

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Arthur Yukio Kitagawa Grizotto

**Estudo de caso: impactos das secas de 2021 na geração
de energia hidrelétrica no Brasil e no abastecimento
elétrico do estado de São Paulo.**

São Carlos

2023

Arthur Yukio Kitagawa Grizotto

Estudo de caso: impactos das secas de 2021 na geração de energia hidrelétrica no Brasil e no abastecimento elétrico do estado de São Paulo.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

**São Carlos
2023**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

G846e Grizotto, Arthur
Estudo de caso: impactos das secas de 2021 na
geração de energia hidrelétrica no Brasil e no
abastecimento elétrico do estado de São Paulo. / Arthur
Grizotto; orientador Frederico Mauad. São Carlos, 2023.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

1. Secas. 2. Geração de energia hidrelétrica. 3.
Abastecimento elétrico. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Arthur Yukio Kitagawa Grizotto

Título: “Estudo de caso: impactos das secas de 2021 na geração de energia hidrelétrica no Brasil e no abastecimento elétrico do estado de São Paulo.”

**Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em
01/12/2023,**

com NOTA Dez (10,0), pela Comissão Julgadora:

**Prof. Associado Frederico Fabio Mauad - Orientador -
SHS/EESC/USP**

Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino - SEL/EESC/USP

**Mestre Talyson de Melo Bolleli - Doutorando/Eng. Ambiental -
EESC/USP**

**Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Professor Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior**

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente a todas as pessoas que, de diversas maneiras, contribuíram significativamente para a minha jornada acadêmica e pessoal. À minha família, pela constante base de apoio, compreensão e amor que foram fundamentais a cada passo dado. Aos amigos, pela partilha de inúmeras horas de estudo, risos que aliviaram a pressão e pela amizade que enriqueceu esta jornada de maneira única.

Não posso deixar de expressar minha gratidão ao Professor Fred Sua orientação e sabedoria foram faróis essenciais na construção deste trabalho, moldando não apenas o resultado final, mas também o meu desenvolvimento acadêmico. Agradeço pela paciência, conhecimento compartilhado e pelo impacto positivo que teve em minha formação.

Este trabalho também é dedicado à incessante busca pelo conhecimento, à curiosidade que impulsionou cada descoberta e à resiliência que permitiu superar desafios. Que esta contribuição, ainda que modesta, agregue ao enriquecimento do conhecimento em nossa área de estudo.

RESUMO

GRIZOTTO, A. Y. K. **Estudo de caso: impactos das secas de 2021 na geração de energia hidrelétrica no Brasil e no abastecimento elétrico do estado de São Paulo.** 2023. 52p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Este estudo aborda a gestão da geração de energia elétrica no Brasil, com enfoque na crise hídrica de 2021. A matriz energética majoritariamente hidrelétrica do país enfrentou desafios significativos, como o apagão de 2001 e a recente seca histórica. Para compreender o impacto da crise de 2021, dados de chuvas e métricas de usinas hidrelétricas foram coletados do Instituto Nacional de Meteorologia e da Agência Nacional de Águas. Utilizando técnicas estatísticas e de ciências de dados, a análise busca estabelecer relações entre dados climatológicos, geração de energia e o efeito do apagão de 2001. A linguagem de programação Python, com bibliotecas como Pandas e Numpy, é empregada para processar os dados. Objetivos específicos incluem contextualizar a crise, avaliar seu impacto na geração de energia e fornecer análises para suportar a tomada de decisões pelos órgãos brasileiros para evitar futuras interrupções no fornecimento de energia elétrica.

Palavras-chave: Secas, Geração de energia hidrelétrica, Abastecimento elétrico

ABSTRACT

GRIZOTTO, A. Y. K. **Case Study: Impacts of the 2021 droughts on hydroelectric power generation in Brazil and the electricity supply in the state of São Paulo..** 2023. 52p. Monograph (Conclusion Course Paper) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

This study addresses the management of electricity generation in Brazil, focusing on the 2021 water crisis. The country's predominantly hydroelectric energy matrix faced significant challenges, such as the 2001 blackout and the recent historic drought. To understand the impact of the 2021 crisis, rainfall data and metrics from hydroelectric plants were collected from the National Institute of Meteorology and the National Water Agency. Using statistical and data science techniques, the analysis seeks to establish relationships between climatological data, energy generation, and the effect of the 2001 blackout. The Python programming language, with libraries such as Pandas and Numpy, is employed to process the data. Specific objectives include contextualizing the crisis, assessing its impact on energy generation, and provide analysis to support the decisions made by Brazilian authorities to prevent future disruptions in electricity supply.

Keywords: Droughts; Hydroelectric Power Generation; Electricity Supply.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura Organizacional do Setor Elétrico Brasileiro.	21
Figura 2 – Sistema Interligado Nacional	22
Figura 3 – Exemplo de dados retirados do site do INMET. Os dados são divididos tanto por ano (2021 nesse exemplo) quanto por estação meteorológica (Brasília, Brasília, Águas Emendadas, Gama e Paranoá, nesse exemplo). Todos os dados estão disponíveis em https://portal.inmet.gov.br/dados/historicos , e a lista de estações meteorológicas está disponível em https://portal.inmet.gov.br/paginas/catalogoaut	26
Figura 4 – Exemplos de dados de uma única estação do INMET (arquivo .csv conforme mostrado na Figura 3). Destaca-se que a escala dos dados é de hora em hora (facilitando a posterior análise do autor), indicando a hora no formato UTC. Na figura mostrada temos a informação de precipitação nas 12 primeiras horas do ano de 2021, para a estação de Brasília (onde não houve chuva nesse período)	27
Figura 5 – Exemplo de figura retirada da plataforma de monitoramento de secas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), disponível em https://monitordesecas.ana.gov.br/mapa . Áreas mais afetadas pela seca estão em vermelho. A escala de tempo é mensal.	28
Figura 6 – Exemplo de plataforma para downloads de dados da ONS, disponível em https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx . É possível escolher diversas formas de filtragem de dados, tais como a escala de tempo, a usina a ser analisada, e o período total de análise.	30
Figura 7 – Evolução do mapa da seca, disponível pela Agência Nacional de Águas (ANA), ao longo do ano de 2021, com enfoque no estado de São Paulo. Destacam-se os meses de Agosto a Dezembro como maior intensidade das secas.	36
Figura 8 – Dados geográficos das estações meteorológicas	37
Figura 9 – Evolução da precipitação (a) e geração (b) para todas as usinas, ao longo do período analisado (2019 a 2022). Observa-se uma redução no nível de precipitação para algumas usinas, e uma redução considerável no nível de geração para todas as usinas.	39
Figura 10 – Evolução de precipitação para todas as usinas, ao longo do período analisado (2019 a 2022). Na figura (a), temos o período de início de ano (meses de Janeiro a Junho). Na figura (b), temos o período de fim de ano (meses de Julho a Dezembro).	41

Figura 11 – Análise da influência entre geração e precipitação - Usina de Água Vermelha	44
Figura 12 – Análise da influência entre geração e precipitação - Usina de Ilha Solteira	45
Figura 13 – Análise da influência entre geração e precipitação - Usina de Jupia . . .	46
Figura 14 – Análise da influência entre geração e precipitação - Usina de Marimbondo	47
Figura 15 – Análise da influência entre geração e precipitação - Usina de Porto Primavera	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	O SETOR ELÉTRICO NO BRASIL	17
2.1	Histórico do Setor Elétrico	17
2.2	Estruturação Atual do Setor Elétrico Nacional	20
2.3	O apagão de 2001	23
2.4	As secas de 2021	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Coleta de dados climatológicos	25
3.2	Coleta de dados de geração de energia	29
3.3	Processamento e Análise de dados	29
3.3.1	Processamento dos dados	29
3.3.2	Análise dos dados	31
3.4	Linguagem de programação e bibliotecas utilizadas	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	Análise preliminar da seca em 2021	35
4.2	Evolução da geração e da precipitação ao longo dos anos	36
4.3	A influência dos meses de seca	38
4.4	Relação entre geração e precipitação	40
5	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

O processo de abastecimento de energia elétrica é uma questão de grande importância para o desenvolvimento econômico e social de um país. No Brasil, a matriz energética é predominantemente hidrelétrica, representando cerca de 62% da matriz elétrica do país, enquanto a energia térmica representa aproximadamente 18%. A decisão entre utilizar a geração hidrelétrica ou térmica depende de diversos fatores, como a disponibilidade de recursos hídricos, o custo de geração e o impacto ambiental.

A gestão da geração de energia elétrica no Brasil passou por uma crise em 2001, quando um apagão de grandes proporções ocorreu em todo o país, deixando milhões de pessoas sem energia elétrica por várias horas. O apagão de 2001 teve como principais causas a falta de planejamento do setor elétrico, a falta de investimentos em infraestrutura e a falta de chuvas, o que reduziu o nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas.

Em 2021, o Brasil enfrentou uma grave crise hídrica, com a pior seca dos últimos 91 anos, o que levou a uma redução significativa do nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas e a uma preocupação crescente com o abastecimento de energia elétrica. Para entender o impacto da seca de 2021 na geração de energia hidrelétrica no Brasil e no abastecimento elétrico do estado de São Paulo, é necessário obter informações detalhadas sobre as médias de chuvas anuais e as métricas de operações das usinas.

As médias de chuvas anuais podem ser obtidas a partir de plataformas disponibilizadas pelos órgãos nacionais, como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Já as métricas de operações das usinas podem ser obtidas por meio de plataformas da Agência Nacional de Águas (ANA). Com esses dados em mãos, será possível comparar as médias de chuvas e as métricas de operações das usinas em 2021 com as médias históricas e entender se houve impacto na geração de energia hidrelétrica.

Para analisar os dados coletados, serão utilizadas técnicas de ciências de dados e de estatística, como a correlação entre as variáveis, o cálculo do p-valor e outras ferramentas estatísticas. Essas técnicas ajudarão a definir a relação entre os dados climatológicos e de geração de energia com o efeito do apagão de 2001.

Para a realização deste trabalho, será utilizada a linguagem de programação Python, por ser uma linguagem de programação open source e com uma ampla variedade de bibliotecas de data science disponíveis. Algumas das principais bibliotecas de data science que serão utilizadas incluem Pandas, Numpy, Matplotlib, Seaborn e Scipy.

Por fim, os objetivos específicos desse trabalho são:

- Estabelecer um breve histórico a respeito do processo de formação do setor elétrico

nacional;

- Trazer um panorama sobre os órgãos responsáveis pela organização do setor elétrico nacional;
- Contextualizar a crise de 2021 dentro do contexto nacional da época;
- Obter medidas de dados climatológicos e de geração de energia antes, durante e depois da crise de 2021;
- Verificar se houve impacto na geração de energia ao longo da crise de 2021, através da análise da influência de chuvas sobre a geração de energia;
- Fornecer análises para suportar a tomada de decisão dos órgãos brasileiros, não somente durante a crise, mas também após a mesma

2 O SETOR ELÉTRICO NO BRASIL

2.1 Histórico do Setor Elétrico

A história do Setor elétrico no Brasil se inicia em meados do século XIX, com um foco em experiências pioneiras em iluminação e transporte públicos (ao menos dentro do território nacional). Conforme discutido em (GOMES *et al.*, 2002), a iluminação da área ao redor da estação central da ferrovia Dom Pedro II (atual Central do Brasil), feita em 1879, é considerada como um ponto inicial do setor elétrico nacional, que colhe frutos desse progresso até os dias de hoje. Alguns anos depois, em 1873, o transporte público deu seus primeiros passos, com uma linha de bondes elétricos em Niterói.

Embora o foco inicial do setor elétrico brasileiro tenha sido em infraestruturas concretas para a população urbana - como é o caso de sistemas de transporte público e iluminações - foram justamente o sucesso desses investimentos iniciais que fizeram com que a importância da energia elétrica fosse rapidamente levada em consideração no âmbito industrial. Dessa forma, já em 1883, a primeira usina hidrelétrica brasileira é construída em Diamantina, município do estado de Minas Gerais. O uso da energia gerada, no entanto, ainda era limitado a extração de diamantes feitas na região (GOMES *et al.*, 2002).

Nos anos seguintes, entre o fim do século XIX e o início do século XX, investimentos subsequentes foram feitos, indo em concomitância com o crescimento industrial no Brasil. O número de estabelecimentos industriais nessa época cresceu em 800%, por exemplo. Desde o início, aspectos geográficos do território nacional, como vegetação, clima, bacia hidrográfica, etc foram levados em consideração para a criação de usinas hidrelétricas em todo o território nacional. Segundo o estudo feito em (GOMES *et al.*, 2002), a geração de energia por meio de hidrelétricas já era considerada desde o início como uma opção mais vantajosa do que o carvão importado. Somente entre 1883 e 1900, a capacidade de geração de energia instalada no Brasil aumentou de 61kW para cerca de 11000kW - um aumento de 178 vezes em um período de apenas 20 anos (FARIAS; SELLITTO, 2011).

O crescimento do setor elétrico no Brasil continuou pelos próximos anos, acompanhando o crescimento da população brasileira - que cresceu de 17 para 31 milhões de habitantes entre 1900 e 1920. O crescimento populacional, junto com o êxodo rural e o crescimento de moradores nas cidades, fez com que surgisse um mercado interno que justificasse o investimento em distribuição de energia para o público geral. Ao mesmo tempo, existia um capital presente no país com as atividades de extração de café, tornando possível os investimentos iniciais no setor. Justamente por essa influência da usina cafeeira no crescimento inicial de geração de energia Brasileira, o eixo Rio-São Paulo - região onde a extração de café era forte, além de ser o centro econômico do país - foi o principal

responsável pelo surgimentos de novas usinas hidrelétricas.

Ao longo do século XX, o potencial de geração de energia em hidrelétricas no Brasil interessou o mercado internacional. Foi nessa época que as primeiras subsidiárias estrangeiras começaram seus investimentos, como a *American Foreign Power Company (AMFORP)* (FERREIRA; SILVA; SIMONINI, 1890), bem como a empresa *Light* (SAES, 1890). Ao mesmo tempo, ao longo desse crescimento, o mercado de geração brasileiro se mantinha predominantemente ligado a usinas hidrelétricas.

A relação entre crises econômicas e ambientais dentro do território nacional vem sendo alvo de estudos há tempos, como no trabalho feito em (JUNIOR, 2016), num contexto mais atual. No entanto, um exemplo dessa relação pode ser visto ainda no início do século passado, com a crise econômica de 1929 e sua influência no setor elétrico brasileiro. Houve uma redefinição do papel do estado, que passou a executar um modelo econômico intervencionista, com o objetivo de diversificar sua estrutura produtiva. Isso culminou, para o âmbito do setor elétrico, no Código de Águas, que dava à união a capacidade de legislar e outorgar concessões de serviços públicos de energia elétrica. Conforme analisado no trabalho feito em (NETO, 2015), houve uma resistência das empresas que já haviam se consolidado no território nacional - como a AMFORP e a Light - principalmente nas questões tarifárias.

Dentro do contexto do período pós crise de 1929, houve um certo desestímulo para o investimento por parte de investidores estrangeiros na geração de energia no Brasil. Por conta disso, a taxa de crescimento média anual, que beirava os 30% entre 1883 e 1910, chegou a ficar abaixo dos 5% entre 1930 e 1945. É nesse contexto que o estado se vê na missão de passar a investir diretamente na produção de energia nacional. O período entre 1930 e 1945 é considerado pelos historiadores como um reflexo das características monopolistas do setor e da presença do capital estrangeiro (CORRÊA, 2005).

No pós-guerra, foram feitos planos relacionados à expansão da matriz energética Brasileira, com a criação do Plano Saúde, Alimentação, Transporte e Energia (Plano Salte). O plano em questão teve um início promissor, com planejamento de elevar a energia instalada no país de 1.500 para 2.800MW. No entanto, o plano foi cumprido apenas em partes e se viu encerrado em 1952 (SOUZA, 2012). Na década de 50, a recém criada Comissão Mista Brasil-Estados Unidos Para o Desenvolvimento Econômico (CMBEU) fez um relatório relativo ao setor elétrico, onde diagnosticava um desequilíbrio entre oferta e demanda de energia elétrica no território nacional. Dentre as principais causas, estão a urbanização acelerada; o crescimento industrial; o controle tarifário e a demanda de carvão e lenha que era importada para a energia elétrica. Foi nesse contexto, com o objetivo de suprir esse desequilíbrio, que a CMBEU orientou uma expansão do setor elétrico focada em grandes empresas privadas, cabendo ao governo apenas a regulamentação e ações supletivas (SILVA, 2005).

Iniciado no segundo governo vargas e ampliado durante o governo de Juscelino Kubitschek (1956-61), o projeto de desenvolvimento do setor elétrico foi feito sobre o comando de empresa pública. Nesse contexto, a maior parte das companhias estaduais de energia foram criadas, bem como uma usina geradora: a Central Elétrica de Furnas. O Plano de Metas, amplamente conhecido como principal característica do governo de Juscelino, também trouxe um projeto de crescimento do setor elétrico, unindo a ação do estado com a da empresa privada. 43,4% dos recursos reservados para o plano de metas eram destinados a área energética. Ao fim desse período, em 1961, a matriz energética brasileira já se encontrava em 2056,7 MW.

Ao longo da década de 60, a estrutura organizacional do setor nacional começou a criar forma. Nessa época foram criadas, por exemplo, a Eletrobrás e o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DNAEE). Também foram criados novos projetos com apoio direto do BNDES, tais como hidrelétricas (Furnas, Barra Bonita, etc) bem como os sistemas de transmissão e distribuição de diversas concessionárias.

Ao longo da década de 70, a questão tarifária do Setor Elétrico Brasileiro sofreu uma forte contenção, relacionada ao processo inflacionário da época. A situação continuou se deteriorando, com diversas obras não sendo concluídas devido a falta de remuneração. Em 1987 o acesso a financiamento interno para investimentos se tornou praticamente vedado, e por conta disso os investimentos se tornaram mais dependentes do financiamento externo. Nesse período as concessionárias passaram a acumular dívidas, e o processo de inadimplência continuou por anos. Em 1993, o saldo da Conta de Resultado a Compensar (CRC) somado alcançava USD 26 bilhões.

A redução dos investimentos somado ao crescimento do consumo de energia elétrica acima da capacidade instalada trouxe problemas a partir do final dos anos 80. O modelo vigente de financiamento do setor gerou debates com relação a sua eficiência. A crise foi amenizada apenas em 1993, por meio de uma nova legislação, que trazia soluções para os problemas das tarifas, além de permitir um acerto de contas entre a federação e as concessionárias. Nesse período também foi criado o Programa Nacional de Desestatização (PND) e o Fundo Nacional de Desestatização (FND) ambos coordenados pelo BNDES.

Para melhor aproveitar o PND, diversas ações foram tomadas. Foi feita a desverticalização do setor de energia nacional, com a clara divisão entre Geração, Transmissão, Distribuição e Comercialização de energia. Além disso, foi feita a criação do conceito de Produtor Independente de Energia, bem como o livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição de energia. Essas mudanças compõem até hoje as principais características do sistema de energia nacional.

Com a virada de milênio e o início dos anos 2000, novas mudanças foram feitas. De maneira geral, todas essas mudanças tinham como objetivo a sustentação de um novo padrão de concorrência no setor, onde a transição de um modelo estatal para uma

participação mista (englobando estatal e privado) era necessária. Finalmente, convém mencionar a crise de 2001, que alertou para a necessidade de uma diversificação na matriz energética nacional. Esse alerta fez com que a atenção se voltasse para a co-geração baseada no bagaço de cana e álcool de cana, que são expressivos até hoje para a matriz energética brasileira.

2.2 Estruturação Atual do Setor Elétrico Nacional

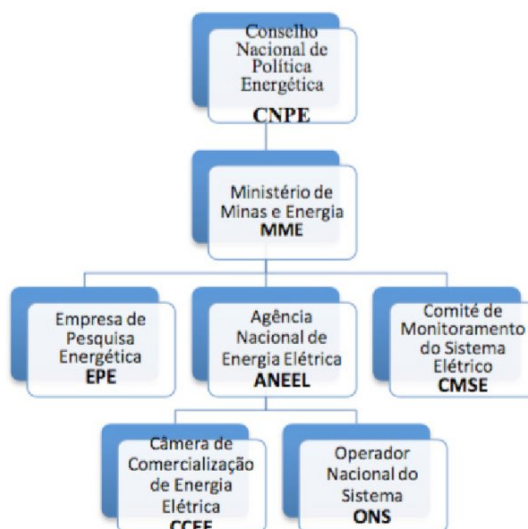
A estrutura atual do setor brasileiro é uma reflexão da gradual transição de uma política focada em um monopólio estatal para um modelo de mercado, onde os investimentos são compartilhados com o capital privado. As motivações e os principais aspectos dessa evolução estão detalhados na Seção 2.1.

Nesse ponto, é importante destacar as 4 principais características do setor elétrico nacional:

- Desverticalização, com uma clara distinção entre as atividades de Geração, Transmissão, Distribuição e Comercialização;
- Introdução do mercado privado, responsável pelos investimentos e por fomentar a competição no setor;
- Livre acesso às redes de transmissão e distribuição, constituindo monopólios regulados;
- Competição na geração e na comercialização, contribuindo para estimular a eficiência e a redução dos preços.

Essas características devem ser tomadas como base para entender a estrutura organizacional do setor elétrico nacional, esquematizada na Figura 1. O conselho Nacional de Política Energética (CNPE) assessora diretamente o Presidente da República. O Ministério de Minas e Energia (MME) é responsável por criar políticas públicas que permitam o uso sustentável de recursos energéticos e minerais por todo o território nacional. Na terceira camada da hierarquia, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) presta serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) tem papéis de regulamentação e fiscalização do Setor Elétrico Nacional. Nesse ponto, a ANEEL é dividida em mais dois órgãos: O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), responsável pela coordenação e controle da geração e transmissão de energia no território nacional; e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), que viabiliza a comercialização de energia elétrica pelo território brasileiro. Por fim, o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) tem o controle da segurança do suprimento de energia elétrica.

Figura 1 – Estrutura Organizacional do Setor Elétrico Brasileiro.



Fonte: (MENDONÇA; BORNIA, 2019)

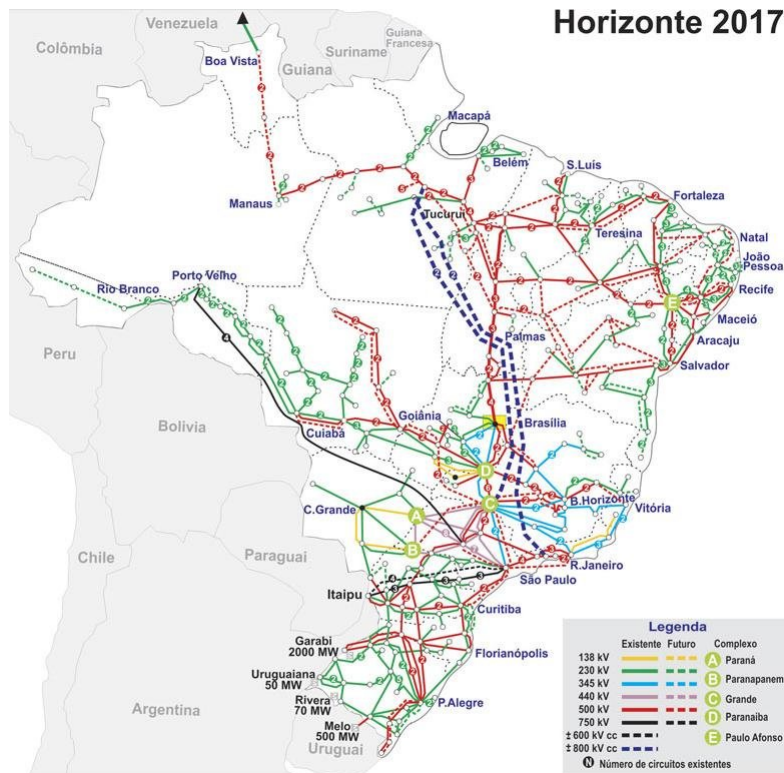
Outro importante componente na estruturação do Setor Elétrico Nacional é o Sistema Interligado Nacional (SIN), um sistema de coordenação e controle, considerado hidrotérmico e de grande porte para a produção e transmissão de energia elétrica no território nacional. Conforme mostrado na Figura 2, o SIN é formado pelas regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte.

Nesse ponto, é importante detalhar o aspecto "hidrotérmico" presente no SIN. A dependência de recursos hídricos para a geração de energia elétrica no Brasil já é bem conhecida. Porém, existe uma sazonalidade e uma variabilidade presente no território nacional, provocando diferentes níveis de chuva, não só entre diferentes regiões do país, mas na mesma região em diferentes épocas do ano. Tendo isso em vista, o sistema nacional é constituído não somente das já conhecidas usinas hidrelétricas, mas também de usinas térmicas de diferentes origens.

A geração por meio de hidrelétricas é mais barata e mais vantajosa, tanto do ponto de vista econômico quanto do ambiental. No entanto, dada a estocasticidade do regime de chuvas no país, é necessário existir um controle do uso das águas armazenadas nas usinas geradoras de todo o país. Assim, a escolha sobre quanto se utilizar dos estoques de energia hidráulica (reservatórios), bem como a decisão do despacho de usinas térmicas estão intrinsecamente ligados às incertezas das afluências futuras (ROMEIRO, 2014). Nesse ponto, duas variáveis são extremamente importantes: o nível de armazenamento atual dos reservatórios, e a tendência hidrológica.

Nesse ponto, cabe ao SIN executar, sob coordenação da ONS e fiscalização da ANEEL, a operação hidráulica dos sistemas de reservatórios que o integram. Diversas

Figura 2 – Sistema Interligado Nacional



Fonte: (Luiz Eduardo Oliveira, 2017)

ferramentas matemáticas e estatísticas são utilizadas para fazer o planejamento da operação (TOSCANO, 2009):

- Planejamento de Longo Prazo, com um horizonte de tempo de 5 anos e discretização mensal;
- Planejamento de Médio Prazo, com horizonte de tempo de alguns meses até 1 ano e discretização mensal;
- Planejamento de Curto prazo, com horizonte de estudo de uma semana e discretização diária ou horária;
- o Pré-Despacho propriamente dito, com horizonte de tempo de um dia e discretização horária.

As informações de horizontes de tempo maiores são utilizadas nas de horizonte de tempo menores, até chegar na fase de pré-despacho, onde a geração de cada usina é definida de hora em hora ou de meia em meia hora. Restrições elétricas e operativas também são levadas em consideração.

2.3 O apagão de 2001

O apagão de 2001 foi um dos eventos mais marcantes da história recente do Brasil, sendo caracterizado pela interrupção do fornecimento de energia elétrica em diversas regiões do país. A crise energética foi causada por uma combinação de fatores, tais como a falta de investimentos em infraestrutura, a falha na gestão do sistema elétrico e a escassez de chuvas.

De acordo com (BORGES, 2021) a crise energética iniciou-se em 2001, quando o país enfrentou uma das piores estiagens da história. A falta de chuvas levou à redução dos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas, que são responsáveis pela maior parte da geração de energia elétrica no Brasil. A situação se agravou com a falta de investimentos em novas usinas e na manutenção das já existentes, o que contribuiu para a sobrecarga do sistema elétrico.

De acordo com (BARDELIN, 2004), o racionamento de energia elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 teve como principal causa a falta de investimentos na geração e transmissão de energia, além de uma grande dependência da energia hidrelétrica. Essa crise energética teve impactos significativos na sociedade brasileira, como a necessidade de reduzir o consumo de energia elétrica e a implementação de um plano de racionamento. O artigo também aborda as medidas tomadas pelos órgãos brasileiros para evitar que a crise se repetisse no futuro.

Em decorrência do apagão, a sociedade brasileira foi obrigada a adotar medidas de redução do consumo de energia elétrica, como a redução da jornada de trabalho, o fechamento de estabelecimentos comerciais e o racionamento de energia elétrica em diversas regiões do país. O impacto do apagão foi sentido em diversos setores da economia, prejudicando a produção industrial e o crescimento do país.

Diante desse cenário, os órgãos brasileiros tomaram medidas para evitar que a crise se repetisse no futuro. Foram realizados investimentos em novas usinas de geração de energia elétrica, em linhas de transmissão e em sistemas de armazenamento de energia, visando aumentar a capacidade de geração e garantir a segurança do sistema elétrico. Além disso, foram criados programas de incentivo à eficiência energética e à redução do consumo de energia elétrica, com a troca de lâmpadas, a utilização de aparelhos mais eficientes e a conscientização da população sobre a importância da economia de energia.

Portanto, o apagão de 2001 foi um marco na história do setor elétrico no Brasil, evidenciando a necessidade de investimentos em infraestrutura e de uma gestão mais eficiente do sistema elétrico. As medidas adotadas pelos órgãos brasileiros contribuíram para a recuperação do sistema elétrico e para a redução da dependência das usinas hidrelétricas, tornando o setor elétrico brasileiro mais seguro e sustentável.

2.4 As secas de 2021

A seca de 2021 afetou significativamente o abastecimento de energia elétrica no Brasil, principalmente na região Sudeste, responsável por grande parte da produção hidrelétrica do país. Essa situação remete a outra crise energética vivida pelo país, o apagão de 2001, que ocorreu devido a uma combinação de fatores, como a falta de chuvas, aumento do consumo de energia e problemas na gestão do setor elétrico.

Após o apagão de 2001, foram implementadas diversas políticas públicas para garantir a segurança energética do país, como a diversificação da matriz elétrica com a inserção de fontes renováveis, incentivos ao uso racional de energia e aprimoramento da gestão do setor elétrico. No entanto, a seca de 2021 revelou que ainda há muito a ser feito para evitar crises energéticas no futuro.

Conforme mencionado em (HUNT; STILPEN; FREITAS, 2018), apesar das políticas implementadas, ainda há fragilidades no sistema elétrico brasileiro, como a falta de investimentos em infraestrutura e a dependência da produção hidrelétrica. Além disso, a crise hídrica de 2021 revelou a necessidade de uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos e aprimoramento dos modelos de previsão de chuvas.

Portanto, é importante avaliar se as políticas públicas implementadas após o apagão de 2001 foram suficientes para evitar a crise energética de 2021 e, caso contrário, identificar quais medidas devem ser tomadas para garantir a segurança energética do país no futuro. O estudo da relação entre a seca de 2021 e o apagão de 2001 pode contribuir para essa discussão e para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes para o setor elétrico brasileiro.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seção de Materiais e Métodos deste trabalho será organizada em quatro etapas, descritas a seguir.

Coleta de dados climatológicos: Os dados climatológicos serão obtidos por meio da plataforma do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que disponibiliza informações de estações meteorológicas distribuídas por todo o país.

Coleta de dados de geração de energia: Os dados de geração de energia serão obtidos através da plataforma da Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que disponibiliza informações sobre a produção de energia elétrica em todo o país.

Processamento e Análise de dados: Serão utilizadas técnicas de ciência de dados e estatística para analisar a relação entre os dados climatológicos e de geração de energia elétrica com o efeito das secas de 2021. Para isso, serão utilizadas técnicas de correlação, teste de hipóteses e técnicas de visualização de dados.

Linguagem de programação e bibliotecas utilizadas: Para a realização da análise dos dados, será utilizada a linguagem de programação Python por ser open source e por possuir diversas bibliotecas para análise de dados. As principais bibliotecas utilizadas serão Pandas para manipulação de dados, Matplotlib e Seaborn para visualização de dados e Scipy para realização dos testes estatísticos.

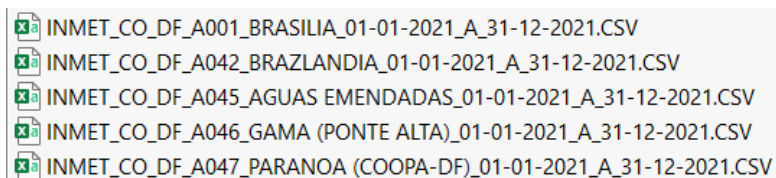
3.1 Coleta de dados climatológicos

Para a coleta de dados climatológicos, os dados serão retirados diretamente da base do INMET. Os dados em si estão disponíveis gratuitamente para download em <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>, sendo atualizados mensalmente pela própria plataforma. A figura 3 mostra um exemplo dos arquivos que são extraídos do site do INMET. Como é possível perceber, os arquivos são separados tanto por ano quanto por estação meteorológica. Os arquivos estão em formato .csv, o que facilita a subsequente extração, visualização e análise dos dados por meio da linguagem de programação escolhida (Python).

A figura 4 mostra em detalhes um dos arquivos .csv abertos. A escala de tempo é horária e apresentada no horário UTC, para padronização. A informação principal mostrada na figura (e que será utilizada majoritariamente nesse trabalho) é a precipitação total, mostrada em mm. Porém, convém salientar que a base de dados também possuem outras variáveis, que são medidas e armazenadas pelas estações automáticas:

- PRECIPITAÇÃO TOTAL, HORÁRIO (mm)

Figura 3 – Exemplo de dados retirados do site do INMET. Os dados são divididos tanto por ano (2021 nesse exemplo) quanto por estação meteorológica (Brasília, Brasília, Águas Emendadas, Gama e Paranoá, nesse exemplo). Todos os dados estão disponíveis em <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>, e a lista de estações meteorológicas está disponível em <https://portal.inmet.gov.br/paginas/catalogoaut>



Fonte: Autor

- PRESSAO ATMOSFERICA AO NIVEL DA ESTACAO, HORARIA (mB)
- PRESSÃO ATMOSFERICA MAX.NA HORA ANT. (AUT) (mB)
- PRESSÃO ATMOSFERICA MIN. NA HORA ANT. (AUT) (mB)
- RADIACAO GLOBAL (Kj/m²)
- TEMPERATURA DO AR - BULBO SECO, HORARIA (°C)
- TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO (°C)
- TEMPERATURA MÁXIMA NA HORA ANT. (AUT) (°C)
- TEMPERATURA MÍNIMA NA HORA ANT. (AUT) (°C)
- TEMPERATURA ORVALHO MAX. NA HORA ANT. (AUT) (°C)
- TEMPERATURA ORVALHO MIN. NA HORA ANT. (AUT) (°C)
- UMIDADE REL. MAX. NA HORA ANT. (AUT) (%)
- UMIDADE REL. MIN. NA HORA ANT. (AUT) (%)
- UMIDADE RELATIVA DO AR, HORARIA (%)
- VENTO, DIREÇÃO HORARIA (gr) (° (gr))
- VENTO, RAJADA MAXIMA (m/s)
- VENTO, VELOCIDADE HORARIA (m/s)

As variáveis presentes na base de dados podem fornecer insights valiosos para pesquisas futuras. Por exemplo, pode-se explorar a influência de cada uma dessas variáveis no nível de precipitação final ou até mesmo no nível de geração de energia. No entanto, é importante ressaltar que essas ideias e discussões são sugeridas para trabalhos futuros, pois exigem uma análise mais aprofundada e específica, que vai além do escopo do presente estudo.

Figura 4 – Exemplos de dados de uma única estação do INMET (arquivo .csv conforme mostrado na Figura 3). Destaca-se que a escala dos dados é de hora em hora (facilitando a posterior análise do autor), indicando a hora no formato UTC. Na figura mostrada temos a informação de precipitação nas 12 primeiras horas do ano de 2021, para a estação de Brasília (onde não houve chuva nesse período)

REGIAO:	CO		
UF:	DF		
ESTACAO:	BRASILIA		
CODIGO (WM A001			
LATITUDE:	-15,7894		
LONGITUDE:	-47,9258		
ALTITUDE:	1160,96		
DATA DE FUN #####			
Data	Hora UTC	PRECIPITAÇÃO TOTAL, HORÁRIO (mm)	PR
01/01/2021	0000 UTC		0
01/01/2021	0100 UTC		0
01/01/2021	0200 UTC		0
01/01/2021	0300 UTC		0
01/01/2021	0400 UTC		0
01/01/2021	0500 UTC		0
01/01/2021	0600 UTC		0
01/01/2021	0700 UTC		0
01/01/2021	0800 UTC		0
01/01/2021	0900 UTC		0
01/01/2021	1000 UTC		0
01/01/2021	1100 UTC		0
01/01/2021	1200 UTC		0

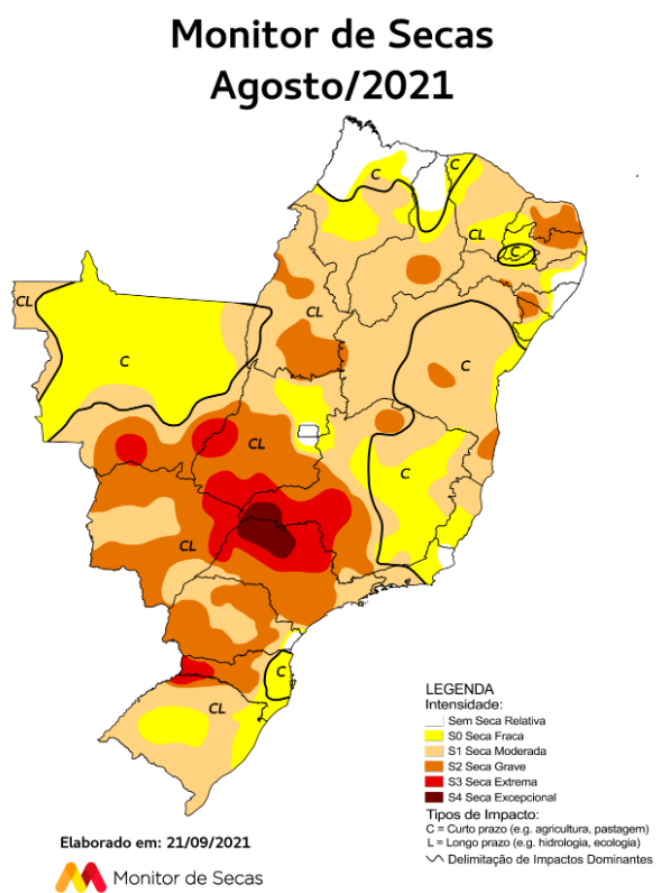
Fonte: Autor

Um outro conjunto de dados a ser analisado é o **Monitor de Secas do Brasil** da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Essa plataforma está disponível em <https://monitordesecas.ana.gov.br/mapa>. O Monitor de Secas é um procedimento contínuo e regular que tem como objetivo acompanhar de forma periódica a ocorrência de secas. Os resultados dessa monitorização são compilados e divulgados por meio do Mapa do Monitor de Secas. Mensalmente, são disponibilizadas informações atualizadas sobre a situação das secas, abrangendo dados até o mês anterior. Essas informações são apresentadas por meio de indicadores que refletem tanto o curto prazo, considerando os últimos 3, 4 e 6 meses, quanto o longo prazo, considerando os últimos 12, 18 e 24 meses. Esses indicadores fornecem uma visão abrangente e detalhada da evolução da seca na região monitorada.

A Figura 5 exibe um exemplo do mapa de secas obtido diretamente do site oficial.

Esse mapa representa de forma visual o nível de severidade das secas em todo o território nacional, destacando as áreas mais impactadas a cada mês. O objetivo do mapa de secas é fornecer uma análise de longo prazo sobre a evolução desses eventos no Brasil. No presente trabalho, o mapa de secas será utilizado não como uma fonte direta de dados para análise e extração de informações, mas sim como uma ferramenta de visualização, focalizando especificamente no estado de São Paulo e na região Sudeste como um todo. Ao longo dos resultados, serão apresentados mapas ilustrativos que retratam a evolução das secas nessa região, obtidos a partir dessa plataforma. Esses mapas serão utilizados como ponto de partida para a seleção dos períodos mais impactados pela seca, os quais servirão como base para a extração dos dados de precipitação e geração de energia, por exemplo.

Figura 5 – Exemplo de figura retirada da plataforma de monitoramento de secas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), disponível em <https://monitordesecas.ana.gov.br/mapa>. Áreas mais afetadas pela seca estão em vermelho. A escala de tempo é mensal.



Fonte: ANA

3.2 Coleta de dados de geração de energia

Para os dados de geração de energia, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) fornece uma plataforma online para download de seus dados, disponível em https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. A própria página em questão oferece uma ferramenta onde é possível filtrar os dados antes de baixá-los. Um exemplo de tal plataforma é mostrado na Figura 6. Nesse caso, as seguintes opções de filtragem foram utilizadas:

- Geração de energia em MWMed (MW médio), pois ele representa "a capacidade média de geração de energia elétrica da usina ao longo do tempo", e portanto leva em conta possíveis variações causadas por situações externas (como o clima, que é o foco desse trabalho);
- Escala de tempo de hora em hora, para que os dados de geração fiquem sincronizados com os dados climatológicos;
- Subsistema Sudeste/Centro-Oeste e estado São Paulo, que é o foco desse trabalho;
- As usinas escolhidas foram as principais usinas do estado de São Paulo (tanto em tamanho quanto em capacidade de geração). Detalhes a respeito das usinas escolhidas estão detalhados na seção 3.3.

3.3 Processamento e Análise de dados

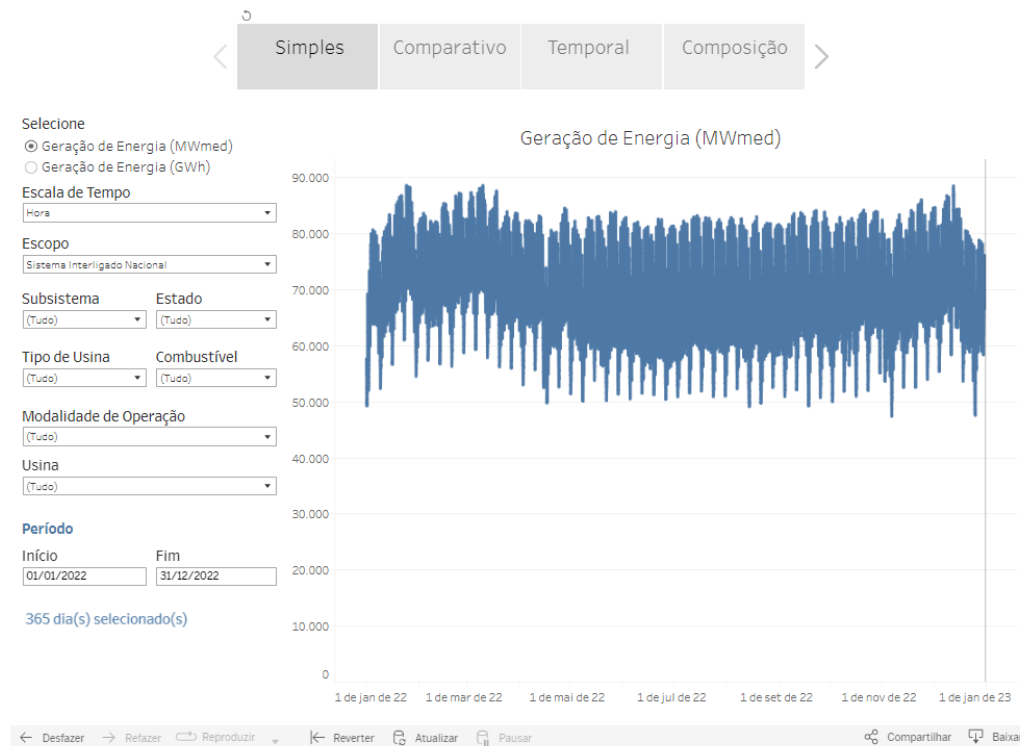
As seções 3.1 e 3.2 detalham as plataformas e sites escolhidos para a extração dos dados referentes a variáveis climáticas (com foco em nível de precipitação) e de geração de energia. Nessa seção, duas etapas primordiais serão detalhadas:

1. O processamento de dados, isto é, como é possível filtrar, modificar, e organizar os dados extraídos, para que eles possam ser posteriormente utilizados para o objetivo final do trabalho: verificar a influência das secas de 2021 no nível de geração de energia nas usinas hidrelétricas do estado de São Paulo;
2. A Análise de dados, isto é, quais ferramentas e técnicas serão utilizadas para visualizar esses dados e posteriormente tirar conclusões dos mesmos.

3.3.1 Processamento dos dados

Para esse trabalho, duas bases de dados distintas foram utilizadas: dados meteorológicos foram retirados do INMET, e dados de geração foram retirados da ONS. Por serem bases de dados distintas, é necessário que exista uma pré-filtragem de dados, com o objetivo final de unir e sincronizar essas duas bases, permitindo uma posterior análise dos

Figura 6 – Exemplo de plataforma para downloads de dados da ONS, disponível em https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. É possível escolher diversas formas de filtragem de dados, tais como a escala de tempo, a usina a ser analisada, e o período total de análise.



Fonte: ONS

dados de forma única. Para isso, os parágrafos a seguir descrevem os passos tomados para tal.

O primeiro passo é definir quais usinas hidrelétricas serão consideradas nesse trabalho. Como o objetivo é verificar a influência das secas no estado como um todo, as 5 maiores usinas hidrelétricas (em capacidade instalada total) serão utilizadas. Segundo dados do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SIGRH), disponível em <https://sigrh.sp.gov.br/arquivos/perh/r0estadual/quadro28.htm>, as maiores usinas do estado são, em ordem decrescente de capacidade instalada:

1. Ilha Solteira (3230 MW)
2. Porto Primavera (1814 MW)
3. Marimbondo (1440 MW)
4. Engenheiro Souza Dias ou Jupia (1411 MW)

5. José Ermirio de Moraes ou Água Vermelha (1380 MW)

Com a seleção dessas cinco usinas, o próximo passo consiste em relacioná-las com os dados de precipitação. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibiliza dados de chuva coletados por estações automáticas distribuídas por todo o território nacional. A lista completa dessas estações pode ser acessada em <https://portal.inmet.gov.br/paginas/catalogoaut>. Cada estação possui uma latitude e longitude definidas pelo INMET, o que permite a localização espacial precisa. A estação automática mais próxima de cada usina é associada a ela, a fim de coletar os dados de chuva da maneira mais fiel possível.

A próxima etapa consiste em definir a escala de tempo adequada (por exemplo, medições horárias, dados diários, etc.). Para esta pesquisa, a escala de tempo escolhida foi a diária, permitindo uma análise gráfica e numérica mais clara dos dados. Nesse sentido, os dados de chuva foram organizados em médias diárias (em milímetros de chuva ao longo de um dia completo), enquanto os dados de geração foram agrupados em médias diárias para cada usina.

Por fim, é necessário determinar o período de análise dos dados. O foco deste trabalho é examinar as secas de 2021 no estado de São Paulo. Portanto, o ano completo de 2021 será utilizado como base tanto para os dados de chuva quanto para os dados de geração. Além disso, é importante considerar a evolução da seca ao longo de 2021. Compreender quais meses apresentaram maior ou menor intensidade de seca permite uma melhor interpretação e análise dos dados. Nesse sentido, o mapa de evolução da seca fornecido pela Agência Nacional de Águas (ANA), detalhado na Seção 3.1, será utilizado como guia tanto para o autor do trabalho quanto para o leitor, a fim de auxiliar na compreensão do texto e dos dados.

3.3.2 Análise dos dados

Nessa subseção, o objetivo será descrever quais ferramentas e técnicas serão utilizadas para fazer a visualização e a interpretação dos dados. O objetivo final é entender a influência da seca de 2021 (por meio dos dados pluviométricos) no nível de geração de energia das principais hidrelétricas do estado de São Paulo.

Nesse ponto, é importante salientar que, dada a dinâmica da estruturação do setor elétrico nacional, já detalhada na Seção 2.2, existe uma série de algoritmos de curto, médio e longo prazo que tem como objetivo final prever a demanda nacional por energia, frente as características futuras de nível de vazão das bacias hidrográficas, como o nível de chuva. Dessa forma, a influência entre a precipitação e a geração não é imediata. A chuva em um dia não impactará imediatamente o nível de geração da hidrelétrica no dia seguinte. Essa influência é de longo prazo, e portanto a análise de dados deve levar isso em consideração.

Dessa forma, para melhor compreender a influência e a correlação entre precipitação

e geração, diferentes escalas de tempo serão utilizadas ao longo do trabalho: diária e mensal serão as principais, e a discriminação entre as mesmas será feita de forma clara ao longo da apresentação dos resultados. Além disso, será verificada a influência da seca não somente no mês que ela ocorreu, mas também nos meses seguintes, para identificar as consequências para a geração de energia futura no país como um todo.

Nessa subseção, serão utilizadas diversas ferramentas matemáticas e estatísticas para melhor compreender a relação entre geração e precipitação. Uma abordagem comum é a análise de correlação, que permite identificar a existência e a intensidade de uma relação linear entre as variáveis. A correlação de Pearson, por exemplo, quantifica a força e a direção dessa relação linear. Valores próximos a 1 indicam uma correlação positiva forte, enquanto valores próximos a -1 indicam uma correlação negativa forte. Essa análise pode ser realizada em diferentes escalas de tempo, como a correlação diária ou mensal entre os dados de precipitação e geração.

Além da análise de correlação, também é possível utilizar técnicas de regressão para modelar a relação entre as variáveis. A regressão linear, por exemplo, permite estimar a geração de energia com base nos dados de precipitação. Por meio dessa análise, é possível obter uma equação que descreve a relação entre as variáveis, fornecendo uma estimativa da geração esperada para diferentes níveis de precipitação.

Outra ferramenta importante é a análise de séries temporais. Essa análise permite identificar padrões, tendências e sazonalidades nos dados ao longo do tempo. Com base nessa análise, é possível verificar se existe uma relação de dependência entre os dados de precipitação e geração em diferentes períodos, como sazonalidades anuais ou variações de curto prazo.

Além disso, é possível utilizar técnicas de análise exploratória de dados, como gráficos de dispersão, histogramas e box plots, para identificar padrões, outliers e distribuição dos dados. Essas técnicas podem ajudar a visualizar possíveis relações não lineares entre precipitação e geração, bem como fornecer insights sobre a distribuição e a variabilidade dos dados.

Por fim, também pode ser relevante considerar modelos estatísticos mais complexos, como modelos de regressão não linear, modelos de séries temporais mais avançados, como modelos de espaço de estado ou modelos de redes neurais, dependendo da natureza dos dados e dos objetivos específicos da análise.

Ao combinar essas ferramentas e técnicas, será possível obter uma compreensão mais profunda da relação entre precipitação e geração de energia hidrelétrica, considerando os diferentes aspectos temporais e estatísticos envolvidos.

3.4 Linguagem de programação e bibliotecas utilizadas

Nesta seção, descreveremos as linguagens de programação e bibliotecas utilizadas para a análise dos dados no presente trabalho. O objetivo é utilizar a linguagem de programação Python devido à sua popularidade, eficiência e ampla gama de bibliotecas disponíveis para análise e manipulação de dados.

1. Linguagem de programação Python: A linguagem de programação Python é conhecida por sua simplicidade, legibilidade e flexibilidade. Sua sintaxe clara e intuitiva permite o desenvolvimento de código de forma rápida e eficiente. Além disso, a comunidade Python é ativa e oferece suporte extenso, o que torna essa linguagem uma escolha ideal para análise de dados.
2. Biblioteca Pandas: A biblioteca Pandas é uma poderosa ferramenta para manipulação e análise de dados em Python. Ela fornece estruturas de dados flexíveis, como DataFrames, que permitem a organização e manipulação eficiente de conjuntos de dados. Com o Pandas, é possível realizar operações de filtragem, agregação, transformação e limpeza dos dados, tornando-o essencial para a preparação dos dados antes da análise.
3. Biblioteca Matplotlib: A biblioteca Matplotlib é uma das mais populares para visualização de dados em Python. Ela oferece uma ampla variedade de gráficos e gráficos personalizáveis, permitindo a criação de visualizações estáticas e interativas. Com o Matplotlib, é possível criar gráficos de dispersão, histogramas, gráficos de barras, gráficos de linha e muito mais, fornecendo uma representação visual dos dados.
4. Biblioteca Seaborn: A biblioteca Seaborn é construída sobre o Matplotlib e fornece estilos adicionais e funcionalidades para visualização de dados. Ela simplifica a criação de gráficos estatísticos complexos, como gráficos de densidade, box plots e gráficos de violino. Com o Seaborn, é possível produzir visualizações mais atraentes e informativas, facilitando a comunicação dos resultados da análise de dados.
5. Biblioteca Scipy: A biblioteca Scipy é amplamente utilizada para realizar testes estatísticos e análises numéricas em Python. Ela oferece uma variedade de funções estatísticas e ferramentas para realizar cálculos estatísticos avançados, como testes de hipóteses, análise de variância (ANOVA), regressão e correlação. A integração do Scipy com outras bibliotecas, como o Pandas, permite a realização de análises estatísticas completas e robustas.

A combinação dessas bibliotecas Python - Pandas, Matplotlib, Seaborn e Scipy - fornecerá as ferramentas necessárias para manipular, visualizar e analisar os dados do

presente trabalho. Essas bibliotecas oferecem uma ampla gama de funcionalidades que permitem explorar, compreender e comunicar os insights obtidos a partir dos dados, contribuindo para uma análise de dados eficaz e significativa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Essa seção tem por objetivo apresentar e discutir os principais resultados encontrados, levando em consideração os objetivos iniciais deste trabalho. Para melhor esclarecimento e compreensão, essa seção está dividida em 4 partes principais:

1. Na seção 4.1, por meio dos dados do mapa da seca da ANA, será feita uma análise preliminar a respeito da seca de 2021, e de sua evolução ao longo do estado de São Paulo. Isso ajudará a contextualizar o leitor para os resultados apresentados nas Seções seguintes;
2. Na Seção 4.2, será feito um resumo dos dados que foram coletados ao longo da pesquisa, em duas frentes principais: dados de precipitação (coletados das estações meteorológicas do INMET) e dados de geração (coletados do histórico de dados da ONS);
3. Na seção 4.3, os dados inicialmente filtrados serão analisados do ponto de vista dos meses de seca (normalmente entre junho e agosto de cada ano), com atenção especial ao ano de 2021, que foi o ano de maior intensidade desses eventos;
4. Na seção 4.4, será verificada a influência da precipitação no nível de geração das usinas propriamente ditas. Para isso, será feita tanto uma análise por método dos mínimos quadrados, quanto de regressão linear clássica.

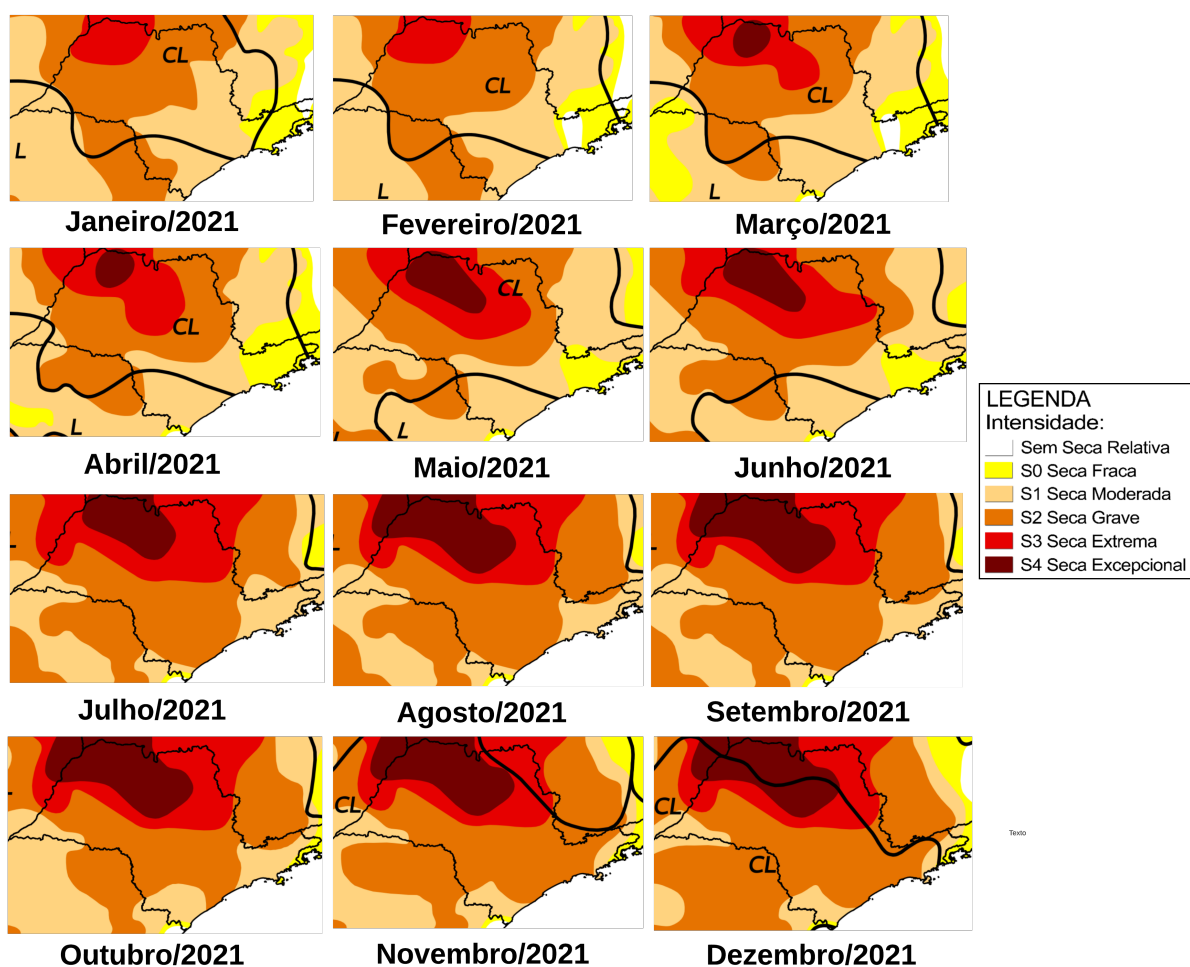
4.1 Análise preliminar da seca em 2021

Ao explorar o mapa da seca da ANA, é possível culminar os dados referentes a evolução da região de seca no estado de São Paulo ao longo do ano de 2021. A figura 7 mostra a evolução do mapa da seca ao longo do ano. Nesse ponto, é importante destacar que a seca no Brasil normalmente começa nos meses entre Maio e Junho, terminando nos meses entre Setembro e Outubro. Na figura, é possível observar que a seca permaneceu intensa no estado de São Paulo até o final do ano de 2021, o que já é um indicativo inicial de que o período de seca foi mais intenso do que o normalmente apresentado em anos anteriores.

Convém notar também que a área de maior seca encontra-se na região Noroeste do Estado. Essa região possui um clima predominante seco, e esse tipo de comportamento é o esperado para a Região. Porém, isso será levado em conta ao longo da análise dos resultados, haja visto que é preciso fazer a diferenciação entre usinas hidrelétricas que fazem ou não parte dessa região de seca mais intensa (já que as que fazem parte provavelmente terão sua geração mais fortemente influenciadas pelo nível de precipitação). É importante lembrar

que a maior usina hidrelétrica do estado de São Paulo, em capacidade instalada, é a de Ilha Solteira, que se encontra justamente nessa região de maior influência da seca.

Figura 7 – Evolução do mapa da seca, disponível pela Agência Nacional de Águas (ANA), ao longo do ano de 2021, com enfoque no estado de São Paulo. Destacam-se os meses de Agosto a Dezembro como maior intensidade das secas.



Fonte: Adaptado pelo autor

4.2 Evolução da geração e da precipitação ao longo dos anos

Conforme descrito na seção 3.2, as 5 maiores usinas hidrelétricas do estado de São Paulo foram consideradas para coleta dos resultados, de forma a verificar a influência das secas no estado como um todo. O primeiro passo para a análise dos resultados é associar cada uma das usinas com uma estação meteorológica correspondente. Para isso, tentou-se tomar as estações meteorológicas mais próximas de cada usina, por meio dos dados de latitude e longitude das estações, disponibilizados pelo próprio INMET. Em alguns casos, a estação mais próxima possuía muitos dados faltantes, o que inviabilizaria a análise dos dados. Nessas situações optou-se por coletar dados das estações meteorológicas

mais próximas que tivessem dados suficientes. Ao fim dessa análise, a relação entre usinas e estações ficou estabelecida conforme abaixo:

1. Usina de Ilha Solteira: Estação meteorológica de Três Lagoas;
2. Usina de Porto Primavera: Estação meteorológica de Presidente Prudente;
3. Usina de Marimbondo: Estação meteorológica de Barretos;
4. Usina de Jupia: Estação meteorológica de Três Lagoas;
5. Usina de Água Vermelha: Estação meteorológica de Jales.

Figura 8 – Dados geográficos das estações meteorológicas

Código Estação Meteorológica	Nome da Estação	Município	Latitude	Longitude	Altitude
A704	TRES LAGOS	Três Lagos, MS	-20,783	-51,712	329
A707	PRESIDENTE PRUDENTE	Presidente Prudente, SP	-22,119	-51,408	432
A748	BARRETOS	Barretos, SP	-20,559	-48,545	534
A733	JALES	Jales, SP	-20,165	-50,595	457

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir desse momento, para maior compreensão por parte do leitor, os dados de precipitação serão apresentados sempre associados a usina correspondente. Fica implícito que os dados na verdade são de estações meteorológicas, conforme a relação acima apresentada.

O primeiro passo do presente trabalho é a análise de dados. Dessa forma, a Figura 9 mostra um gráfico de caixas (*boxplot*) da evolução do nível de precipitação - Figura 9 (a) - e geração - Figura 9 (b) - ao longo dos anos analisados (período de 2019 a 2022).

Esse resultado deve ser analisado de dois pontos de vista diferentes. Para o nível de precipitação, é possível observar uma redução no nível mediano de precipitação apenas para duas usinas: Água Vermelha e Porto Primavera. Ainda assim, essa redução não foi tão expressiva. Isso pode ser explicado pelo fato de que os resultados mostram um agregado do ano todo, não apenas no período de seca. Dessa forma, um aumento de chuva nos períodos de não-seca (no 1o semestre de cada ano, por exemplo) podem ter sido determinantes para

manter a mediana de precipitação parecida entre os anos de 2020, 2021 e 2022 para muitas dessas usinas. Esse resultado foi justamente o que motivou o autor a analisar os dados não para o período do ano todo, mas sim para os meses de seca. Essa análise específica estará descrita na seção 4.3.

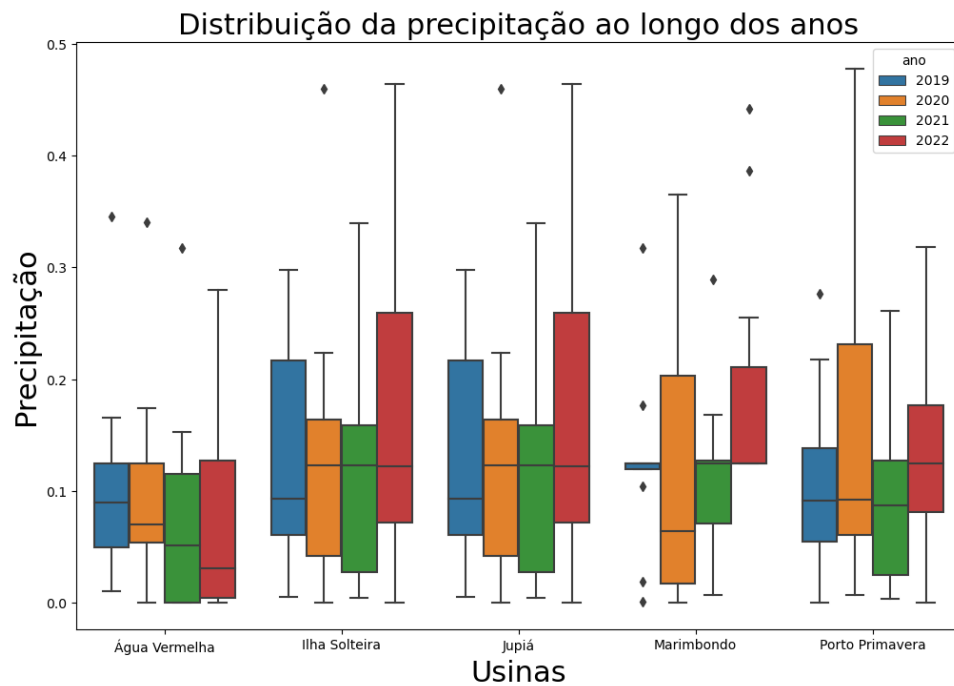
Já para o nível de geração, se compararmos os anos de 2020 e 2021, há uma redução em todas as usinas analisadas. Fica clara portanto o deficit de geração das usinas do estado de São Paulo no ano de 2021 (justamente o ano das secas). Um outro aspecto importante a ser analisado é o nível dessa redução: o maior nível de redução ocorreu na usina de Ilha Solteira, que se encontra justamente na região mais afetada pela seca: O noroeste de São Paulo (conforme já discutido na Seção 4.1). Isso mostra que, embora o nível da redução de precipitação para o ano de 2021 não tenha ficado claro, a redução do nível de geração das usinas hidrelétricas se mostra presente e deve ser levada em consideração.

É importante salientar também a razão para essa distinção entre a redução de geração - que foi vista - e a redução do nível de precipitação - que não está presente de forma tão clara: de acordo com as regras e normas atuais no que se refere ao despacho de energia no Brasil, existe atualmente uma série de algoritmos para a previsão dos níveis de chuva e de vazão das principais bacias hidrográficas nacionais. Dessa forma, a geração da usina hidrelétrica propriamente dita é controlada por meio do controle do despacho a nível de usina. Esses algoritmos levam em conta o curto, médio e longo prazo. Para averiguar a influência da precipitação no nível de geração, não se deve levar em conta a precipitação imediata, mas sim o comportamento de médio e longo prazo (médias mensais, trimestrais, semestrais, etc). Essa análise será feita posteriormente na Seção 4.4.

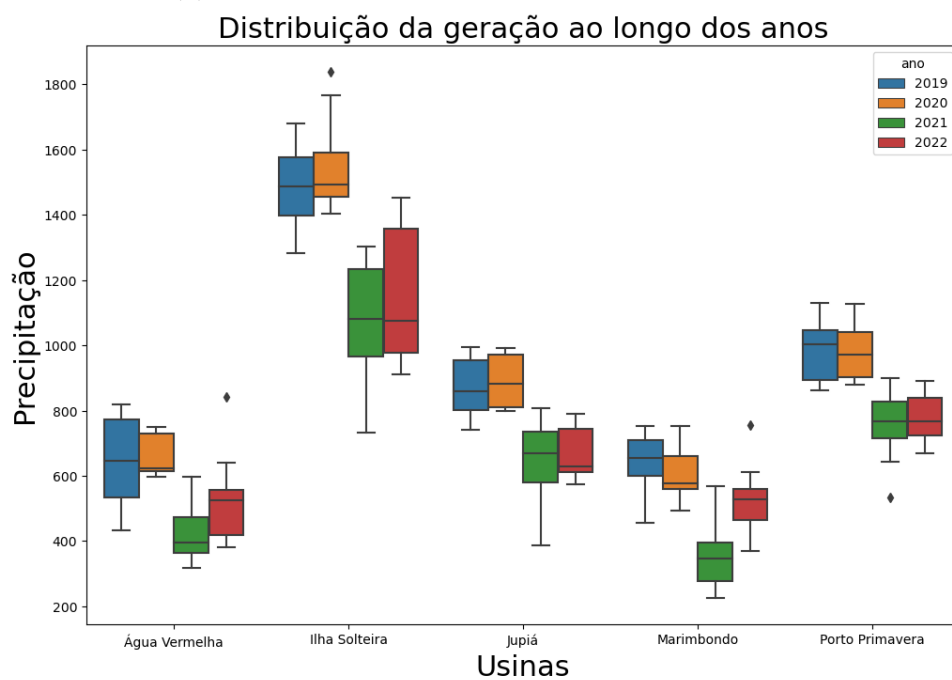
4.3 A influência dos meses de seca

Na seção 4.2, foi verificada a distribuição dos níveis de precipitação e geração ao longo do período 2019-2022, para cada usina analisada. Na seção atual, a mesma análise será feita, porém agora filtrando apenas nos meses de seca. O período normalmente apontado pelos especialistas em clima como período de seca no estado de São Paulo é entre os meses de Julho a Outubro de cada ano. No entanto, conforme visto na seção 4.1, a seca de 2021 se estendeu por todo o segundo semestre do ano. Dessa forma, para os próximos resultados, os dados foram filtrados entre duas categorias principais: início do ano - englobando os meses de Janeiro a Junho - e fim do ano - englobando os meses de Julho a Dezembro.

A Figura 10 (a) mostra a evolução da chuva no início do ano. É interessante notar, nesse caso, que para todas as usinas, com exceção da usina de Marimbondo, houve uma redução, ainda que superficial, no nível mediano de precipitação entre os anos de 2020 e 2021. O início do ano normalmente não é considerado como período de seca, porém é importante ressaltar que o processo de despacho de energia no Brasil leva em conta o



(a) Evolução da precipitação para todas as usinas



(b) Evolução da geração para todas as usinas

Figura 9 – Evolução da precipitação (a) e geração (b) para todas as usinas, ao longo do período analisado (2019 a 2022). Observa-se uma redução no nível de precipitação para algumas usinas, e uma redução considerável no nível de geração para todas as usinas.

longo prazo, e portanto é importante analisar o cenário de 2021 como um todo, não só no período de seca. Esse resultado mostra como a redução nos níveis de chuva já podia ser percebida no início do ano, ainda que de forma não tão intensa.

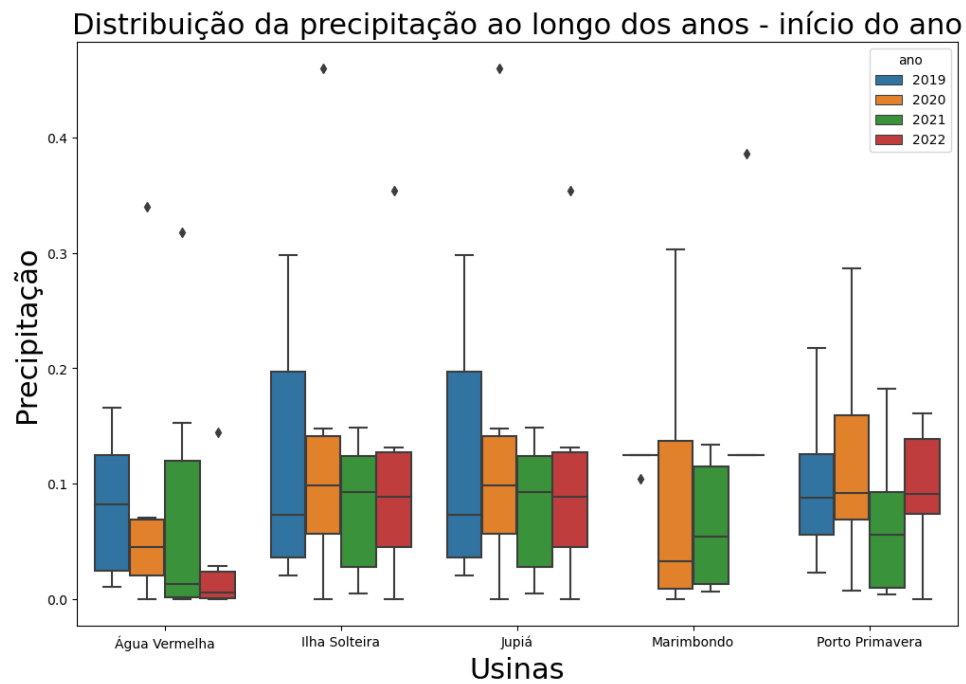
Por outro lado, a Figura 10 (b) mostra a evolução da precipitação para o período de seca, que aqui foi considerado entre os meses de julho e dezembro de cada ano. Esse resultado deve ser analisado sobre dois pontos de vista distintos: primeiramente, é fato que para a maior parte das usinas não houve diferença significativa entre os níveis de precipitação se analisarmos apenas os anos de 2020 e 2021 diretamente. Por outro lado, se compararmos os anos de 2021 e 2022, para todas as usinas com exceção de Água Vermelha houve um aumento no nível de chuvas considerável para o período de seca. Tomando a usina de Ilha Solteira (a maior do estado de São Paulo) como base, é possível observar um aumento de cerca de 40% no nível de precipitação médio, que foi de 0.14 para 0.19. Esse tipo de resultado apenas reforça o argumento que está sendo utilizado ao longo de todo o trabalho: a influência da precipitação no nível de geração não pode ser vista de maneira isolada, mas sim do ponto de vista macro, analisando os períodos antes e depois do ano de 2021 (nesse caso, os anos de 2020 e 2022 respectivamente). Uma análise mais detalhada da reação direta entre os níveis de geração e precipitação será feita na Seção 4.4.

4.4 Relação entre geração e precipitação

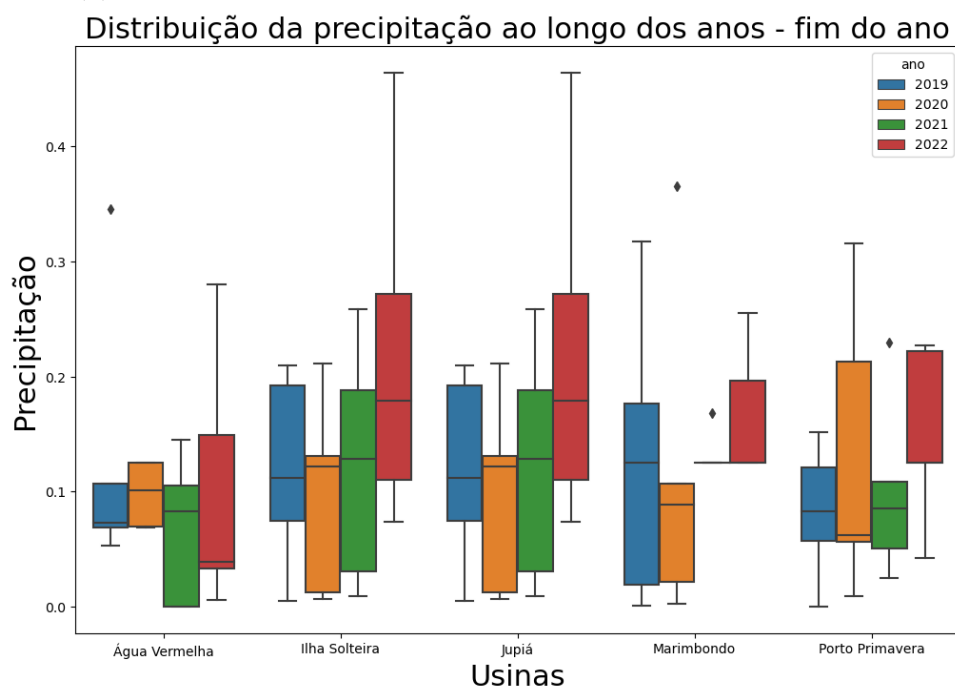
Nesse conjunto de resultados, o objetivo será verificar a influência entre a geração de energia de usinas hidrelétricas e o nível de precipitação de suas usinas meteorológicas mais próximas. Para isso foi feita uma análise de regressão por meio do método dos mínimos quadrados, tomando o nível de geração como variável resposta (eixo y) e precipitação como co-variável (eixo x). Nesse caso, é importante notar que os resultados das seções anteriores já deixaram claro que não existe uma relação entre o nível de geração e de precipitação de um mesmo período de tempo (um mesmo mês, por exemplo). Dessa forma, nessa seção, três co-variáveis diferentes foram analisadas, verificando a influência das mesmas no nível de geração em cada caso:

1. Média do nível de chuva dos 3 meses anteriores (incluindo o mês atual de análise)
2. Média do nível de chuva dos 6 meses anteriores (incluindo o mês atual de análise)
3. Média do nível de chuva dos 12 meses anteriores (incluindo o mês atual de análise)

Por meio dessa filtragem de co-variável, é possível verificar a influência da precipitação não do ponto de vista imediato, mas sim de longo prazo. Isso vai de acordo com a forma com a qual ocorre o despacho de energia no território nacional, onde algoritmos de curto, médio e longo prazo são utilizados para selecionar o nível de despacho de cada usina hidrelétrica.



(a) Evolução da precipitação para todas as usinas - início do ano



(b) Evolução da precipitação para todas as usinas - fim do ano

Figura 10 – Evolução de precipitação para todas as usinas, ao longo do período analisado (2019 a 2022). Na figura (a), temos o período de início de ano (meses de Janeiro a Junho). Na figura (b), temos o período de fim de ano (meses de Julho a Dezembro).

As Figuras 12 a 15 apresentam as análises de mínimos quadrados realizadas para estabelecer as linhas que melhor representam a relação entre geração e precipitação. Cada figura possui três sub figuras, onde (a) mostra a média de 3 meses, (b) mostra a média de 6 meses e (c) mostra a média de 12 meses. Todos os períodos de extração de dados, de 2019 a 2022, foram considerados nessas análises.

Em relação à influência da média móvel de 3 meses, verificou-se que apenas as usinas de Marimbondo e Porto Primavera apresentaram efeitos positivos significativos, indicando uma relação positiva entre geração e precipitação durante o período analisado. No caso das usinas de Jupia e Ilha Solteira, não foi observada uma relação clara entre as duas variáveis, conforme evidenciado pela linha reta no gráfico de dispersão. Quanto à usina de Água Vermelha, foi observada uma linha levemente positiva, porém essa relação parece ser mais um fator de incerteza nos dados coletados do que uma relação positiva em si. Isso é reforçado pelo fato de que a área sombreada, que representa o desvio padrão da reta estimada, é consideravelmente maior em Água Vermelha, especialmente para níveis mais altos de precipitação, que teoricamente deveriam ter uma influência mais positiva na geração.

Ao analisar a influência da média móvel de 6 meses, observou-se um comportamento semelhante ao da média de 3 meses. As usinas de Marimbondo e Porto Primavera apresentaram efeitos positivos significativos, enquanto a usina de Água Vermelha teve um efeito positivo reduzido. Já as usinas de Ilha Solteira e Jupia não mostraram efeitos positivos significativos. De fato, é importante ressaltar que, no caso da usina de Ilha Solteira, foi observado um efeito ligeiramente negativo, sugerindo que a geração diminui com o aumento da precipitação. Novamente, é fundamental destacar que a curva aproximada possui uma área sombreada bastante ampla, indicando uma grande incerteza e alto desvio padrão. Portanto, esse resultado deve ser interpretado com cautela. Ao observar a Figura 12 (b), mesmo que a reta seja levemente descendente, os pontos estão dispersos sem uma relação clara entre as duas variáveis (geração e precipitação), o que indica que não parece existir uma relação linear evidente entre elas.

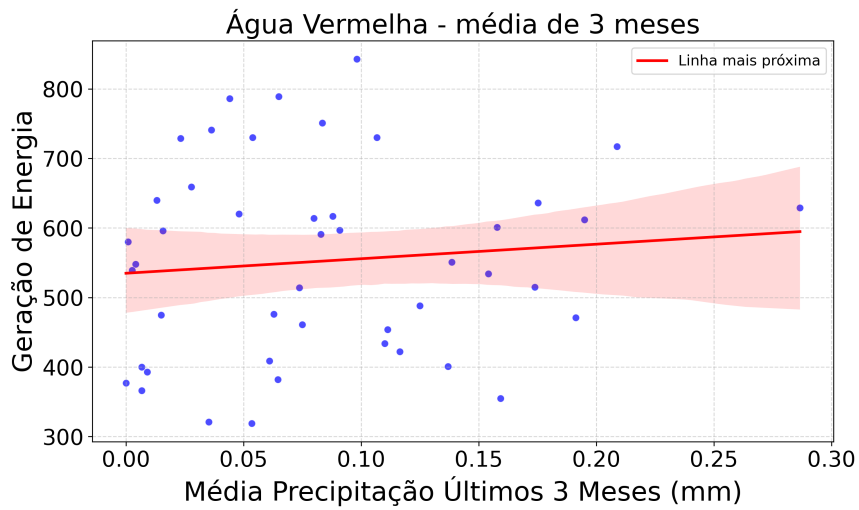
Por fim, o último conjunto de resultados refere-se à média de 12 meses. Nesse caso, é evidente, por meio da análise das figuras, que existe uma relação positiva entre geração e precipitação para todas as usinas analisadas. Essa relação é consistente e demonstra que, em média, um aumento na precipitação está associado a um aumento na geração de energia hidrelétrica.

Esses resultados fornecem insights importantes sobre a relação entre a precipitação e a geração de energia hidrelétrica nas usinas estudadas. As análises mostram que essa relação pode variar dependendo do período considerado, com diferentes usinas apresentando respostas distintas. É crucial levar em conta as incertezas e os desvios padrão observados nas estimativas, especialmente em casos onde a relação não é linear ou os dados são mais

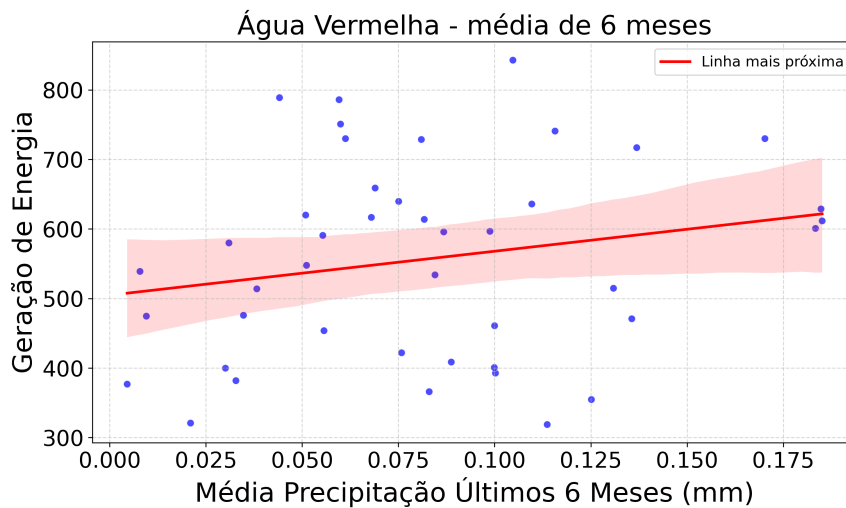
dispersos.

Essas observações destacam a importância de considerar não apenas a precipitação atual, mas também médias móveis de diferentes períodos para uma análise mais abrangente da influência da chuva na geração de energia hidrelétrica. Ao considerar múltiplas escalas temporais, é possível obter uma compreensão mais completa e precisa dos padrões de geração de energia em relação às condições de precipitação.

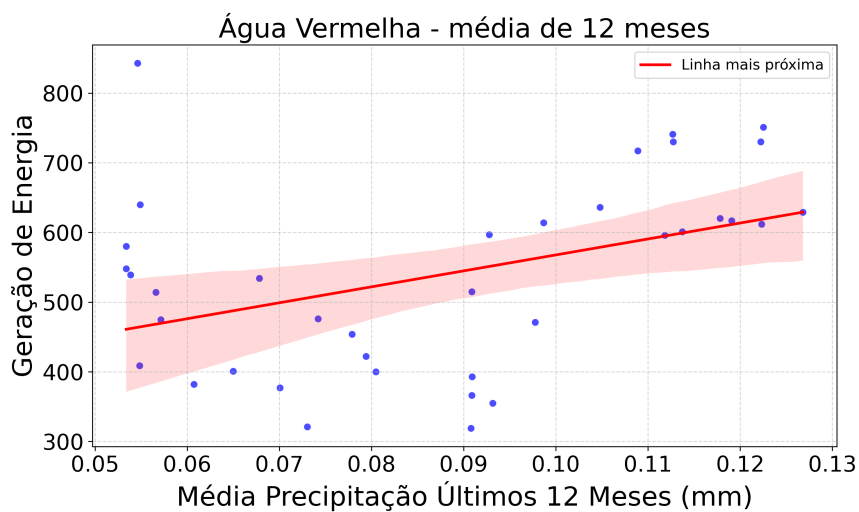
No geral, os resultados sugerem que a precipitação desempenha um papel significativo na geração de energia hidrelétrica, embora essa relação possa variar entre as usinas e dependa do período de análise. Essas descobertas contribuem para uma melhor compreensão dos fatores que influenciam a geração de energia hidrelétrica e podem auxiliar na tomada de decisões relacionadas à gestão de recursos hídricos e planejamento energético.



(a) Relação entre geração e precipitação - média de 3 meses

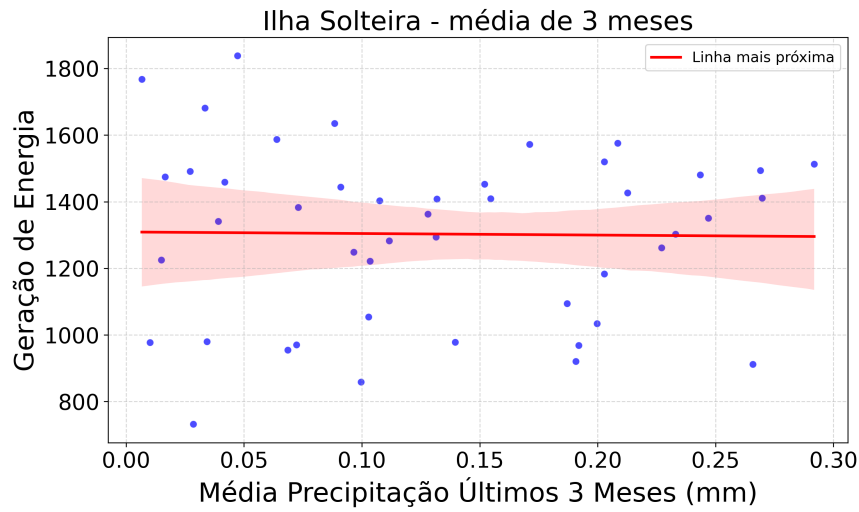


(b) Relação entre geração e precipitação - média de 6 meses

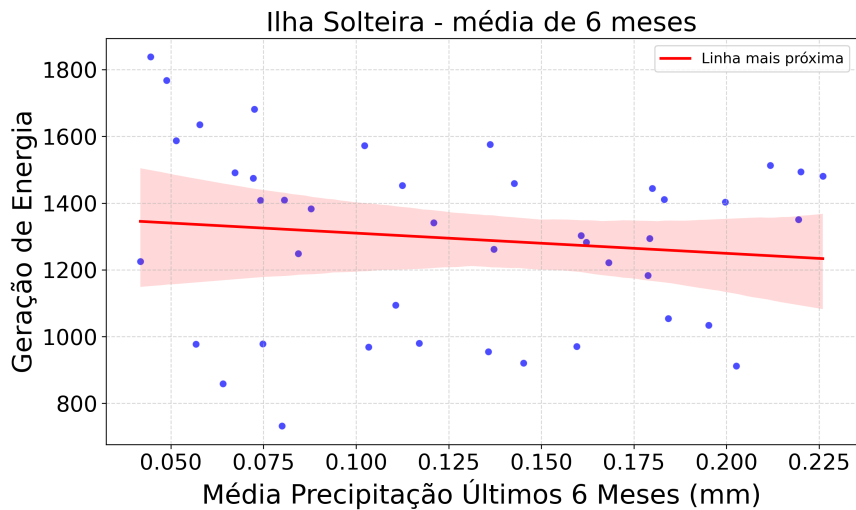


(c) Relação entre geração e precipitação - média de 12 meses

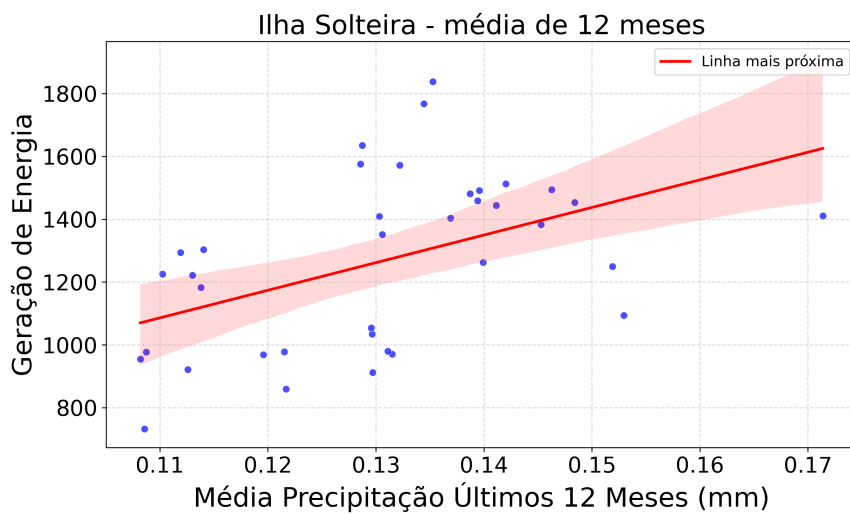
Figura 11 – Análise da influência entre geração e precipitação - Usina de Água Vermelha



(a) Relação entre geração e precipitação - média de 3 meses

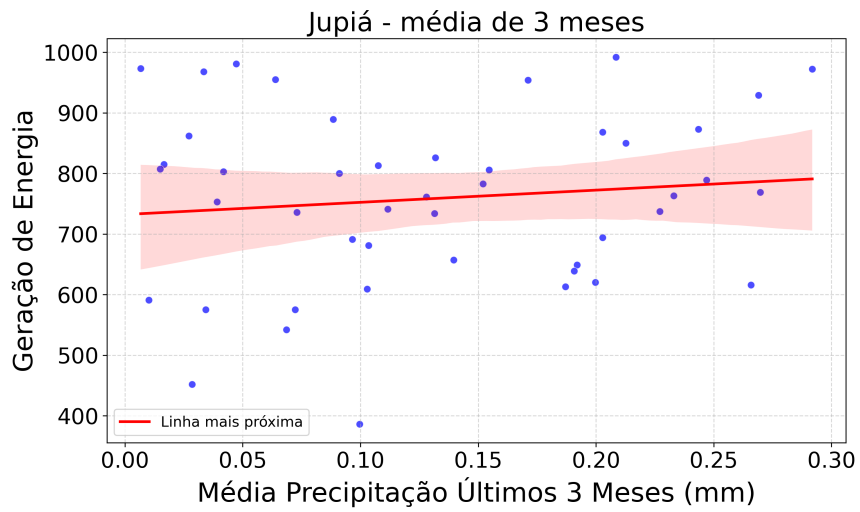


(b) Relação entre geração e precipitação - média de 6 meses

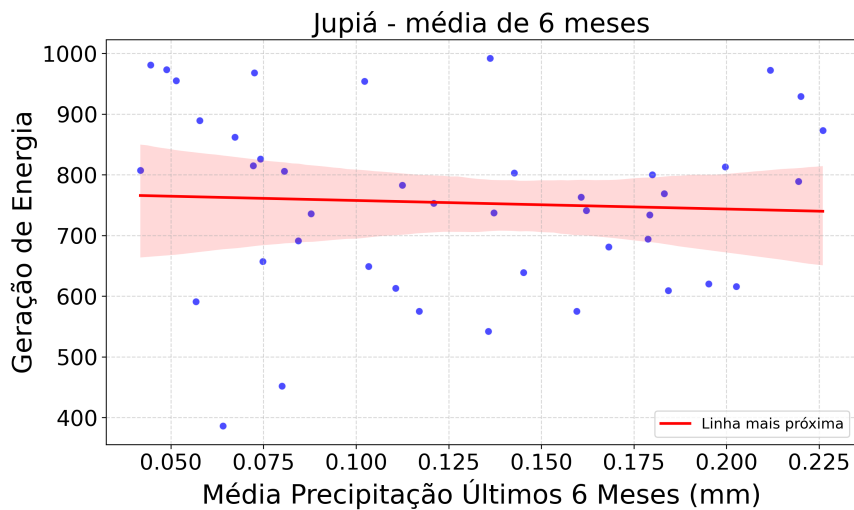


(c) Relação entre geração e precipitação - média de 12 meses

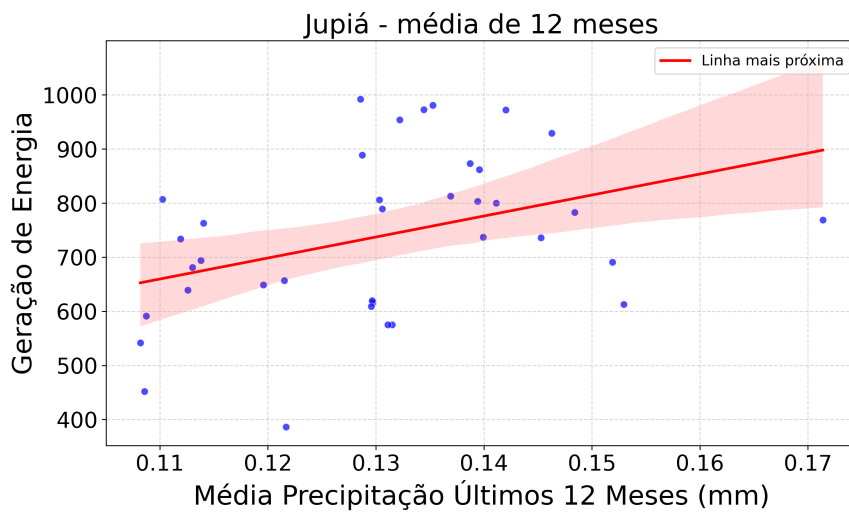
Figura 12 – Análise da influência entre geração e precipitação - Usina de Ilha Solteira



(a) Relação entre geração e precipitação - média de 3 meses

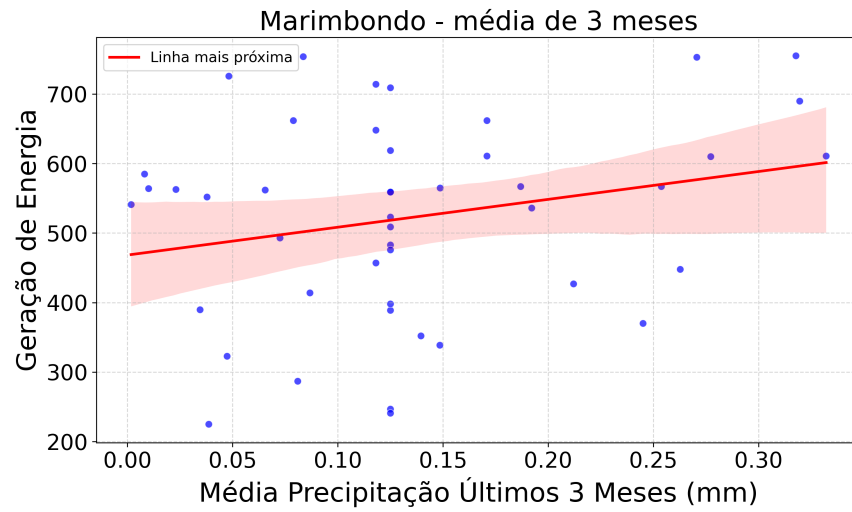


(b) Relação entre geração e precipitação - média de 6 meses

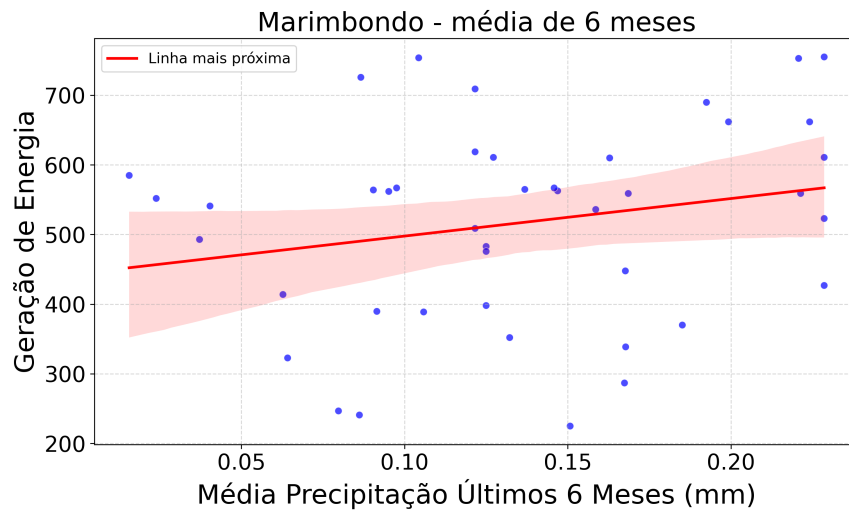


(c) Relação entre geração e precipitação - média de 12 meses

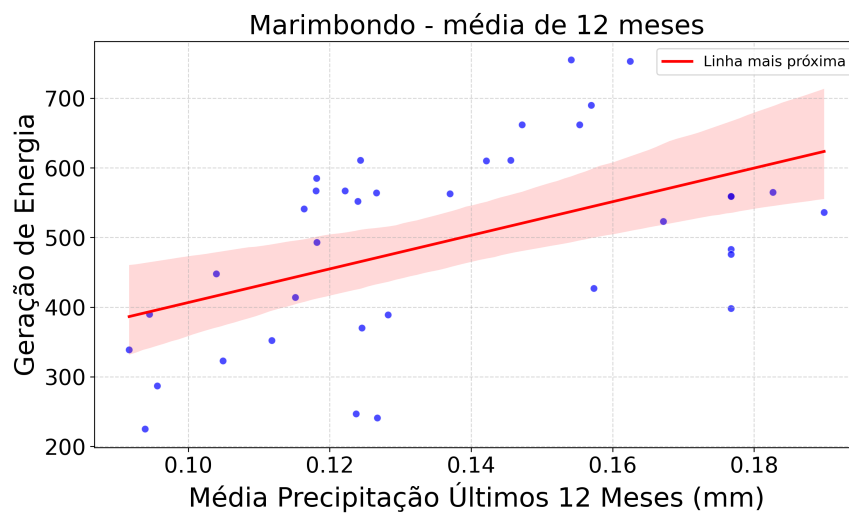
Figura 13 – Análise da influência entre geração e precipitação - Usina de Jupirá



(a) Relação entre geração e precipitação - média de 3 meses

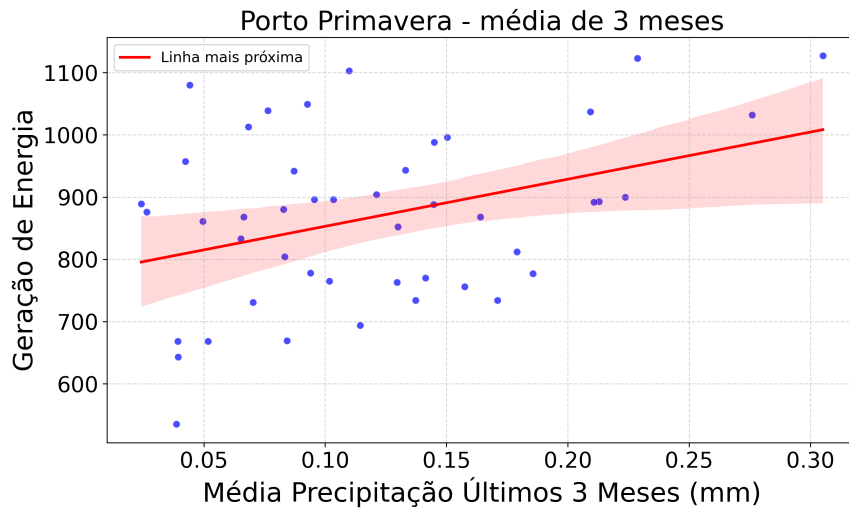


(b) Relação entre geração e precipitação - média de 6 meses

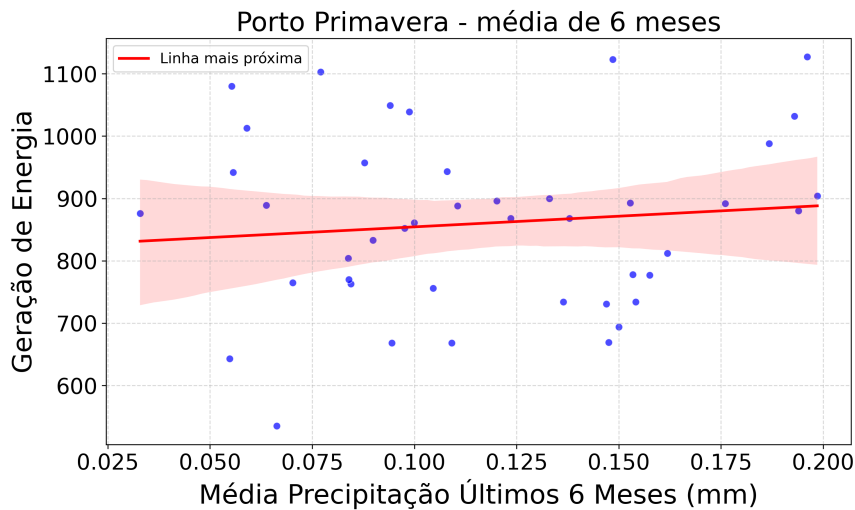


(c) Relação entre geração e precipitação - média de 12 meses

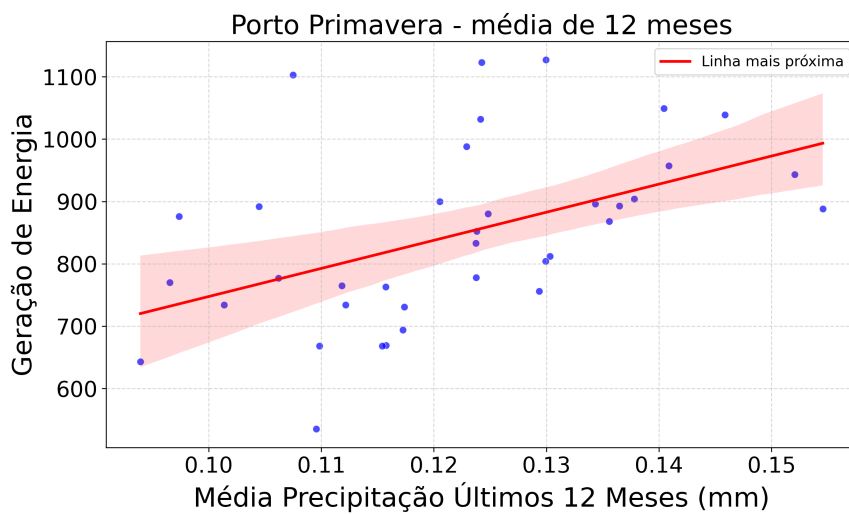
Figura 14 – Análise da influência entre geração e precipitação - Usina de Marimbondo



(a) Relação entre geração e precipitação - média de 3 meses



(b) Relação entre geração e precipitação - média de 6 meses



(c) Relação entre geração e precipitação - média de 12 meses

Figura 15 – Análise da influência entre geração e precipitação - Usina de Porto Primavera

5 CONCLUSÃO

Em conclusão, este estudo analisou a relação entre a precipitação e a geração de energia hidrelétrica em usinas selecionadas. Os resultados obtidos fornecem insights valiosos sobre a influência da chuva na produção de energia hidrelétrica e destacam a importância de considerar diferentes escalas temporais para uma compreensão abrangente desse fenômeno.

Ao investigar a relação entre a precipitação e a geração de energia ao longo de períodos de 3, 6 e 12 meses, observamos que a influência da chuva varia entre as usinas. Algumas usinas mostraram uma relação positiva entre a precipitação e a geração, indicando que um aumento na chuva está associado a um aumento na produção de energia hidrelétrica. No entanto, para outras usinas, essa relação não foi tão evidente, sugerindo que outros fatores podem influenciar a produção de energia nesses casos.

É importante ressaltar que a incerteza e o desvio padrão observados nos resultados destacam a complexidade da relação entre a precipitação e a geração de energia. Essa variabilidade pode ser influenciada por diversos fatores, como características geográficas, infraestrutura das usinas e características específicas de cada bacia hidrográfica. Portanto, é essencial considerar esses aspectos ao interpretar os resultados e tomar decisões relacionadas ao planejamento e gestão de recursos hídricos.

Além disso, os resultados deste estudo reforçam a importância de monitorar continuamente as condições climáticas e hidrológicas para prever e gerenciar adequadamente a produção de energia hidrelétrica. A compreensão das relações entre a precipitação e a geração de energia em diferentes períodos pode auxiliar na tomada de decisões estratégicas, como o gerenciamento do uso de reservatórios e a adoção de medidas para lidar com períodos de seca prolongada.

No contexto das mudanças climáticas e da necessidade de transição para fontes de energia mais sustentáveis, os resultados deste estudo são relevantes para o planejamento energético e a tomada de decisões relacionadas à matriz energética. A compreensão das relações entre a precipitação e a geração de energia hidrelétrica contribui para uma melhor gestão dos recursos hídricos e pode subsidiar políticas públicas voltadas para a segurança energética e a redução de impactos ambientais.

Em suma, este estudo ressalta a complexidade da relação entre a precipitação e a geração de energia hidrelétrica, evidenciando a necessidade de considerar diferentes escalas temporais e os diversos fatores que influenciam esse processo. Os resultados obtidos contribuem para o conhecimento científico sobre a produção de energia hidrelétrica e podem orientar ações voltadas para a sustentabilidade energética e o enfrentamento dos

desafios decorrentes das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- BARDELIN, C. E. A. **Os efeitos do racionamento de energia elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 com ênfase no consumo de energia elétrica**. 2004. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2004.
- BORGES, F. Q. Crise de energia elétrica no brasil-uma breve reflexão sobre a dinâmica de suas origens e resultados. **RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218**, v. 2, n. 10, p. e210809–e210809, 2021.
- CORRÊA, M. L. Contribuição para uma história da regulamentação do setor de energia elétrica no brasil: o código de águas de 1934 e o conselho nacional de águas e energia elétrica. **Política & Sociedade**, v. 4, n. 6, p. 255–292, 2005.
- FARIAS, L. M.; SELLITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**, v. 12, n. 17, p. 07–16, 2011.
- FERREIRA, A. L.; SILVA, A. F. C. da; SIMONINI, Y. Os donos da luz: sistemas de gestão e redes técnicas no território brasileiro. o caso da amforp (1927-1939). **Agricultura**, v. 817, n. 23, p. 6, 1890.
- GOMES, A. C. S. *et al.* O setor elétrico. DbA, 2002.
- HUNT, J. D.; STILPEN, D.; FREITAS, M. A. V. de. A review of the causes, impacts and solutions for electricity supply crises in brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 88, p. 208–222, 2018.
- JUNIOR, N. L. S. A conexão entre crise econômica e crise ambiental no brasil. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2016.
- Luiz Eduardo Oliveira. Planejamento dinundefinedmico de expansÃo em sistemas de transmissÃo de energia elÉtrica via algoritmos híbridos de otimizaunderdefinedÃo. Unpublished, 2017. Disponível em: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.23313.94560>.
- MENDONÇA, A. K. D. S.; BORNIA, A. C. OPORTUNIDADES PARA a DIFUSão DA ENERGIA eÓLICA e SOLAR EM SISTEMAS ISOLADOS NO BRASIL: BARREIRAS e FACILIDADES EVIDENCIADOS NA LITERATURA. **MIX Sustentável**, Mix Sustentavel, v. 5, n. 3, p. 81–92, ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.mix2019.v5.n3.81-92>.
- NETO, T. E. Uma análise histórico-jurídica do código de águas (1934) e o início da presença do estado no setor elétrico brasileiro no primeiro governo vargas. **Revista Eletrônica História em Reflexão**, v. 9, n. 17, 2015.
- ROMEIRO, D. L. Escolha de tecnologias de geração elétrica: o índice custo benefício e a competitividade de termelétricas a gás natural no brasil. **IE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil**, 2014.
- SAES, A. M. Light versus cbee: Energia elétrica na formação da industria brasileira(1900–1920). **Capitalismo e história da eletriZicação**, v. 1930, 1890.

SILVA, M. S. da. A estatização do setor de energia elétrica: embates entre entreguistas e tupiniquins no centro diretivo do segundo governo vargas (1951-54). **Mediações - Revista de Ciências Sociais**, Universidade Estadual de Londrina, v. 10, n. 1, p. 157, jul. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/2176-6665.2005v10n1p157>.

SOUZA, N. M. e. O planejamento econômico no brasil: considerações críticas. **Revista de Administração Pública**, FapUNIFESP (SciELO), v. 46, n. 6, p. 1671–1720, dez. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0034-76122012000600012>.

TOSCANO, A. E. Comparação entre os modelos newave e odin no planejamento energético do sistema interligado nacional. **Unicamp, Campinas, SP: Dissertação de Mestrado**, 2009.