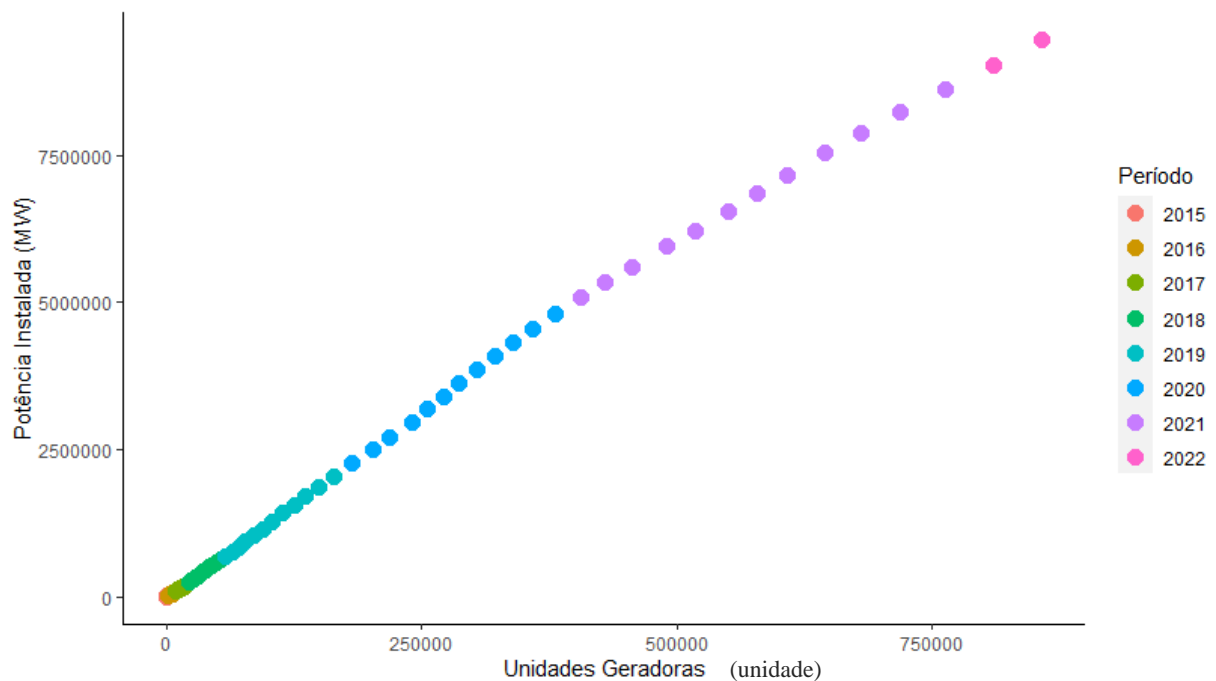
#### 4.1 Nacional

Inicialmente, os dados foram guardados e organizados através do software Microsoft Excel. Então, os dados nacionais estavam dispostos em duas colunas: quantidade de unidades geradoras e potência instalada. Foi calculado o coeficiente de correlação linear de Pearson para mensurar o grau da correlação linear entre as duas variáveis analisadas.

O coeficiente de correlação linear de Pearson (p-valor) calculado para a amostra foi menor que  $2.2e^{-16}$ . Nessa condição, o sinal positivo desse coeficiente indica que a relação entre as variáveis é diretamente proporcional e sendo diferente de zero tem-se a correlação entre as variáveis em análise.

A análise nacional leva em consideração todas as regiões do Brasil. Foi plotado um gráfico dos dados nacionais de crescimento por ano, de 2015 a 2022.

Gráfico 1 - Dados nacionais de crescimento de geração distribuída no Brasil, 2015 a 2022

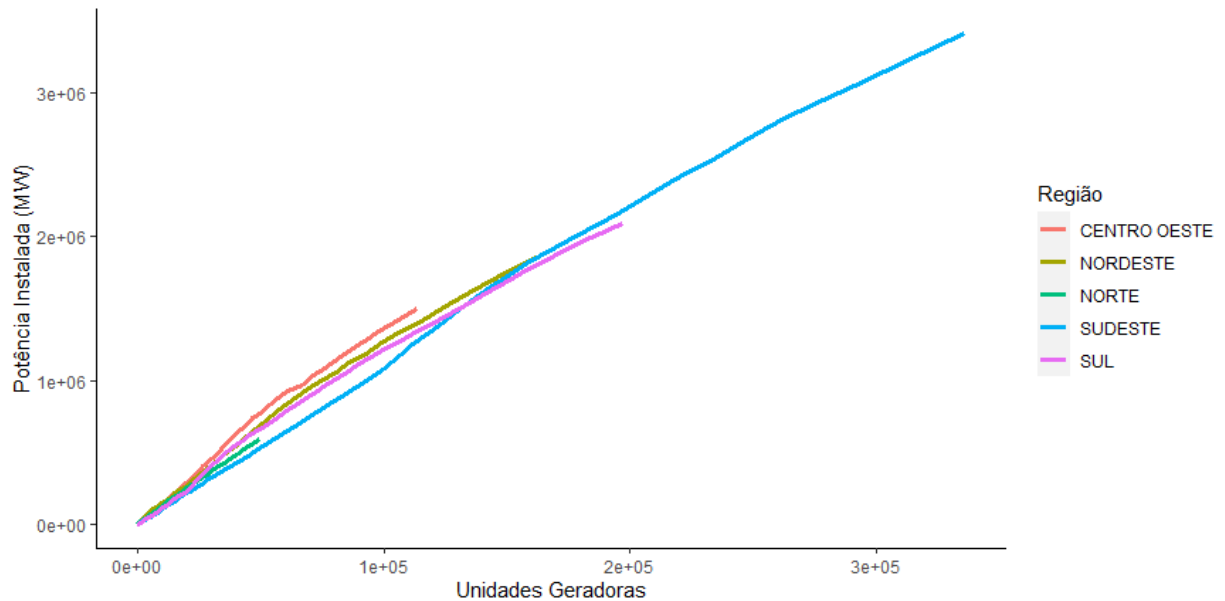


Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Observa-se que o crescimento foi bem distribuído e forma um canal com tendência crescente. Para observar melhor esse crescimento, um gráfico dimensionando as regiões foi plotado no software R Studio para quantificar o quanto cada região influencia no âmbito nacional. Observar o crescimento regional é importante pois assim é possível verificar qual

região cresceu mais, qual região possui maiores índices de geração distribuída, entre outros aspectos.

Gráfico 2 - Crescimento da geração distribuída fotovoltaica das regiões brasileiras de 2015 a 2022

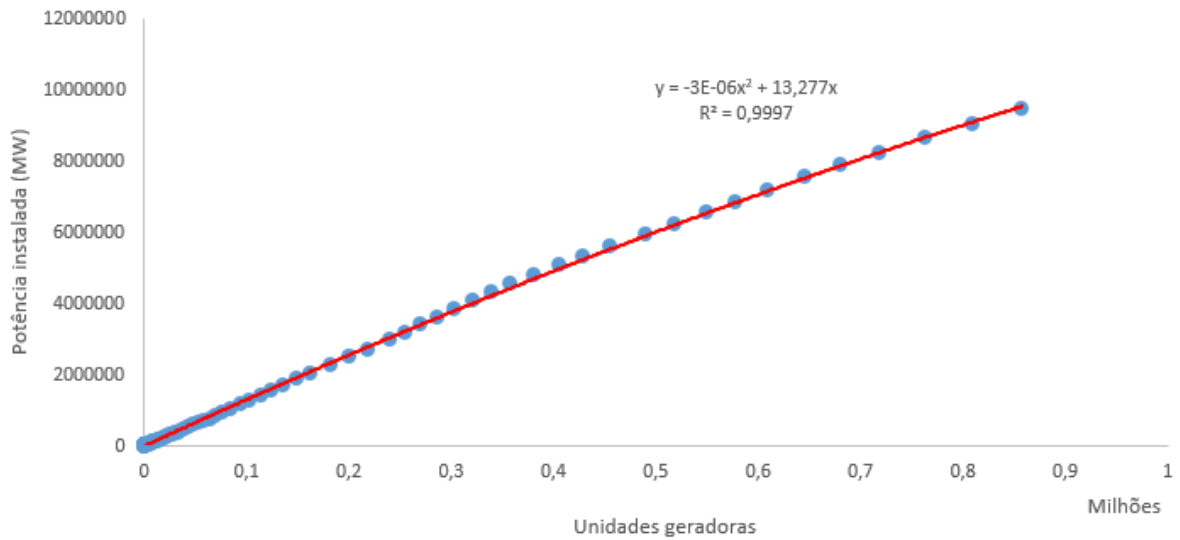


Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Segundo o gráfico 2, a região em que a geração distribuída fotovoltaica mais cresceu entre 2015 e 2022 foi a região sudeste, seguida pelas regiões sul, nordeste, centro oeste e norte. Sobre a região norte, aproximadamente 80% de toda a região é floresta Amazônica, além disso a usina hidrelétrica Belo Monte no estado do Pará abastece a região. Outro detalhe importante é que a geração eólica representa hoje 11,90% da geração total do país (aproximadamente 20 GW) na região nordeste.

Através da quantidade de unidades geradoras e da potência instalada, foi possível plotar um gráfico, denotando o período em anos no eixo secundário, dos dados de crescimento nacional de 2015 a 2022. É possível observar que o crescimento se deu em meados de 2015 de forma relevante no país. Os dados são uniformes e bem distribuídos ao longo da curva. O gráfico do modelo polinomial dos dados nacionais, a equação polinomial e ajuste do modelo  $R^2$  podem ser observados.

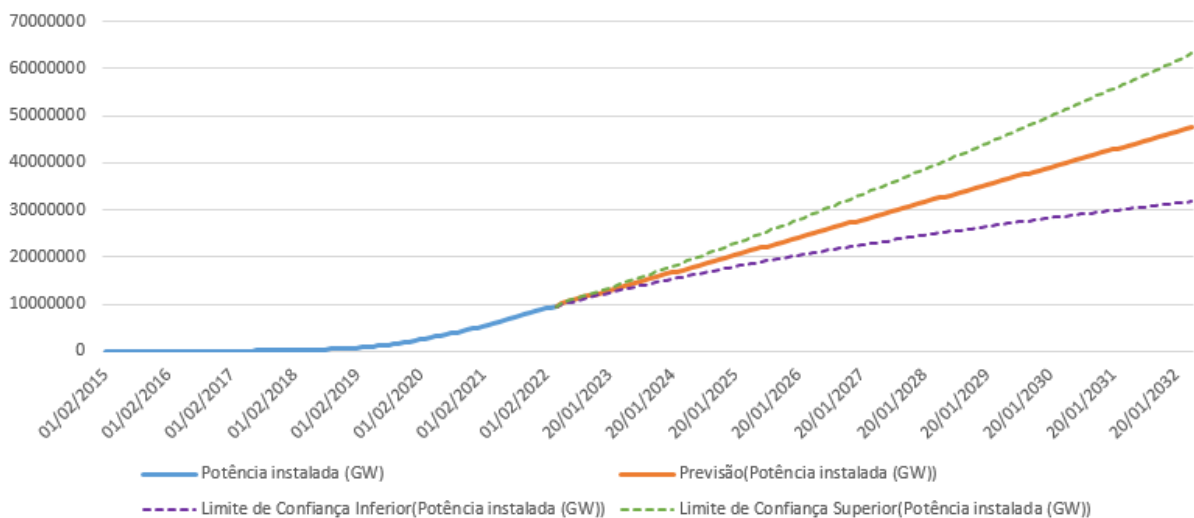
Gráfico 3 - Modelo da geração distribuída no Brasil de 2015 a 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Observando o modelo polinomial de grau 2, obteve-se um ajuste  $R^2$  de 0,9997 o que significa que o modelo de regressão é muito adequado, com uma precisão superior a 99%. Há um detalhe interessante nesse modelo: a curva toca todos os pontos, concluindo-se que todos os dados estão dentro do intervalo de confiança. Foi realizada uma previsão para o ano de 2032.

Gráfico 4 - Previsão da geração distribuída nacional para 2032

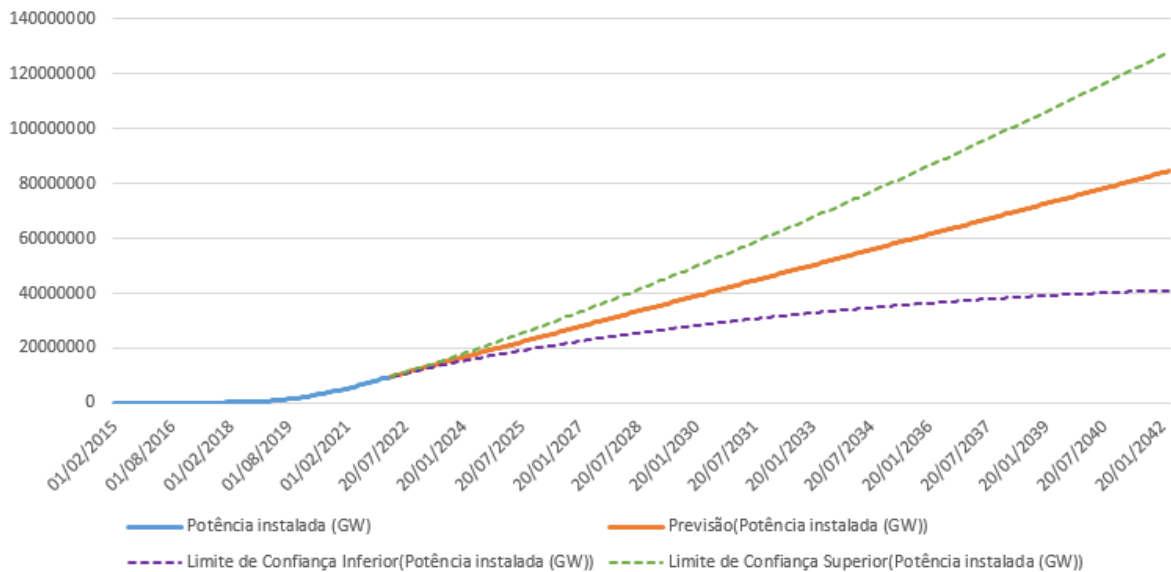


Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.



Segundo a previsão, em 2032 a geração distribuída nacional alcançará a marca de 50 GW de capacidade instalada sendo um crescimento relevante a ser considerado, principalmente para a rede de distribuição. Foi realizada outra previsão para o ano de 2042.

Gráfico 5 - Previsão da geração distribuída nacional para 2042



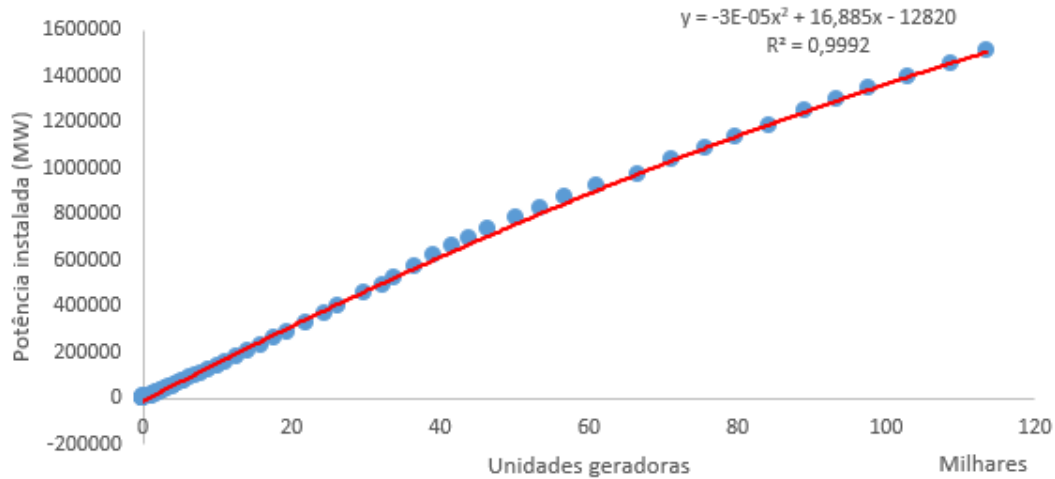
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Segundo a previsão, até o ano de 2042 a geração distribuída nacional alcançará a marca de 80 GW, o que significa alcançar 72,7% da geração hidrelétrica atual.

## 4.2 Centro oeste

A região centro oeste é composta pelos estados Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, e o Distrito Federal. A geração distribuída nessa região teve crescimento aproximadamente parabólico. Isso pode ser observado no gráfico 8, pois o modelo polinomial teve ótimo ajuste superior a 99%, sendo um bom modelo.

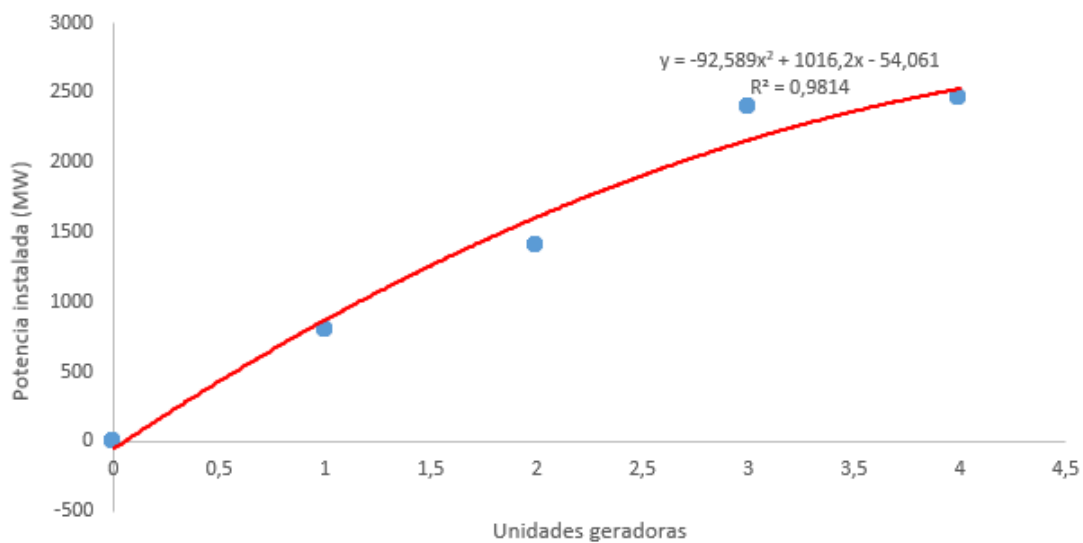
Gráfico 6 - Crescimento da geração distribuída no centro oeste, 2015 a 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

A geração distribuída na região centro oeste foi separada por tipo de geração: fotovoltaica, termelétrica e centrais geradoras hidrelétricas. Há uma consideração importante, na região centro oeste não há, de acordo com dados da ANEEL utilizados nesse trabalho, geração eólica. O gráfico 7 mostra o crescimento de geração distribuída tipo CGH para a região centro oeste.

Gráfico 7 - Modelos linear e polinomial da geração CGH na região Centro oeste

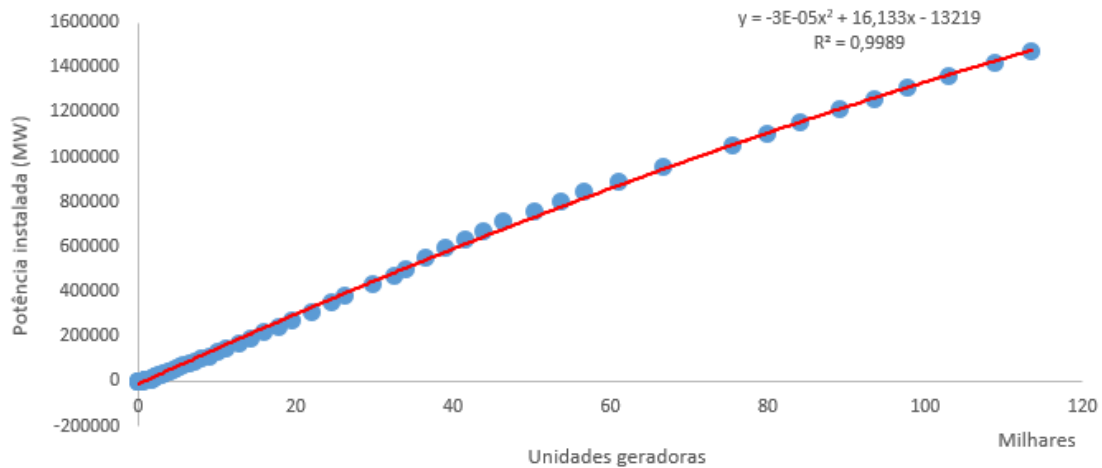


Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Observando o gráfico de geração do tipo CGH da região centro oeste, a geração do

tipo CGH é pouco relevante levando em consideração a potência instalada fotovoltaica. É possível observar o crescimento da geração UFV para a região centro oeste no gráfico 8.

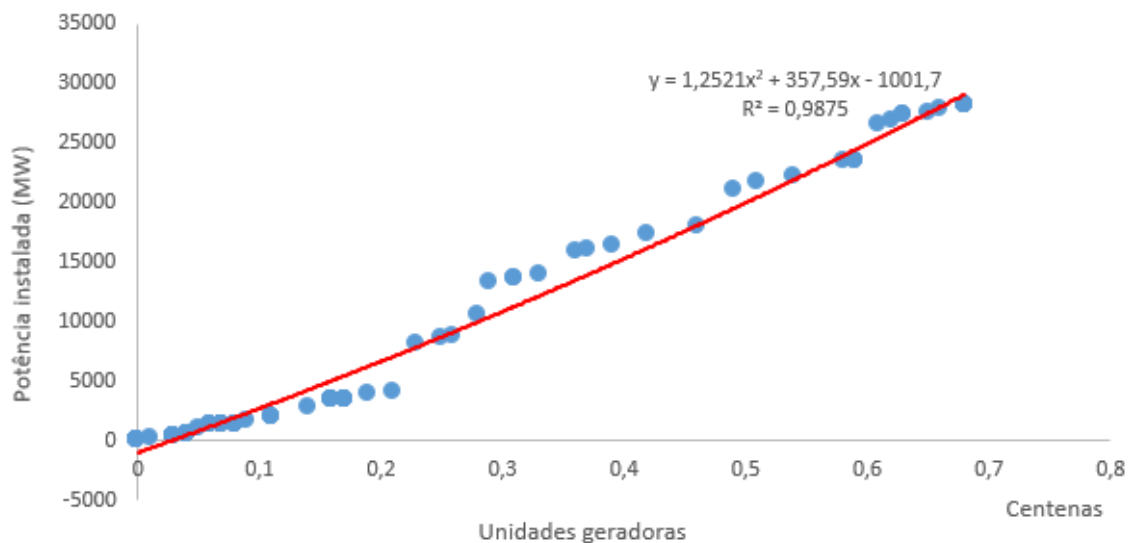
Gráfico 8 - Modelos linear e polinomial da geração UFV na região Centro oeste



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Observando os modelos linear e polinomial da geração UFV, o modelo polinomial foi adequado a curva de distribuição dos dados. Os dados de crescimento de geração distribuída termelétrica para a região centro oeste foram dispostos no gráfico 9.

Gráfico 9 - Modelos linear e polinomial da geração UTE na região Centro oeste



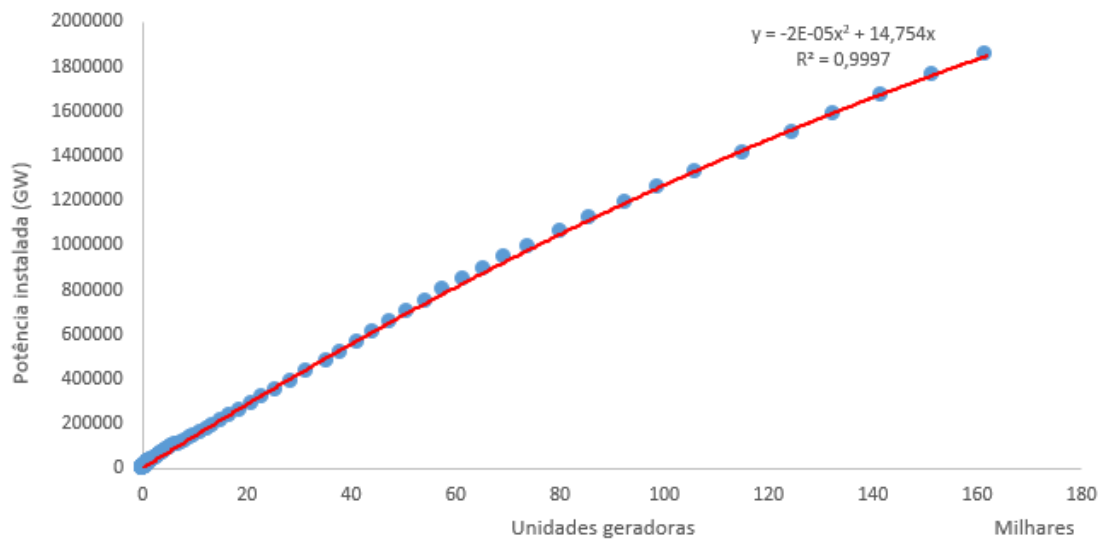
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

A curva de crescimento da geração UTE teve um ajuste maior que 98%, sendo um bom modelo para os dados.

### 4.3 Nordeste

A região nordeste é composta pelos estados Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe. É nessa região que está concentrado os maiores parques eólicos do Brasil. O modelo polinomial pode ser observado no gráfico 10.

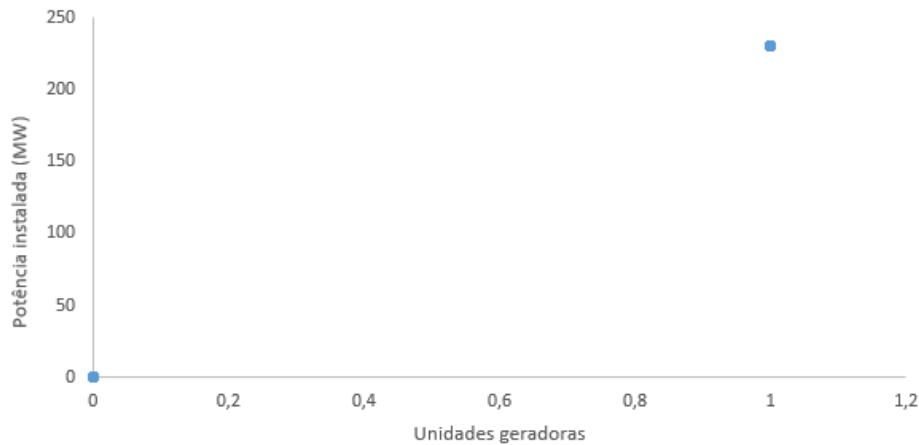
Gráfico 10 - Crescimento da geração distribuída na região nordeste entre 2015 e 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

O crescimento da geração distribuída na região nordeste foi bem ajustado pelo modelo, tendo um valor de  $R^2$  maior que 99%. Os dados de geração CGH se encontram no gráfico 11.

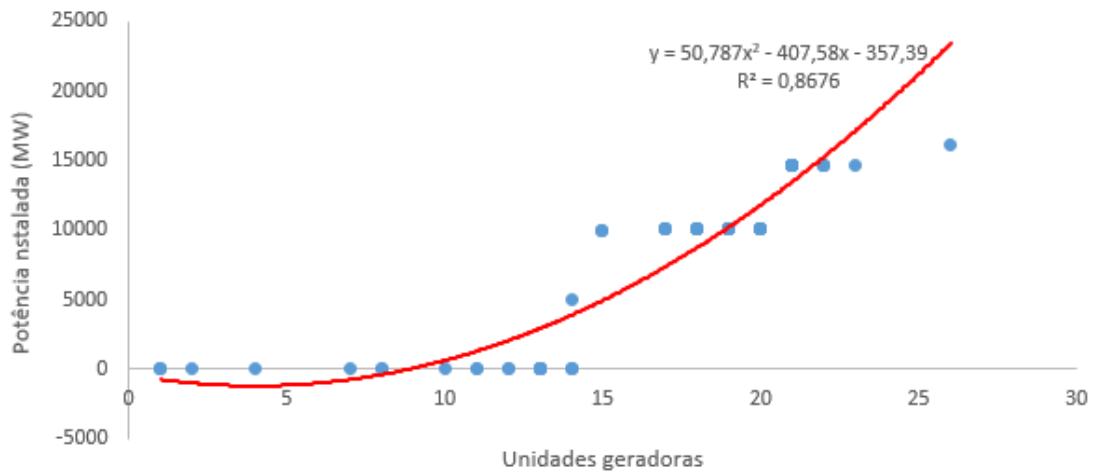
Gráfico 11 - Crescimento da geração distribuída CGH na região nordeste entre 2015 e 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Os dados de geração distribuída CGH não tiveram crescimento considerável e por isso, não foi possível desenvolver um modelo adequado. Os dados de crescimento de geração distribuída do tipo EOL da região nordeste pode ser observado no gráfico 12.

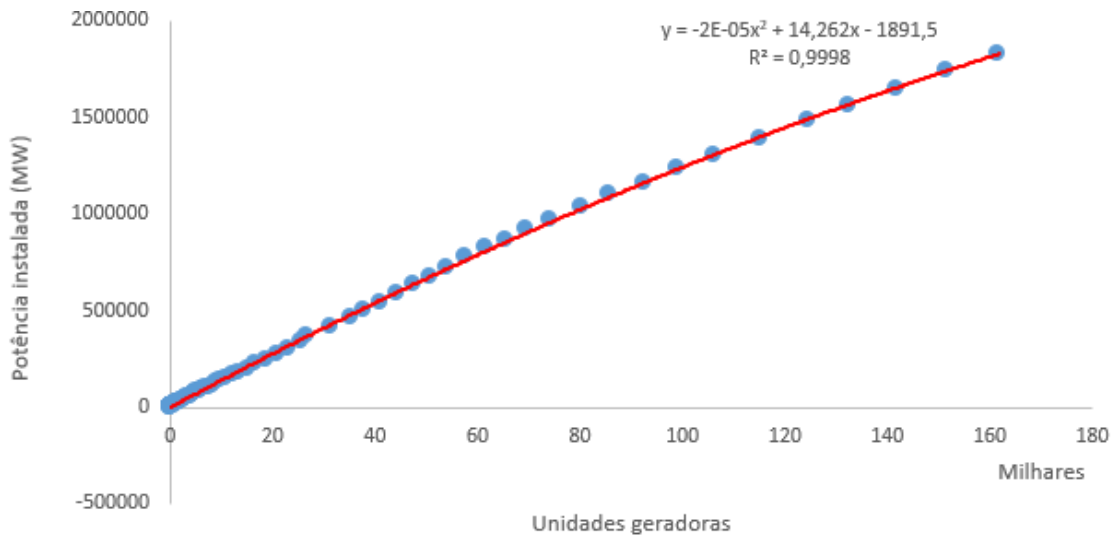
Gráfico 12 - Crescimento da geração distribuída EOL na região nordeste entre 2015 e 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

O modelo dos dados de crescimento da geração eólica de energia para a região nordeste teve um ajuste de 86%, tendo alcançado a marca de 18 GW de potência instalada. Os dados de geração do tipo UFV da região nordeste foram dispostos no gráfico 13.

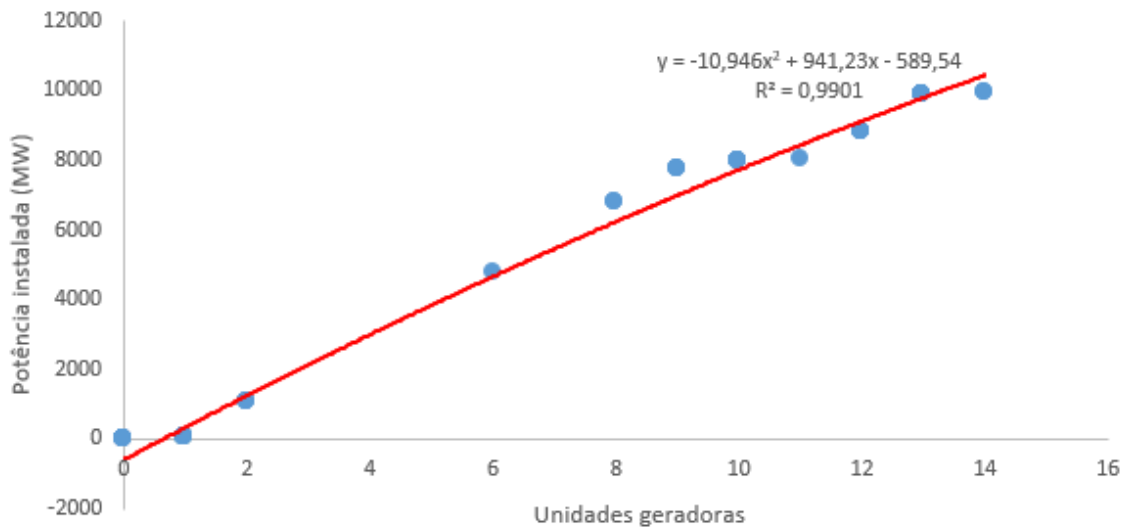
Gráfico 13 - Crescimento da geração distribuída UFV na região nordeste entre 2015 e 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

O modelo da geração UFV para a região nordeste foi bem ajustado aos dados, tendo um ajuste de 99%. O modelo de crescimento da geração do tipo UTE para a região nordeste pode ser observado no gráfico 14.

Gráfico 14 - Crescimento da geração distribuída UTE na região nordeste entre 2015 e 2022



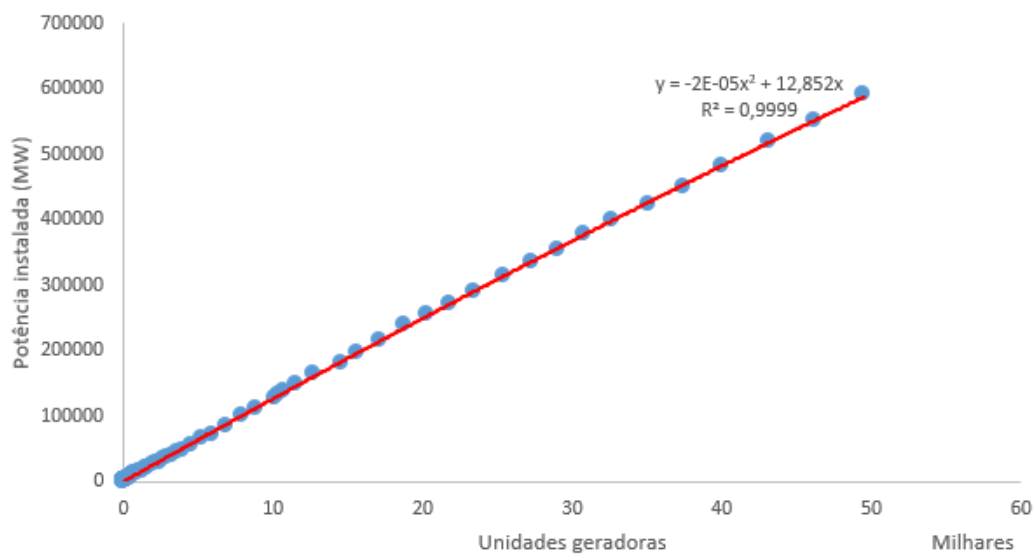
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Observando o modelo da geração tipo UTE, o ajuste foi de 99%, sendo um bom modelo para os dados.

#### 4.4 Norte

A região norte do Brasil é composta pelos estados Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins. Predominantemente coberta pela floresta Amazônica, é a maior região do país em extensão territorial. O crescimento da geração distribuída, segundo os dados disponibilizados pela ANEEL utilizados nesse trabalho, foi o menor dentre todas as regiões, isso se deve a presença de grandes usinas hidrelétricas, e a área florestal. O crescimento da geração distribuída pode ser observado no gráfico 15.

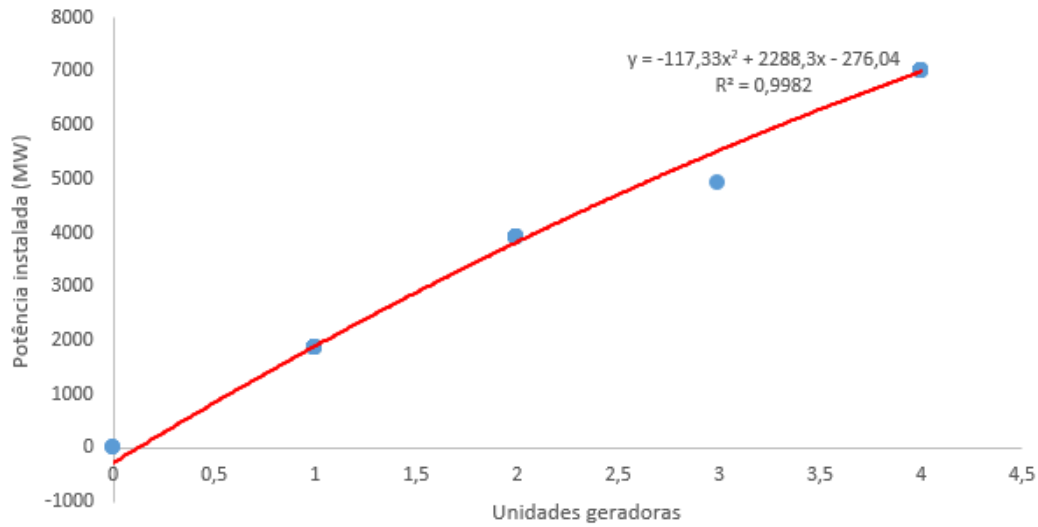
Gráfico 15 - Crescimento da geração distribuída na região norte entre 2015 e 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

A geração distribuída na região norte tem tendência crescente, e o modelo teve ajuste de 99%, consolidando um bom modelo para os dados. A distribuição de dados de crescimento CGH da região norte pode ser observado 16.

Gráfico 16 - Crescimento da geração distribuída CGH na região norte entre 2015 e 2022

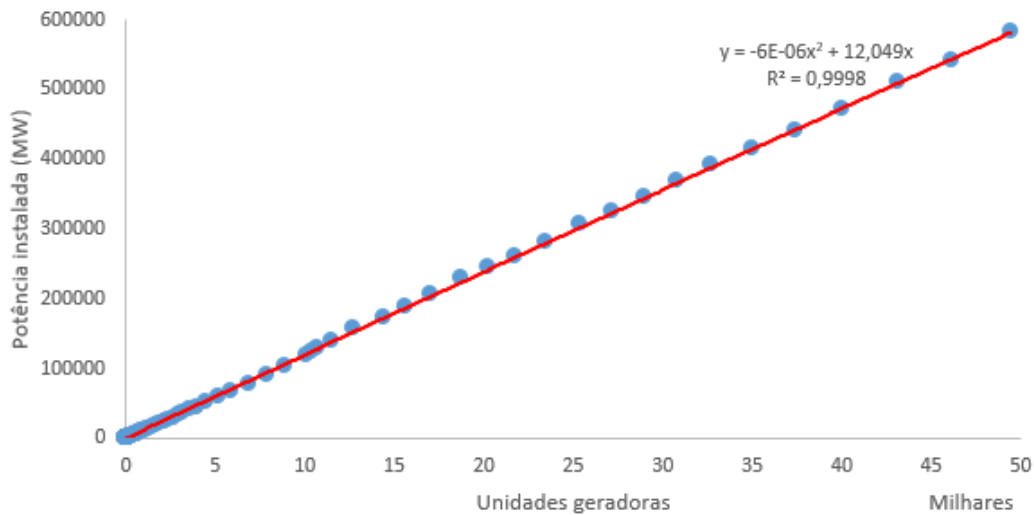


Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

O crescimento da geração distribuída do tipo CGH foi baixo considerando-se a potência instalada, o modelo teve ótimo ajuste de 99%.

Os dados de crescimento de geração UFV pode ser observado no gráfico 17.

Gráfico 17 - Crescimento da geração distribuída UFV na região norte entre 2015 e 2022

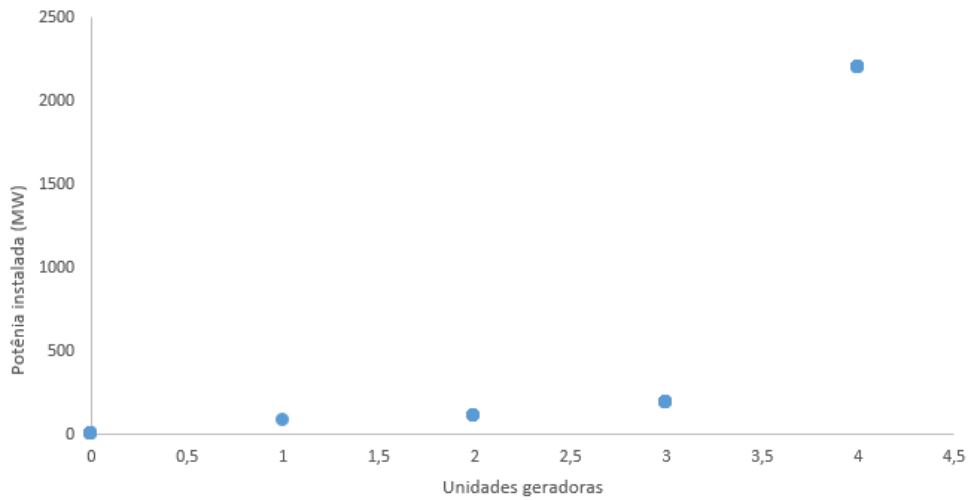


Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Os dados de geração distribuída do tipo UFV da região norte são bem distribuídos, e obteve um ótimo ajuste de 99%. A distribuição de dados de crescimento UTE da região norte pode ser observado no gráfico 18.

Gráfico 18 - Crescimento da geração distribuída UTE na região norte entre 2015 e 2022





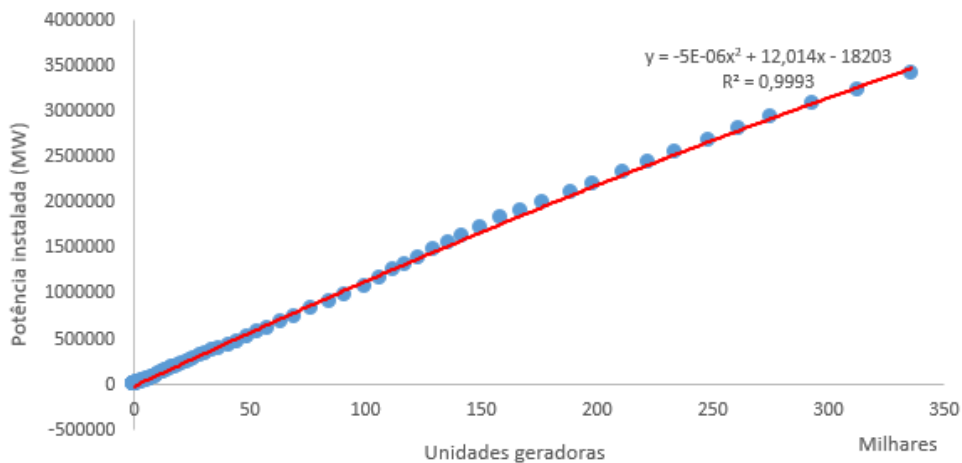
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

O crescimento da geração distribuída do tipo UTE na região norte foi irrelevante e os dados não indicaram o desenvolvimento de um bom modelo.

#### 4.5 Sudeste

A região sudeste é formada pelos estados Espírito Santo, Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro. O crescimento da geração UFV foi o maior do país. O gráfico de crescimento de GD da região sudeste pode ser observado no gráfico 19.

Gráfico 19 - Crescimento da geração distribuída na região sudeste entre 2015 e 2022

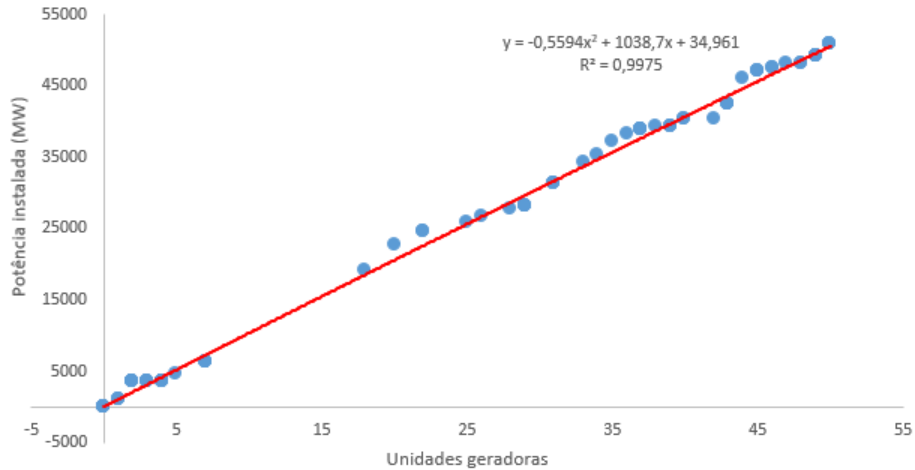


Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Os dados de geração distribuída na região sudeste formaram um canal de tendência crescente, desenvolvendo um ótimo modelo com ajuste de 99%. A geração CGH pode ser

observada no gráfico 20.

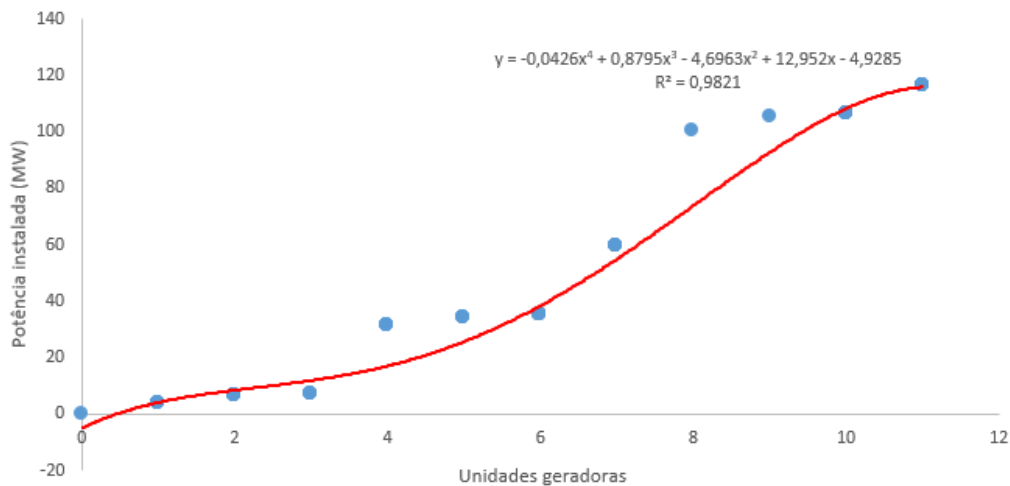
Gráfico 20 - Crescimento da geração distribuída CGH na região sudeste entre 2015 e 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Observa-se que o modelo da geração CGH é adequado, com um valor de ajuste de 99%. A geração distribuída do tipo EOL na região sudeste pode ser observada no gráfico 21.

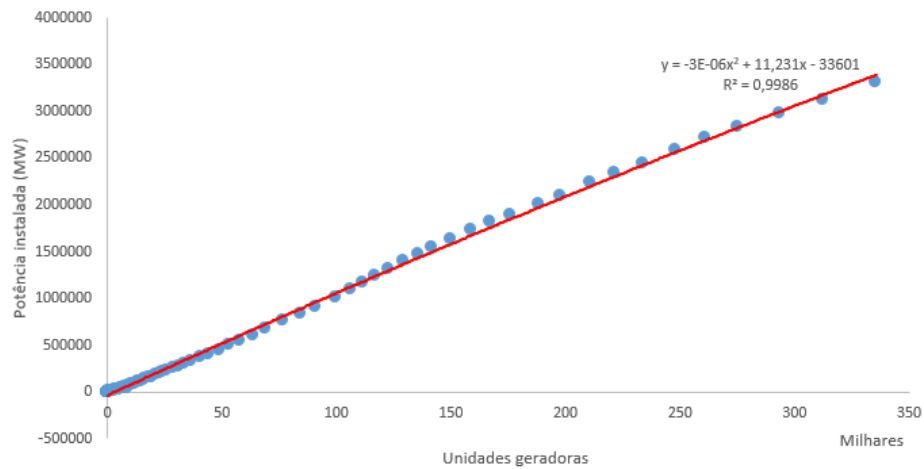
Gráfico 21 - Crescimento da geração distribuída EOL na região sudeste entre 2015 e 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

O crescimento foi melhor caracterizado pelo modelo polinomial de grau 4, obtendo-se um ajuste de 98%. O crescimento do tipo de geração UFV da região sudeste pode ser observado no gráfico 22.

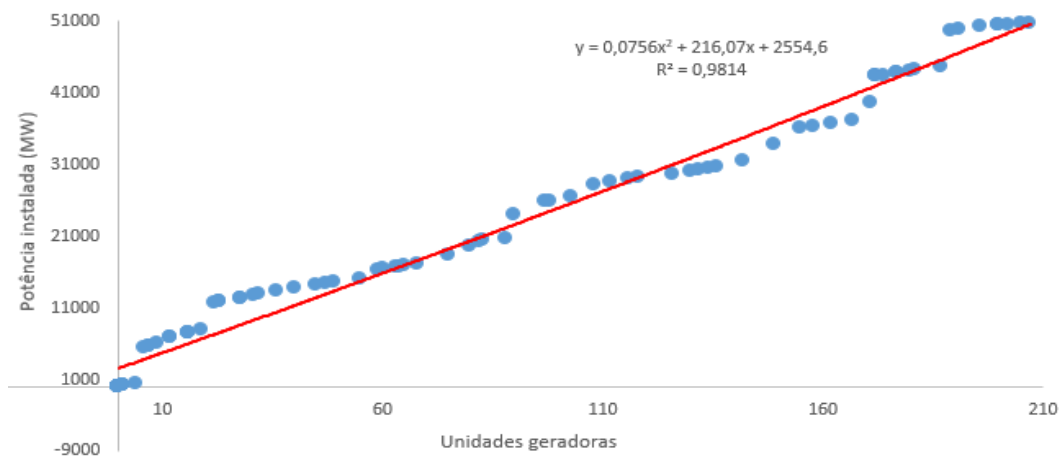
Gráfico 22 - Crescimento da geração distribuída UFV na região sudeste entre 2015 e 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

A região Sudeste na modalidade de geração UFV superou a geração EOL no Nordeste no critério de potência instalada. Foi o maior crescimento de todas as modalidades e de todas as regiões. O modelo de dados foi muito adequado, tendo um ajuste superior a 99%. O crescimento do tipo de geração UTE da região sudeste pode ser observado no gráfico 23.

Gráfico 23 - Crescimento da geração distribuída UTE na região sudeste entre 2015 e 2022



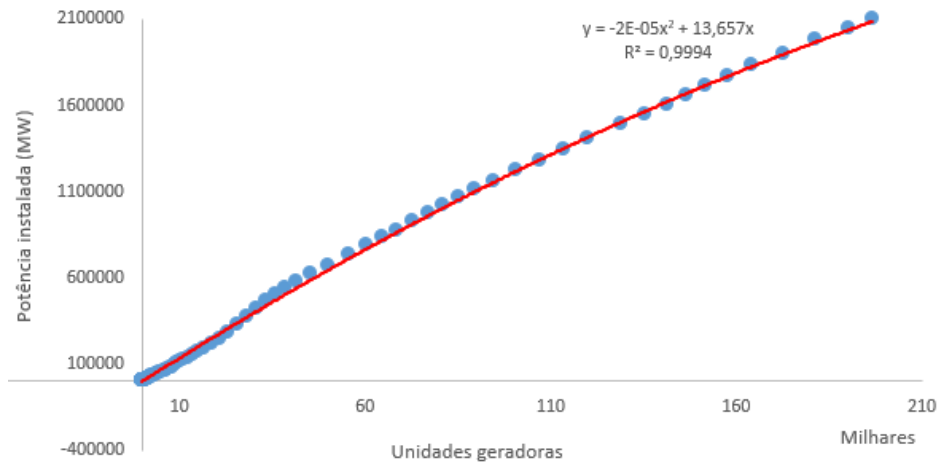
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

O modelo da geração distribuída UTE na região sudeste foi adequado, tendo um ajuste de 98%.

#### 4.6 Sul

A região sul é composta pelos estados Paraná, Santa Catarina, e Rio Grande do Sul. Os dados de crescimento da região sul podem ser observados no gráfico 24.

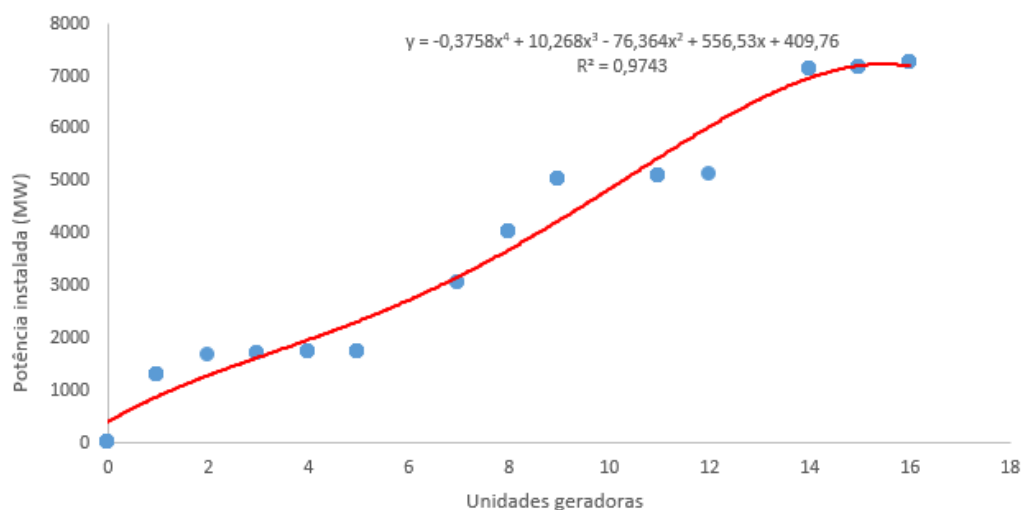
Gráfico 24 - Crescimento da geração distribuída na região sul entre 2015 e 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Observa-se que os dados tiveram crescimento ordenado, e o modelo teve um ótimo ajuste de 99% aos dados. Os dados de crescimento de geração distribuída do tipo CGH da região sul pode ser observado no gráfico 25.

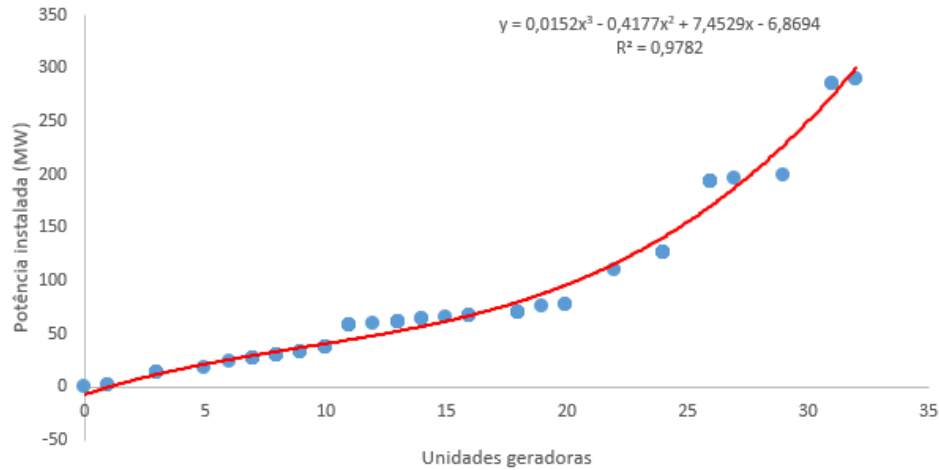
Gráfico 25 - Crescimento da geração distribuída CGH na região sul entre 2015 e 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Observa-se que o modelo foi adequado, obteve-se um ótimo ajuste de 97%. Os dados de crescimento do tipo de geração EOL pode ser observado no gráfico 26.

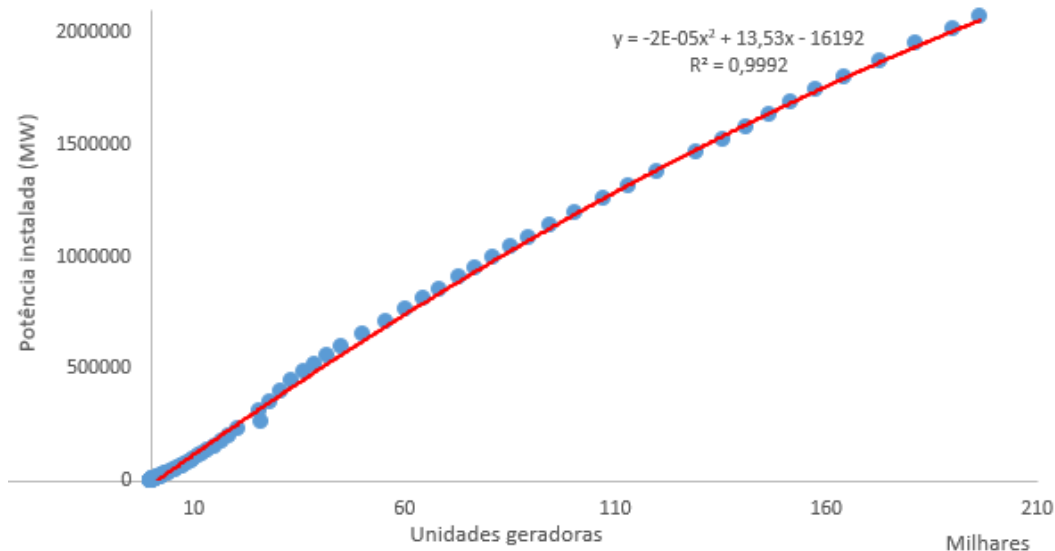
Gráfico 26 - Crescimento da geração distribuída EOL na região sul entre 2015 e 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Observa-se que a distribuição de dados obteve um ajuste de 97% com o modelo polinomial de grau 3. Os dados de crescimento do tipo de geração UFV da região sul pode ser observado no gráfico 27.

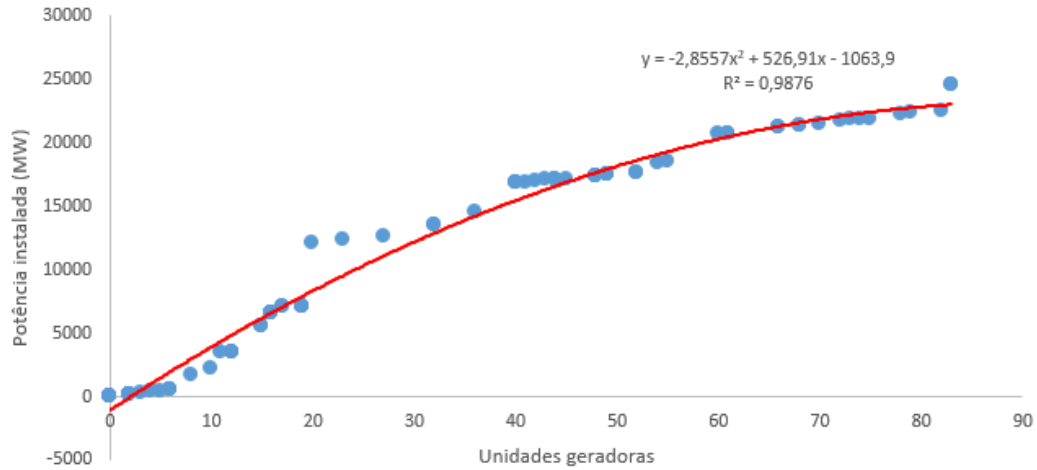
Gráfico 27 - Crescimento da geração distribuída UFV na região sul entre 2015 e 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

O modelo de crescimento de dados de geração distribuída do tipo UFV para a região sul foi adequado, tendo boa distribuição e obtendo um ajuste de 99%. Os dados do crescimento de geração distribuída na modalidade UTE pode ser observado no gráfico 28.

Gráfico 28 - Crescimento da geração distribuída UTE na região sul entre 2015 e 2022



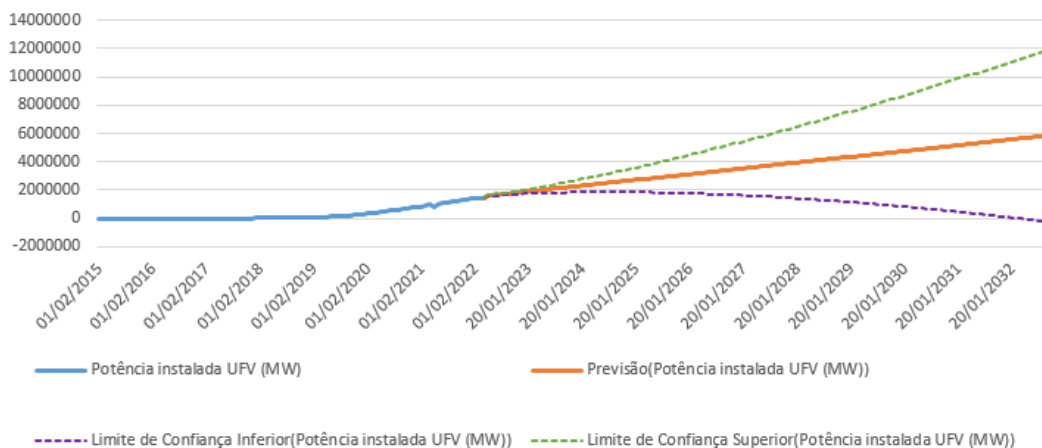
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

O crescimento de geração distribuída do tipo UTE na região sul obteve um ajuste de 98%, sendo um bom modelo.

#### 4.7 Previsão regional da geração distribuída UFV

É evidente o crescente aumento na geração distribuída UFV em todo o país, principalmente na região sudeste onde o crescimento foi o maior dentre todas as regiões brasileiras. Nesse sentido, é interessante realizar um estudo para estimar o crescimento regional futuro da capacidade instalada. A previsão para os próximos 20 anos foi realizada para a região centro oeste, conforme pode ser observado no gráfico 29.

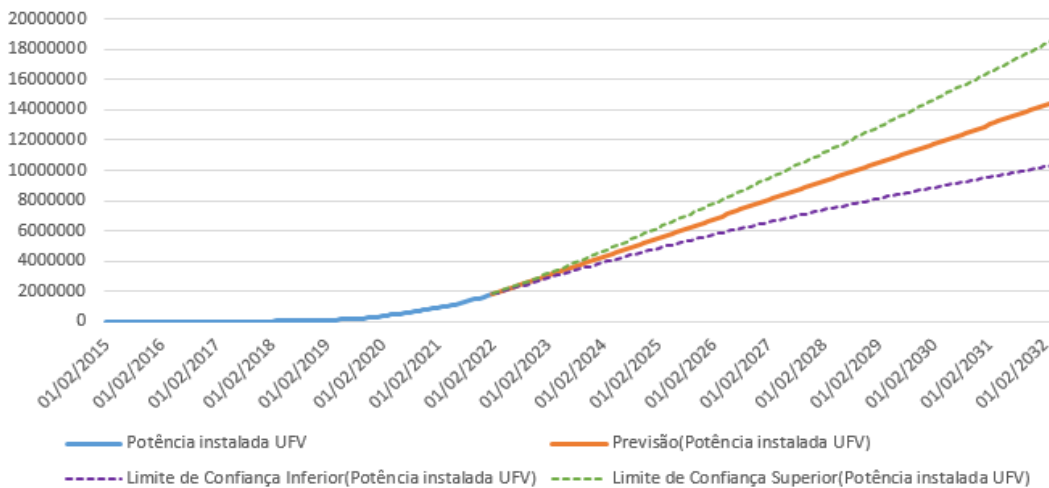
Gráfico 29 - Previsão do crescimento de geração UFV na região centro oeste



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Segundo a previsão do gráfico 30, em meados de 2032 a geração UFV na região centro oeste chegará ao marco de 6 GW de potência instalada. A previsão para os próximos 10 anos foi realizada para a região nordeste, e pode ser observada no gráfico 30, para a geração UFV.

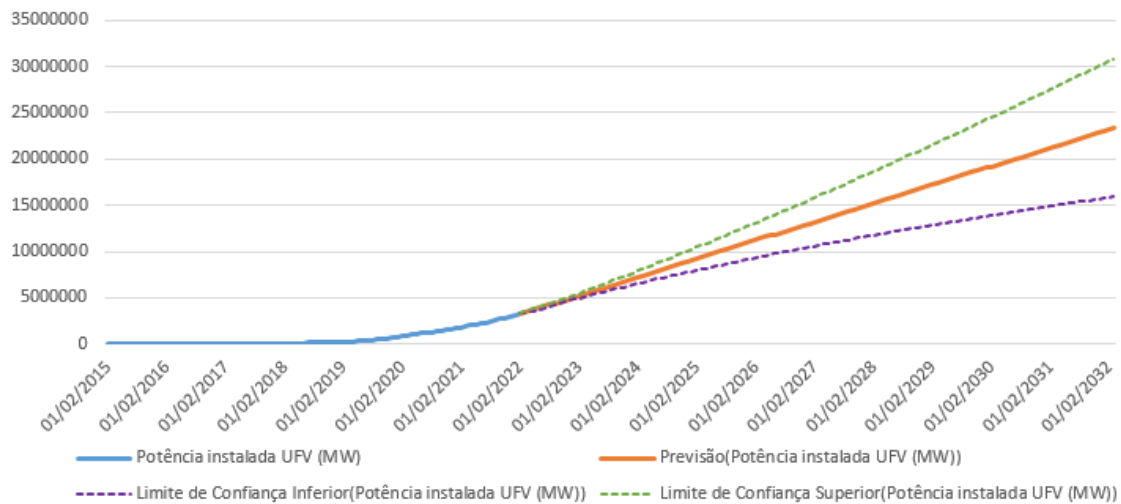
Gráfico 30 - Previsão do crescimento de geração UFV na região nordeste



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Segundo a previsão do gráfico 31, em meados de 2032 a geração UFV na região nordeste chegará ao marco de 14 GW de potência instalada. A previsão geração de distribuída UFV para os próximos 10 anos foi realizada para a região sudeste, e pode ser observada no gráfico 31.

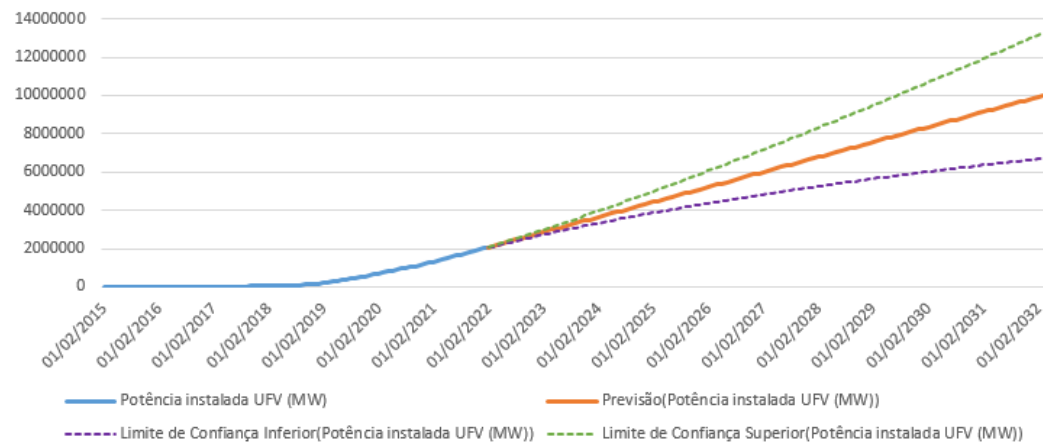
Gráfico 31 - Previsão do crescimento de geração UFV na região sudeste



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Segundo a previsão do gráfico 32, a geração UFV da região sudeste passará a potência de 20 GW até 2032. A previsão para os próximos 10 anos foi realizada para a região sul na modalidade de geração distribuída UFV.

Gráfico 32 - Previsão do crescimento de geração UFV na região sul

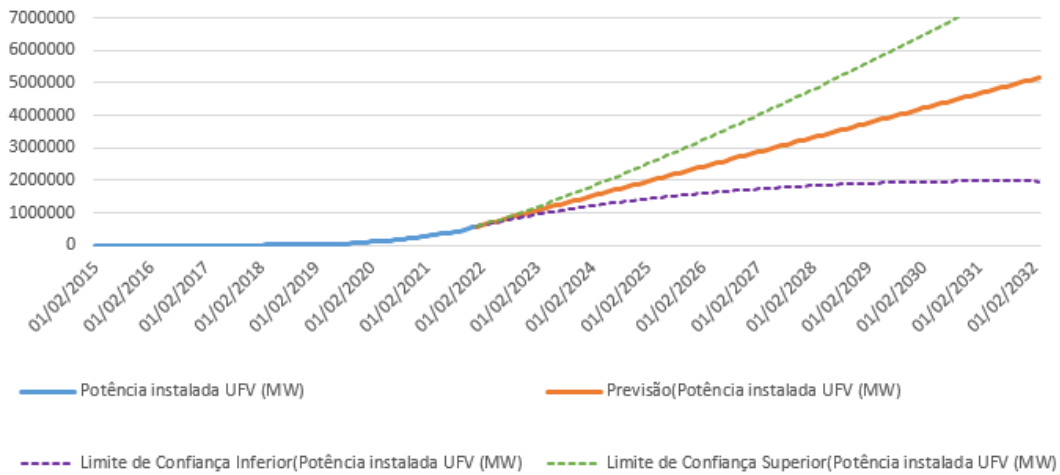


Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Considerando a previsão do gráfico 33, a geração da modalidade UFV alcançará 10 GW de potência instalada. A previsão para os próximos 10 anos foi realizada para a região norte na modalidade de geração distribuída UFV.

Gráfico 33 - Previsão do crescimento de geração UFV na região norte





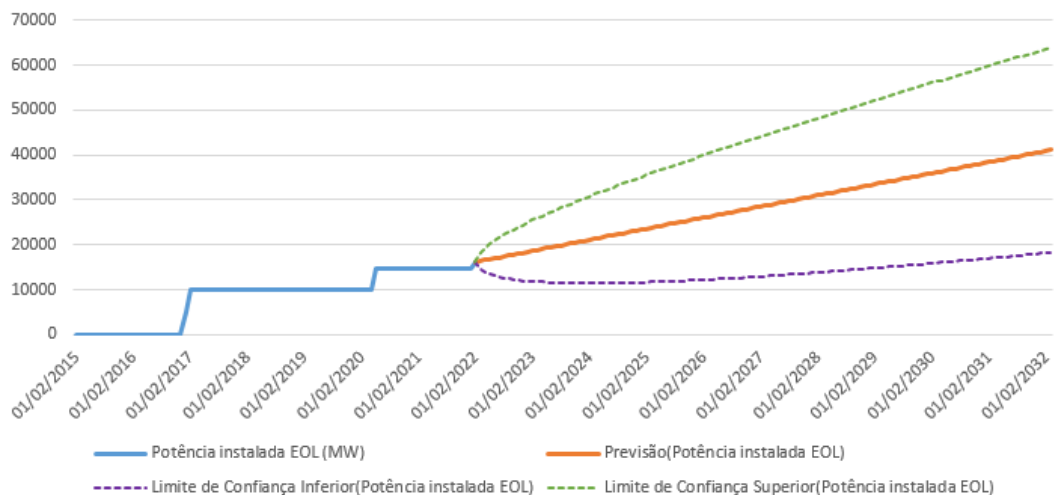
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Segundo a previsão do gráfico 33, a geração da modalidade UFV alcançará 5 GW de potência instalada na região norte em meados de 2032.

#### 4.8 Previsão regional da geração distribuída EOL

O maior crescimento regional de geração eólica aconteceu no nordeste do Brasil. Segundo dados da ANEEL, a região sedia 90,3% da potência outorgada no país, somando 19,72 GW dos 21,84 GW totais de potência. O gráfico 34 mostra a previsão para 2032 da geração eólica na região nordeste.

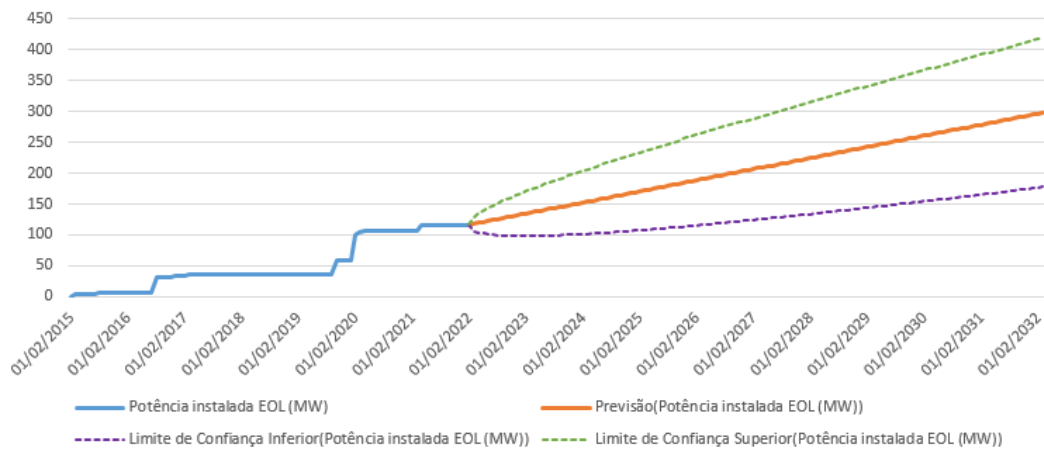
Gráfico 34 - Previsão do crescimento de geração EOL na região nordeste



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Segundo o gráfico 34, a previsão é que em meados de 2032 a geração de energia eólica no Nordeste alcance o marco de 40 GW de potência instalada. A previsão da geração eólica na região sudeste pode ser observada no gráfico 35.

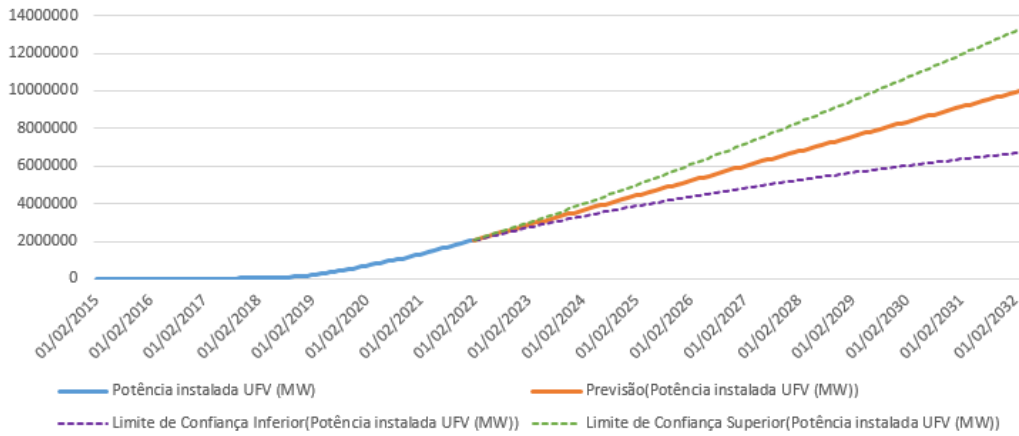
Gráfico 35 - Previsão do crescimento de geração EOL na região sudeste



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Segundo a previsão, a geração eólica na região sudeste alcançará em meados de 2032, 300 MW de potência instalada. A previsão da geração eólica na região sul pode ser observada no gráfico 36.

Gráfico 36 - Previsão do crescimento de geração EOL na região sul



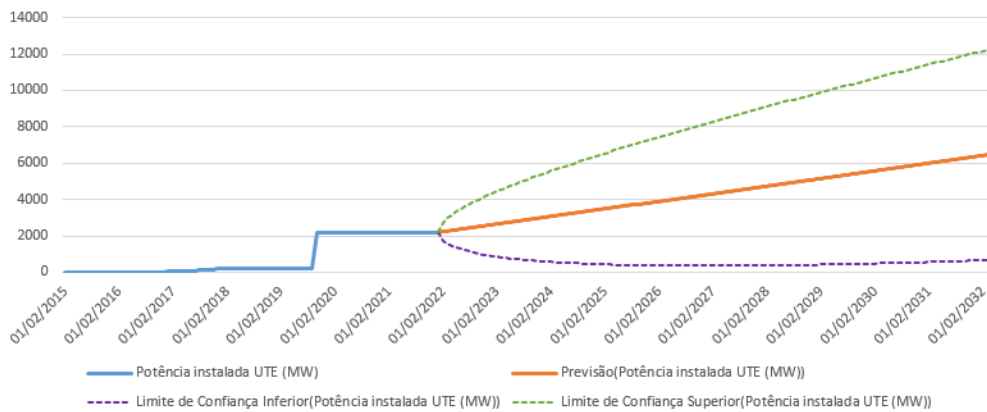
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Segundo a previsão, a geração eólica alcançará 10 GW de potência em meados de 2032 na região sul do Brasil.

#### 4.9 Previsão regional da geração distribuída UTE

A geração termelétrica possui hoje 54,83 GW de potência outorgada, representando 24,6% da geração total de energia elétrica no Brasil. Esse tipo de geração geralmente é ativado em períodos de estiagem e poucas chuvas porque a geração é mais cara se comparada a geração hidrelétrica. A previsão da geração termelétrica na região norte pode ser observada no gráfico 37.

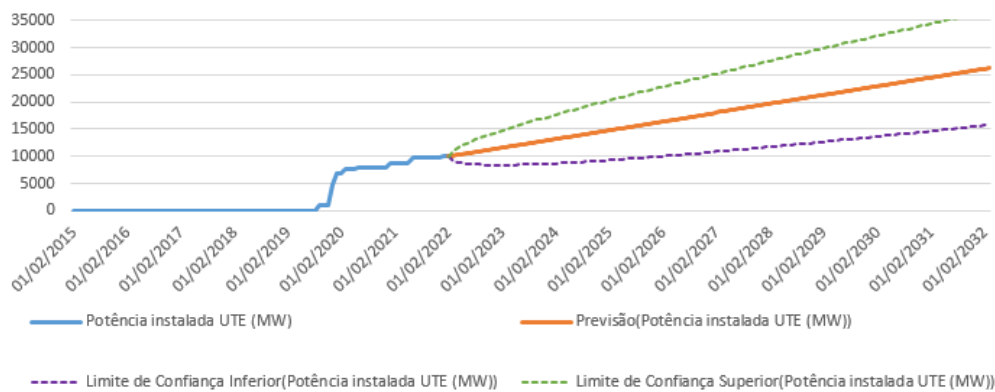
Gráfico 37 - Previsão do crescimento de geração UTE na região norte



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Segundo a previsão, a geração termelétrica alcançará em meados de 2032, 6 GW de potência na região norte. A previsão da geração termelétrica na região nordeste pode ser observada no gráfico 38.

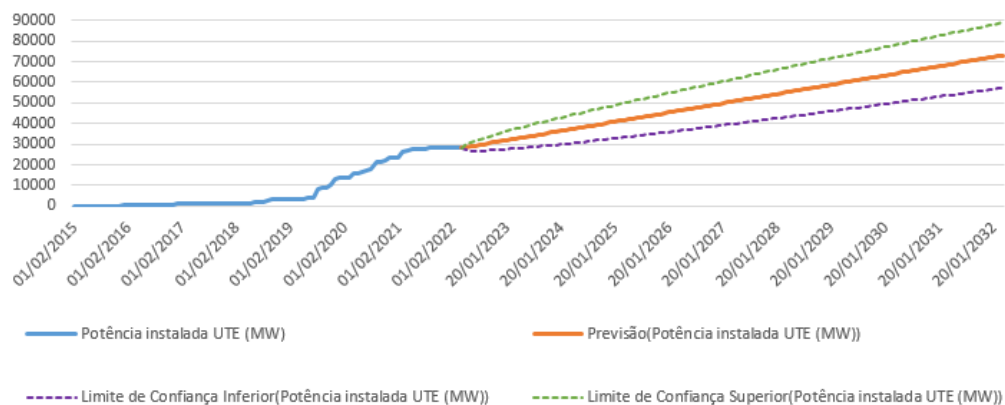
Gráfico 38 - Previsão do crescimento de geração UTE na região nordeste



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Segundo a previsão, a geração termelétrica da região nordeste alcançará aproximadamente 25 GW de potência instalada em meados de 2032. A previsão da geração termelétrica na região centro oeste pode ser observada no gráfico 39.

Gráfico 39 - Previsão do crescimento de geração UTE na região centro oeste

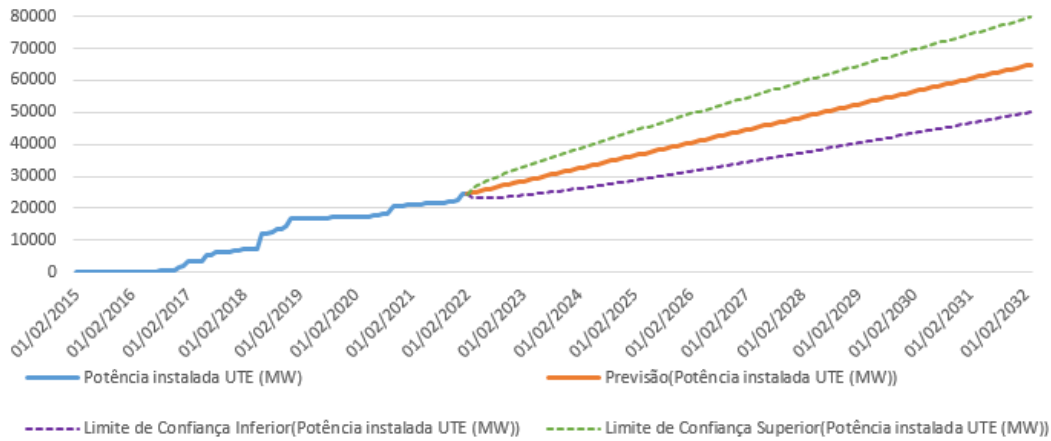


Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Segundo a previsão, a geração termelétrica da região centro oeste alcançará aproximadamente 70 GW de potência instalada em meados de 2032. A previsão da geração

termelétrica na região sul pode ser observada no gráfico 40.

Gráfico 40 - Previsão do crescimento de geração UTE na região sul



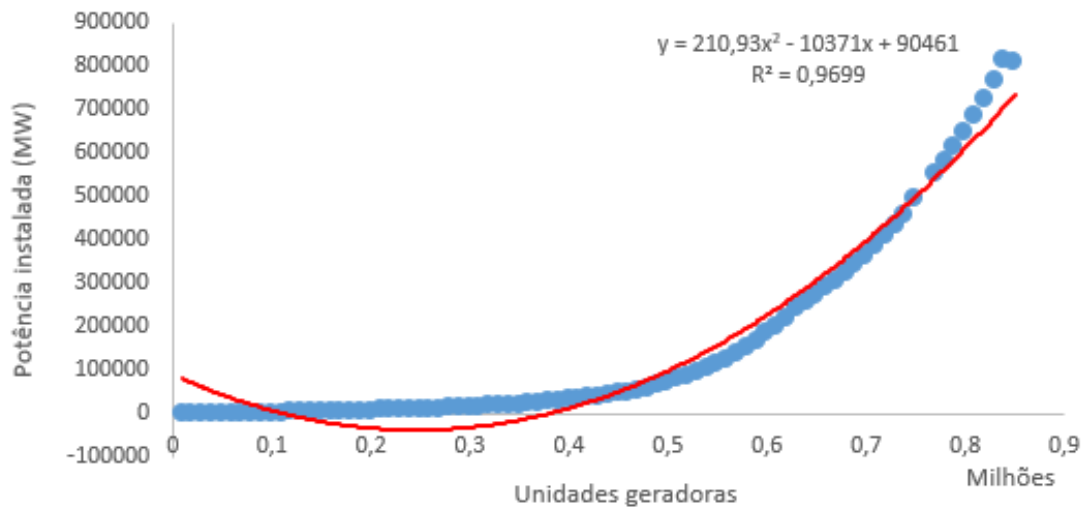
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Segundo a previsão, a geração termelétrica da região sul alcançará aproximadamente 60 GW de potência instalada em meados de 2032.

#### 4.10 Modelo e previsão para UFV nacional

Observando o crescimento da geração distribuída fotovoltaica no Brasil, é interessante prever o crescimento da capacidade de geração futura. Nesse sentido, foi realizado um modelo de geração nacional UFV, compreendendo as cinco regiões.

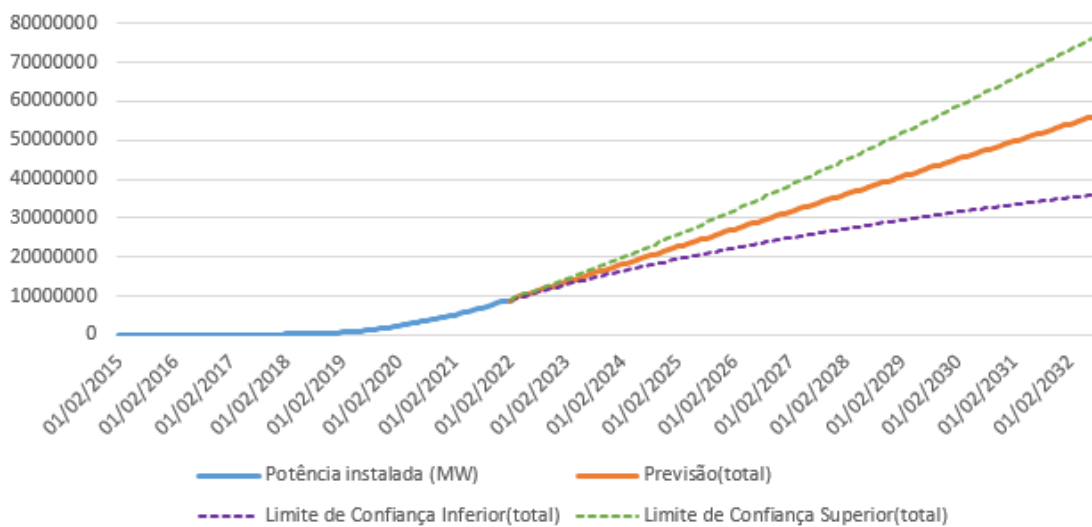
Gráfico 41 - Crescimento da geração distribuída UFV nacional entre 2015 e 2022



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Observando o gráfico 41 de unidades geradoras por potência instalada, o modelo de geração distribuída obteve ótimo ajuste, sendo capaz de representar 96% dos dados. A previsão para 2047 pode ser observada no gráfico 42.

Gráfico 42 - Previsão da geração distribuída UFV nacional para 2032



Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Observando o gráfico de previsão nacional, a geração fotovoltaica alcançará em meados de 2032 entre 35 GW e 60 GW de potência instalada.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A geração distribuída tem vantagens e desvantagens. O Brasil, com sua grande extensão territorial, bacias hidrográficas e alto potencial solar, tem o privilégio de aproveitar muitas tecnologias de geração de energia elétrica. O crescimento da geração eólica e fotovoltaica tem chamado a atenção nos últimos anos.

Segundo dados atualizados da ANEEL, a geração hídrica corresponde a 59,65% de toda geração de energia elétrica no Brasil (109,458 GW), a geração eólica já corresponde a 11,90% da geração nacional (21,842 GW) e a geração solar a 2,76% da geração (5,073 GW). A geração distribuída de energia elétrica tem crescido fortemente e seus impactos devem ser estudados, tanto no sistema de distribuição quanto no sistema de tarifação e questões ligadas as concessionárias de energia do país.

É muito interessante a descoberta do modelo de geração distribuída nas gerações CGH, EOL, UFV e UTE através de regressão múltipla polinomial, esse comportamento do crescimento da potência pode ser descrito através das unidades geradoras, mesmo sendo influenciado por fatores externos.

A geração fotovoltaica e eólica são os tipos de geração que mais modificarão o sistema brasileiro de energia. A geração eólica, sendo mais robusta, com alto investimento em parques eólicos geram energia 24 horas, enquanto as usinas fotovoltaicas geram energia elétrica durante períodos diurnos, porém o investimento é baixo e quem paga é o consumidor interessado.

Em meados do ano de 2047, de acordo com os estudos realizados nesse trabalho, a geração distribuída nacional alcançará 110 GW de potência instalada, o que será interessante e problemático porque haverá a geração em quantidades equivalentes da geração distribuída e da geração hidrelétrica. Levando em consideração que a bandeira da geração fotovoltaica é verde, haverá uma disparidade de preços em relação ao sistema de descontos de excedentes de geração, o que ocasionará as concessionárias a impactos financeiros relevantes neste caso.

Analisando os dados de crescimento da geração CGH, observa-se que embora exista muitas centrais geradoras hidrelétricas, o percentual de potência instalada não chega a 1% da capacidade total do país, e o investimento em novas centrais torna-se inviável devido a geração fotovoltaica proporcionar a geração de energia elétrica em um nível maior.

Observando os dados de geração e previsão de UTE, embora represente hoje 24,6%, a geração fotovoltaica ao longo do tempo é mais viável principalmente devido ao investimento por parte do consumidor. De acordo com os resultados desse trabalho, a geração eólica é muito



promissora na região nordeste e o custo de geração é tão baixo quanto o da geração fotovoltaica. Nesse sentido, o incentivo a criação de parques eólicos é justificável e importante para diversificar a malha de geração do Brasil.

Hoje a energia elétrica é um bem de consumo. No futuro, a energia elétrica deixará de ser um bem de consumo e passará a ser um bem comum devido a geração distribuída, porque a inserção desse tipo de energia renovável e limpa no Sistema Interligado Nacional teoricamente causará a diminuição do preço de comercialização da energia elétrica. É muito provável que nos próximos cem anos, a energia elétrica passe a ser gratuita no Brasil, tornando o acesso e consumo de energia elétrica um direito comum a todos os brasileiros.

Para trabalhos futuros, sugere-se o cálculo previsto do impacto financeiro negativo devido a geração fotovoltaica que as distribuidoras de energia sofrerão ao longo dos anos; o percentual de geração distribuída que abastecerá o Sistema Interligado Nacional e possíveis efeitos; tarifação de utilização do sistema de distribuição devido a GD, estabilidade futura de abastecimento para a população futura do Brasil utilizando projeções demográficas para 2060 do IBGE e o quanto a geração distribuída pode influenciar na baixa de preço do kWh no Brasil.

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de CGHs e PCHs (ABRAPCH). **O que são PCHs e CGHs**. Disponível em: <https://abrapch.org.br/2014/03/o-que-sao-pchs-e-cghs/> Acesso em: 14/06/2022

ANEEL. **Resolução Normativa N° 482**, de 17 de Abril de 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em 20/07/2021.

ANEEL. **Resolução Normativa N° 687**, de 24 de Novembro de 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 20/07/2021.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional** – PRODIST Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição, 2017.

ANEELa. Acompanhamento das centrais geradoras de energia elétrica. Resumo geral de operação comercial das usinas por ano e origem de combustível. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMGYyZWl0NzgtMGRIOC00M2ZjLTljZDYtZTVkYjljZjkxZDBkIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9> Acesso em 02/02/2022.

ANEELb. Matriz Elétrica Brasileira: geração renovável e não renovável. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWw2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9> Acesso em 02/02/2022.

ANEELc. Matriz Elétrica Brasileira: geração renovável e não renovável. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWw2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>

[TQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSI0ImMiOjR9](https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQ0YjYjOTYwM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSI0ImMiOjR9) Acesso em 13/06/2022.

ANEELd. Lista geral de usinas. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQ0YjYjOTYwM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSI0ImMiOjR9> Acesso em: 14/06/2022

ANEELe. Geração distribuída – Power BI. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiOGVlYjExZmEtYmFiZi00YmNiLTg5NzctMWU5ZDBjZDliNTgyIiwidCI6IjNhZmI3M2EwLWU1M2YtNGY5NC1hN2Y1LTliNmZkMmU0MTgzZCJ9> Acesso em: 14/06/2022

BELLO, Luiz Henrique Abreu Dal; VIEIRA, Antonio Fernando de Castro; **Modelagem em Experimentos Mistura-Processo para Otimização de Processos Industriais**. Rio de Janeiro, 2010. 155p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

CAMPOS, G. M. Estatística Prática para Docentes e Pós-Graduandos: **A escolha do teste mais adequado**. Programa Incentivo à Produção de Material Didático do SIAE, Pró-Reitorias de Graduação e Pós-Graduação da USP. São Paulo, 2000.

CERVANTES, C. **Mecanismos regulatórios tarifários e econômico na geração distribuída o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 118p. Dissertação (Mestrado).

ECT - Ambiente Virtual de Aprendizagem para Computação Numérica. **Regressão linear**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <https://cn.ect.ufrn.br/index.php?r=conteudo%2Fmmq-rpolin> Acesso em: 14/06/2022

ETENE - Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste. **Caderno Setorial 2021**. Banco do Nordeste. Disponível em: [https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1045/1/2021\\_CDS\\_200.pdf](https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1045/1/2021_CDS_200.pdf) Acesso em 19/06/2022

GUITARRARA, Paloma. "Energia eólica"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/energia-eolica.htm>. Acesso em 14 de junho de 2022.

GUITARRARA, Paloma. "Energia termoeétrica"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/energia-termoeletrica.htm>. Acesso em 16 de junho de 2022.

g1 – Globo. Jornal Nacional. Produção de energia eólica bate recorde no Nordeste. Disponível em: <https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2019/08/31/producao-de-energia-eolica-bate-recorde-no-nordeste.ghtml> Acesso em: 16/06/2022.

INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS. Rede de Bibliotecas. **Manual de normalização de trabalhos acadêmicos**. Belo Horizonte: IFMG, 2020. Disponível em: <https://www2.ifmg.edu.br/portal/ensino/bibliotecas/manual-de-normalizacao-do-ifmg>. Acesso em: 04/08/2021.

Jornal Estado de Minas. Em plena seca, Minas mantém termelétrica desativada na Grande BH. Disponível em: [https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2021/07/07/internas\\_economia,1284047/em-plena-seca-minas-mantem-termeletrica-desativada-na-grande-bh.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2021/07/07/internas_economia,1284047/em-plena-seca-minas-mantem-termeletrica-desativada-na-grande-bh.shtml) Acesso em: 16/06/2022.

LUIZ, Ciceli Martins. **Avaliação do Impacto da Inserção da Geração Distribuída no Sistema Elétrico da Cemig Distribuição**. XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Belo Horizonte, Novembro de 2019.

MACIEL, Luiz Felipe Vieira. **Regressão linear múltipla na modelagem de resultados na National Basketball Association (NBA)**. 2019. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Estatística) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

Ministério de Minas e Energia. Diretoria de Estudos de Energia Elétrica. **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030: Parâmetros de Custos – Geração e Transmissão**. Janeiro de 2021.

MIRANDA, Isabela Pagani Heringer. **Comparação de diferentes Métodos de Previsão em Séries Temporais com valores discrepantes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Estatística) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.

Operador Nacional de Serviço Elétrico – ONS. O Sistema Interligado Nacional. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin> Acesso em : 14/06/2022

Prefeitura de Curitiba – PR. CGH Nicolau Kluppel começa a funcionar no Parque Birigui. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/cgh-nicolau-kluppel-comeca-a-funcionar-no-parque-barigui/53005> Acesso em: 14/06/2022

PUEL, Gustavo Andregtoni. **Análise do impacto financeiro nas concessionárias de energia elétrica devido à popularização da microgeração distribuída fotovoltaica**. 2019. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Engenharia Elétrica.

REGAZZI, Adair José. **Critérios para seleção de modelos baseados na razão de verossimilhança.** Arquivo UFPB, 2008. Disponível em: <http://arquivo.ufv.br/dbg/resumos2008b/Resumo%20Claudomiro.htm> Acesso em 31/05/2022.

REIS, Lineu Belico dos. **Geração de energia elétrica: tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade.** 2003. Universidade de São Paulo.

SILVA, Ana Hermínia Andrade; CAVALCANTI, Gilmara Alves; PIRES, Juliana Freitas; TERRA, Maria Lídia Coco. **Introdução à estatística no software R** [recurso eletrônico - João Pessoa : Editora UFPB, 2021.

SIMONE, Lucas Fernandes Camilo. **Inserção da micro e mini geração distribuída solar fotovoltaica: impactos na receita das distribuidoras e nas tarifas dos consumidores.** 2019. 148p. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

Solarix energia solar. Energia solar, como funciona? Disponível em: <http://www.solarix.eco.br/energia-solar-como-funciona/> Acesso em 15/06/2022.

SOUSA NETO, Theófilo Machado de. **Ajuste de curvas usando métodos numéricos.** 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado em Matemática em Rede Nacional) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

TEBALDI, Pedro César. Inovação e Tecnologia. **O que é o algoritmo Holt-Winters e como funciona?** OPServices. Disponível em: <https://www.opservices.com.br/holt-winters/#:~:text=Um%20m%C3%A9todo%20de%20suaviza%C3%A7%C3%A3o%20exponencial,e%20o%20que%20realmente%20aconteceu> Acesso em 17/06/2022

## ANEXOS

### Código Nacional:

```
library(ggplot2)

#definindo area de trabalho
setwd("C:/Users/Ludimila Llamas/Desktop/Simulação")

#importando a base de dados
nacional <- read.csv("NacionalCSV.csv",sep=";", stringsAsFactors = T)

#dataframe
view(nacional)
periodo <- nacional$ano

factor_periodo <- factor(periodo)

print(factor(periodo))

unid <- nacional$qde.de.GDs

pot <- nacional$pot.inst.kw

ggplot(data=nacional, aes(x=unid,y=pot))+
  geom_point(aes(color=factor_periodo),size=3.5)+
  geom_smooth(method =lm, se=TRUE,level=0.95,
              color="red", size=0.71)+
  theme(panel.grid.major = element_blank(),panel.grid.minor = element_blank(),
        panel.background = element_blank(),
        axis.line = element_line(colour="black"))+
  labs(y="Potência Instalada (Gw)",x="Unidades Geradoras", color="Período")
```

### Código Nacional por região:

```
library(ggplot2)
setwd("C:/Users/Ludimila Llamas/Desktop/Simulação")

#importando a base de dados
nacionalparcelas <- read.csv("NacionalparcelasCSV.csv",sep=";",
                             stringsAsFactors = T)

#dataframe
view(nacionalparcelas)

tipo<-nacionalparcelas$tipogeracao
tipo_factor<-factor(tipo)

quantidade<-nacionalparcelas$unidades
potenc<-nacionalparcelas$potencia

ggplot(data=nacionalparcelas, aes(x=quantidade,y=potenc))+
  geom_line(aes(color=tipo_factor),size=1.1)+
  theme(panel.grid.major = element_blank(),panel.grid.minor = element_blank(),
        panel.background = element_blank(),
        axis.line = element_line(colour="black"))+
  labs(y="Potência Instalada (kw)",x="Unidades Geradoras", color="Região")
```