

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

KARINE DA SILVA

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS VOLUMES DOS RESERVATÓRIOS NA  
GERAÇÃO DE ENERGIA: ESTUDO QUANTITATIVO DOS RESERVATÓRIOS  
LOCALIZADOS NA BACIA DO RIO PARANAÍBA**

CAMPO MOURÃO

2022

**KARINE DA SILVA**

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS VOLUMES DOS RESERVATÓRIOS NA  
GERAÇÃO DE ENERGIA: ESTUDO QUANTITATIVO DOS RESERVATÓRIOS  
LOCALIZADOS NA BACIA DO RIO PARANAÍBA**

**Influence of the Variation in Reservoir Volumes on Energy Generation: A  
Quantitative Study of Reservoirs Located in the Parnaíba River Basin**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr<sup>a</sup>. Paula Cristina de Souza.

Coorientador(a): Prof. Dr. Eudes José Arantes.

**CAMPO MOURÃO**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**KARINE DA SILVA**

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS VOLUMES DOS RESERVATÓRIOS NA  
GERAÇÃO DE ENERGIA: ESTUDO QUANTITATIVO DOS RESERVATÓRIOS  
LOCALIZADOS NA BACIA DO RIO PARANAÍBA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 25 de novembro de 2022

---

Prof<sup>ª</sup>. Paula Cristina de Souza

Titulação Doutora

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Eudes José Arantes

Titulação Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Helton Rogério Mazzer

Titulação Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof<sup>ª</sup>. Maria Cristina Rodrigues Halmeman

Titulação Doutora

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

*Dedico este trabalho à minha família, pelos momentos de ausência.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Eraldo e Jacilene, por serem meus exemplos de resiliência e honestidade; por me criarem e apoiarem minha trajetória acadêmica.

Ao meu irmão, Kaue, pelo companheirismo e por despertar o meu melhor.

Aos familiares que contribuíram de alguma forma para minha formação.

Às minhas amigas do Instituto Federal de São Paulo: Ana Paula Tamashiro, Isabela Fonseca e Ursula Nunes, por serem minha rede de apoio e motivação.

Às minhas companheiras de morada no Paraná, Ana Camila e Eloísa, que dividiram alegrias e dificuldades comigo, tornando-se irmãs para mim.

Aos amigos que fiz durante a graduação: Felipe Irikura, Milton Manzoni, Diego Souza, Maicon Vieira, Adolfo Borges, Vinícius Pinheiro, André Andrade, Miqueias Fernando, Isabela Versari, Shoiti Ueda, Patricia Lemanski, Karoline Sarmento e Andrei Andrade.

Aos professores Paula, Eudes e Helton por toda dedicação e colaboração no desenvolvimento do presente estudo.

Aos professores da UTFPR Campo Mourão, por todo conhecimento transmitido durante a graduação. Sobretudo, à professora Marli Ap. Duque e ao professor Jorge Góes, que me acolheram.

Aos meus colegas de trabalho na Auren Energia, que me ofereceram uma oportunidade de desenvolvimento profissional e me apresentaram o Setor Elétrico Brasileiro. Em especial, à Carolina Bernardes, Lorena Ferreira, Rubinei Machado, Denis Dinardi e Flávio Guimarães, que colaboraram com fundamentação teórica e discussão dos resultados deste trabalho.

*Eu denomino meu campo de Gestão do  
Conhecimento, mas você não pode  
gerenciar conhecimento. Ninguém pode.  
O que você pode fazer, o que a empresa  
pode fazer é gerenciar o ambiente que  
otimize o conhecimento.  
(DAVENPORT; PRUSAK, 2012).*

## RESUMO

A construção de um reservatório proporciona benefícios econômicos e sociais, porém mesmo com uma gestão eficaz, a variação de seu volume interfere tanto na qualidade como na quantidade de água, ocasionando redução na geração hidrelétrica. O presente trabalho de conclusão de curso (TCC) tem como objetivo analisar os fatores relevantes que contribuem na variação dos volumes dos reservatórios interligados a usinas hidrelétricas localizados na bacia do rio Paranaíba no período de 2000 e 2021. O meio ambiente, fatores climáticos, temperatura, umidade, evaporação, precipitação e vazão são alguns dos aspectos que condicionam à caracterização da variação do volume de um reservatório. A metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa fundamenta-se em históricos de operação, informações geográficas, e capacidade dos reservatórios estudados, a partir de consultas de documentos originados de instituições governamentais. Os resultados e conclusões deste estudo apontam para contribuição de um debate acerca da eficiência da capacidade de produção do reservatório, tendo em vista os fatores de que dele dependem para sua manutenção.

**Palavras-chave:** Bacia hidrográfica; Reservatório; Hidrelétrica; Geração de Energia.

## **ABSTRACT**

The construction of a reservoir provides economic and social benefits, but even with effective management, the change in volume is one of the factors that affects both the quality and quantity of water, causing reduction in the generation of hydroelectric power. This present Final Graduation Project (TCC) intends to analyze the relevant factors contributing to the variation in reservoir volumes interconnected to hydroelectric plants located in the Paranaíba River basin in the period 2000 and 2021. The environment, climate, temperature, humidity, evaporation, precipitation, and flow are some of the aspects that affects the characterization of the variation in the volume of a reservoir. The methodology used in the research is based on historical operating, geographic information, and capacity of the reservoirs, from documents originated queries from government institutions. The findings and conclusions of this study point to the contribution of a debate about the efficiency of reservoir production capacity considering the factors that depend on it for their maintenance.

**Keywords:** Watershed; Reservoirs; Hydropower; Power Generation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - CICLO HIDROLÓGICO .....	19
FIGURA 2 - PRECIPITAÇÃO ACUMULADA NO ANO (MM) - 1961 A 1990.....	21
FIGURA 3 - PRECIPITAÇÃO ACUMULADA - QUATRO ESTAÇÕES.....	22
FIGURA 4 - RESPOSTA HIDROLÓGICA DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA .....	23
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DE BACIA HIDROGRÁFICA .....	23
FIGURA 6 - MEDIDAS DE COMPRIMENTO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA.....	25
FIGURA 7 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE REDE DE DRENAGEM.....	28
FIGURA 8 - DETERMINAÇÃO DO FATOR DE FORMA .....	30
FIGURA 9 - REGIÕES HIDROGRÁFICAS DO BRASIL.....	35
FIGURA 10 - DENSIDADE DEMOGRÁFICA.....	36
FIGURA 11 - SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL (SIN).....	38
FIGURA 12 - CAPACIDADE INSTALADA POR SUBMERCADO .....	39
FIGURA 13 - GERAÇÃO DE UHES POR SUBSISTEMA (2000-2021).....	41
FIGURA 14 - ESQUEMA TÍPICO DE UMA INSTALAÇÃO HIDRELÉTRICA .....	41
FIGURA 15 - COMPONENTES BÁSICOS DE UM RESERVATÓRIO.....	44
FIGURA 16 - NÍVEIS E VOLUMES CARACTERÍSTICOS DE UM RESERVATÓRIO.....	46
FIGURA 17 - PERFIL ESQUEMÁTICO DE APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO .....	47
FIGURA 18 - LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO PARANAÍBA.....	52
FIGURA 19 - BACIAS AFLUENTES DO RIO PARANAÍBA .....	53
FIGURA 20 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA BACIA DO RIO PARANAÍBA .....	55
FIGURA 21 - USINAS INTEGRANTES DO SIN NA REGIÃO SE/CO.....	56
FIGURA 22 - CLIMOGRAMA DA BACIA DO RIO PARANAÍBA .....	62
FIGURA 23 - CAPACIDADE INSTALADA DE UHES NA BACIA.....	63
FIGURA 24 - VOLUME ÚTIL UHE CORUMBÁ I (2000-2021) .....	64
FIGURA 25 - GERAÇÃO DA UHE CORUMBÁ I (2000-2021) .....	64
FIGURA 26 - VOLUME ÚTIL UHE CORUMBÁ III (2008-2021) .....	66
FIGURA 27 - GERAÇÃO DA UHE CORUMBÁ III (2008-2021) .....	67

FIGURA 28 - VOLUME ÚTIL UHE CORUMBÁ IV (2005-2021).....	68
FIGURA 29 - GERAÇÃO DA UHE CORUMBÁ IV (2005-2021).....	69
FIGURA 30 - TEMPERATURAS MÁXIMAS NO BRASIL .....	70
FIGURA 31 - VOLUME ÚTIL UHE ESPORA (2006-2021).....	72
FIGURA 32 - GERAÇÃO DA UHE ESPORA (2000-2021).....	72
FIGURA 33 - VOLUME ÚTIL UHE MIRANDA (2000-2021) .....	74
FIGURA 34 - GERAÇÃO DA UHE MIRANDA (2000-2021).....	76
FIGURA 35 - VOLUME DO RESERVATÓRIO UHE EMBORCAÇÃO .....	77
FIGURA 36 - GERAÇÃO DA UHE EMBORCAÇÃO (2000-2021).....	77
FIGURA 37 - VOLUME UHE ITUMBIARA (2000-2021).....	79
FIGURA 38 - GERAÇÃO DA UHE ITUMBIARA (2000-2021) .....	80
FIGURA 39 - VOLUME ÚTIL UHE NOVA PONTE (2000-2021) .....	81
FIGURA 40 - GERAÇÃO DA UHE NOVA PONTE (2000-2021) .....	83
FIGURA 41 - VOLUME UHE SÃO SIMÃO (2000-2021).....	84
FIGURA 42 - GERAÇÃO DA UHE SÃO SIMÃO (2000-2021) .....	86
FIGURA 43 - CARACTERIZAÇÃO DO USO DO SOLO (2000-2020).....	87

## **LISTA DE QUADROS E TABELAS**

QUADRO 1 - CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS	24
QUADRO 2 - CLASSIFICAÇÃO QUANTO À DENSIDADE DE DRENAGEM.....	32
QUADRO 3 - REGIÕES HIDROGRÁFICAS E DISPONIBILIDADES DE ÁGUA.....	37
QUADRO 4 - PRINCIPAIS FONTES DE DADOS .....	48
QUADRO 5 - INTERPRETAÇÃO DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO .....	50
QUADRO 6 - PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS .....	51
QUADRO 7 - COMPORTAMENTO DO RESERVATÓRIO DA UHE CORUMBÁ I.....	65
QUADRO 8 - COMPORTAMENTO DA GERAÇÃO NA UHE CORUMBÁ I .....	65
QUADRO 9 - COMPORTAMENTO DO RESERVATÓRIO DA UHE CORUMBÁ III.....	67
QUADRO 10 - COMPORTAMENTO DA GERAÇÃO NA UHE CORUMBÁ III.....	67
QUADRO 11 - COMPORTAMENTO DO RESERVATÓRIO DA UHE CORUMBÁ IV .....	70
QUADRO 12 - COMPORTAMENTO DA GERAÇÃO DA UHE CORUMBÁ IV .....	71
QUADRO 13 - COMPORTAMENTO DO RESERVATÓRIO DA UHE ESPORA.....	73
QUADRO 14 - COMPORTAMENTO DA GERAÇÃO DA UHE ESPORA.....	73
QUADRO 15 - GRAU DE CORRELAÇÃO – UHE ESPORA .....	73
QUADRO 16 - COMPORTAMENTO DO RESERVATÓRIO DA UHE MIRANDA .....	75
QUADRO 17 - COMPORTAMENTO DA GERAÇÃO DA UHE MIRANDA .....	76
QUADRO 18 - GRAU DE CORRELAÇÃO – UHE MIRANDA.....	77
QUADRO 19 - COMPORTAMENTO DO RESERVATÓRIO DA UHE EMBORCAÇÃO .....	78
QUADRO 20 - COMPORTAMENTO DA GERAÇÃO DA UHE EMBORCAÇÃO .....	78
QUADRO 21 - GRAU DE CORRELAÇÃO – UHE EMBORCAÇÃO.....	79
QUADRO 22 - COMPORTAMENTO DO RESERVATÓRIO DA UHE ITUMBIARA.....	79
QUADRO 23 - COMPORTAMENTO DA GERAÇÃO DA UHE ITUMBIARA .....	80
QUADRO 24 - GRAU DE CORRELAÇÃO – UHE ITUMBIARA.....	81
QUADRO 25 - COMPORTAMENTO DO RESERVATÓRIO DA UHE NOVA PONTE.....	82
QUADRO 26 - COMPORTAMENTO DA GERAÇÃO DA UHE NOVA PONTE .....	83
QUADRO 27 - GRAU DE CORRELAÇÃO – UHE NOVA PONTE.....	83

QUADRO 28 - COMPORTAMENTO DO RESERVATÓRIO DA UHE SÃO SIMÃO.....	85
QUADRO 29 - COMPORTAMENTO DA GERAÇÃO DA UHE SÃO SIMÃO.....	86
QUADRO 30 - GRAU DE CORRELAÇÃO – UHE SÃO SIMÃO .....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ANA</b>	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>CELG</b>	Centrais Elétricas de Goiás
<b>CEMIG</b>	Companhia Energética de Minas Gerais
<b>CGH</b>	Central Geradora Hidrelétrica
<b>CNAEE</b>	Conselho Nacional de Água e Energia Elétrica
<b>CONAMA</b>	Conselho Nacional do Meio Ambiente
<b>CPTEC</b>	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
<b>DF</b>	Distrito Federal
<b>EPE</b>	Empresa de Pesquisa Energética
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>INMET</b>	Instituto Nacional de Meteorologia
<b>INPE</b>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<b>MME</b>	Ministério de Minas e Energia
<b>NA</b>	Nível de Água
<b>ONS</b>	Operador Nacional do Sistema Elétrico
<b>PCH</b>	Pequena Central Hidrelétrica
<b>PRH</b>	Plano de Recursos Hídricos
<b>SIN</b>	Sistema Interligado Nacional
<b>SINGREH</b>	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
<b>SNIRH</b>	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
<b>TCC</b>	Trabalho de Conclusão de Curso
<b>UHE</b>	Usina Hidrelétrica
<b>USGS</b>	United States Geological Survey
<b>WWAP</b>	World Water Assessment Programme
<b>ZCAS</b>	Zona de Convergência do Atlântico Sul

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
<b>3 DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>19</b>
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>45</b>
<b>3.4.1 Usinas Hidrelétricas analisadas .....</b>	<b>52</b>
<b>3.4.2 UHE Corumbá I .....</b>	<b>54</b>
<b>3.4.3 UHE Corumbá I .....</b>	<b>54</b>
<b>3.4.4 UHE Corumbá II .....</b>	<b>54</b>
<b>3.4.5 UHE Nova Ponte.....</b>	<b>55</b>
<b>3.4.6 UHE Espora.....</b>	<b>55</b>
<b>3.4.7 UHE Miranda .....</b>	<b>55</b>
<b>3.4.8 UHE Emborcação.....</b>	<b>56</b>
<b>3.4.9 UHE Itumbiara .....</b>	<b>56</b>
<b>3.4.10 UHE São Simão.....</b>	<b>56</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>57</b>
<b>5.1 Aproveitamento Energético na Bacia do Rio Paranaíba.....</b>	<b>57</b>
<b>5.2. UHE Corumbá I .....</b>	<b>59</b>
<b>5.3. UHE Corumbá III .....</b>	<b>61</b>
<b>5.4 UHE Corumbá I .....</b>	<b>63</b>
<b>5.5. UHE Espora.....</b>	<b>67</b>
<b>5.6 UHE Miranda .....</b>	<b>69</b>
<b>5.7 UHE Emborcação.....</b>	<b>72</b>
<b>5.8 UHE Itumbiara .....</b>	<b>74</b>

	15
<b>5.9 UHE Nova Ponte.....</b>	<b>77</b>
<b>5.10 Análise Comparativa dos Parâmetros das UHEs .....</b>	<b>78</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial na vida de qualquer ser vivo e seu uso é responsável por uma série de fatores em uma sociedade. Antes de atingir sua destinação final, a água é mantida em reservatórios, os quais são responsáveis pelo seu armazenamento. Entretanto, as águas encontradas em reservatórios brasileiros vêm sofrendo redução volumétrica, além de estarem inseridos em uma complexidade devido a irregularidade espacial e temporal da disponibilidade hídrica.

A construção de um reservatório proporciona benefícios econômicos e sociais, porém, mesmo com uma gestão eficaz, a variação do seu volume é um dos fatores que interfere tanto na qualidade como na quantidade da água, ocasionando redução na geração de energia hidrelétrica. Esta variação está relacionada a diversos fatores, como: evaporação, clima, qualidade da água, assoreamento e tipos de uso (TUCCI et al., 2001).

Com o objetivo de assegurar uma gestão sistemática dos recursos hídricos, sem a distinção dos aspectos quantitativos e qualitativos, e o uso racional e integrado destes recursos foi instituído pela Lei Federal nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, a Política Nacional de Recursos Hídricos. Conforme o disposto no Artigo 1º, esta política se baseia nos fundamentos de que a água é um bem de domínio público, sendo classificada como um recurso natural limitado, dotado de valor econômico.

Conforme estudos realizados pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2009), o Brasil detém 12% das reservas de água doce do planeta, perfazendo 53% dos recursos hídricos da América do Sul, tem grande parte de suas fronteiras definida por corpos d'água – são 83 rios fronteirços e transfronteirços, além de bacias hidrográficas e de aquíferos. Tais condições naturais propiciaram que o sistema elétrico brasileiro se caracterizasse como um sistema hidrotérmico de grande porte com forte predominância de usinas hidroelétricas, que reúne características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial.

Sistemas energéticos como o brasileiro, cujo planejamento e a geração energética apresentam correlação com os estoques de água existentes nos reservatórios das usinas e suas afluentes, estão sujeitos a impactos advindos da variabilidade climática, tanto na produção de energia, em suas diversas formas,

quanto no seu consumo. Existe, portanto, uma relação de interdependência entre água e energia e decisões tomadas para a utilização e gestão da água e para a produção de energia podem ter impactos significativos, multifacetados e de grande alcance uns sobre os outros – sejam positivos como negativos (WWAP, 2014).

Esta dependência pode ser verificada através de dados do Sistema de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A capacidade total instalada no Brasil corresponde a 174.412,6 MW, sendo 58,56% fornecida por 218 usinas hidrelétricas (UHE), 424 pequenas centrais hidrelétricas (PCH). Entretanto, quando observamos dados sobre a geração efetiva, nota-se que a geração corresponde a 165.222,1 MW, sendo 65,7% proveniente de usinas hidrelétricas. Tal fato ressalta a dependência deste tipo de geração que está fortemente relacionado ao volume de água nos reservatórios, que vem diminuindo nos últimos anos devido a mudanças climáticas, sejam elas de causas naturais ou resultante de ações antrópicas.

Assim, a presente pesquisa tem por objetivo estabelecer relações entre recursos energéticos e hídricos com base na análise dos elementos que contribuem na variação do volume de quatro reservatórios da região Sudeste e Centro-Oeste localizados na sub-bacia do Rio Paranaíba, onde há elevada densidade demográfica, irregularidades climatológicas e intensa atividade econômica no período de 2000 a 2020.

## **2 OBJETIVOS**

A seguir serão apresentados os objetivos gerais do trabalho e na sequência relatado os objetivos específicos que serão cumpridos para desenvolver a pesquisa

### **2.1 Objetivo geral**

Analisar a influência da variação do volume dos reservatórios presentes na sub-bacia do rio Paranaíba vinculados ao Sistema Interligado Nacional (SIN) na geração de energia.

### **2.2 Objetivos específicos**

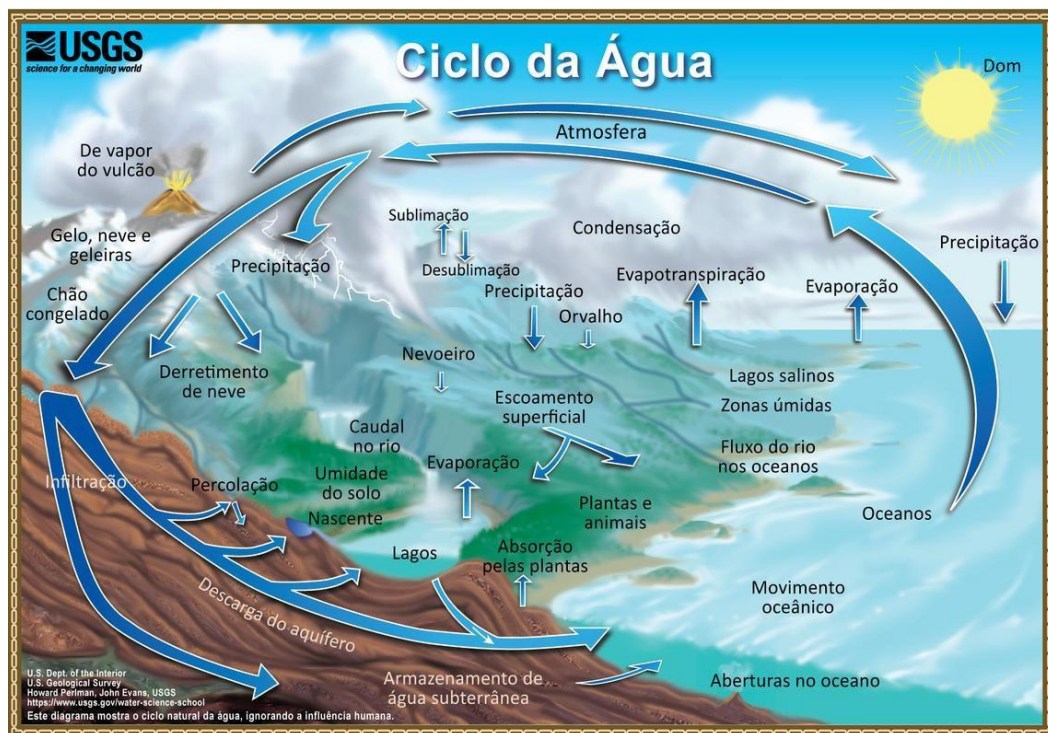
- Revisar as legislações vigentes relacionadas à gestão de recursos hídricos aplicadas a geração de energia;
- Descrever o ciclo hidrológico na bacia com auxílio de dados observados em estações meteorológicas;
- Caracterizar bacia hidrográfica e sua associação com o escoamento;
- Verificar o impacto de intervenções antrópicas no ciclo hidrológico da bacia;
- Comparar a potência instalada com a potência efetivamente gerada pelas usinas hidrelétricas dada as condições hidrológicas;

### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico, conforme ilustrado na Figura 1, é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre. Parte do ciclo hidrológico é constituída pela circulação da água no interior e na superfície de solos e rochas, bem como nos oceanos e seres vivos. Já a outra parte do ciclo ocorre na troposfera, que contém 90% da umidade atmosférica; acima desta camada, há a estratosfera, que, devido a presença de ozônio é responsável por regular a radiação solar, sendo a principal fonte de energia do ciclo hidrológico (TUCCI et al., 2001).

Figura 1 - Ciclo Hidrológico



Fonte: Adaptado de USGS (2018, p. 1)

Este ciclo permanente deve-se a radiação solar, que fornece energia para elevar a água da superfície terrestre para a atmosfera, sendo este processo denominado evaporação. A gravidade também exerce influência por fazer com que a água condensada supere a turbulência normal ou movimentos ascendentes do meio atmosféricos e atinja a superfície terrestre, caracterizando assim a precipitação, seja

na forma de água, neve ou granizo. Quando este volume incide sobre o solo ocorre a infiltração, já que este é um meio poroso, até atingir a saturação (escoamento subterrâneo) e gerar um escoamento superficial com o volume excedente, que constituem linhas de água que, por sua vez, se reúnem em rios até atingir os oceanos (TUCCI et al., 2001; CARVALHO; SILVA, 2006).

Segundo MOREIRA (2005), a precipitação é uma das principais informações utilizada na entrada de modelos chuva-vazão que, como parte fundamental do ciclo hidrológico, tem características próprias em decorrência da localização, intensidade e duração. A precipitação pode ocorrer como neve, granizo, orvalho, geada e chuva, sendo essa a principal forma.

Os processos relacionados ao ciclo hidrológico podem ser classificados de acordo com: as variáveis utilizadas na modelagem (determinísticos ou estocásticos); o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrado ou distribuídos), e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos).

Os processos determinísticos são aqueles que resultam na aplicação direta de leis da Física, Química ou Biologia, onde as variações espaço-temporais podem ser explicadas por um conjunto limitado de variáveis. Já os processos estocásticos são aqueles com componentes aleatórios que se superpõe a regularidades explicáveis, como a precipitação, radiação solar, evapotranspiração, a capacidade de infiltração, entre outros (NAGHETTINI; PINTO, 2007, p. 4).

Assim, pode-se verificar a interdependência entre os processos estocásticos e determinísticos, já que todos os eventos hidrológicos contêm algum componente estocástico, e quase sempre associados a algum componente determinístico relacionado a alguma regularidade ou padrão que pode explicar parcialmente o fenômeno estudado.

A cobertura vegetal tem um papel importante no ciclo hidrológico, pois o volume precipitado pode sofrer evaporação ao ser interceptado pelas folhas e caules. Além disso, quando este volume infiltra no solo, as raízes absorvem esta água e devolvem para a atmosfera na forma de transpiração. Por fim, o volume que as plantas não aproveitam, percola para o lençol freático e contribui para o escoamento de base dos

rios. Concomitantemente, a presença da vegetação reduz o impacto das gotas de chuva no solo, minimizando a erosão pois diminui a velocidade do escoamento superficial, aumenta a rugosidade hidráulica e as taxas de infiltração de água no solo (QUEIROZ, 2012).

Como ilustrado na Figura 1, o ciclo hidrológico apresenta mais fenômenos do que as citadas acima, porém os fenômenos de interesse para a Engenharia são: precipitação, evaporação e transpiração, escoamento superficial e escoamento subterrâneo. Embora este ciclo pareça um mecanismo contínuo, a realidade é bastante diferente, pois o movimento da água em cada uma das etapas do ciclo ocorre de modo bastante aleatório, variando tanto no espaço como no tempo.

Tendo em vista a vasta dimensão territorial do Brasil e sua localização entre dois trópicos, a variabilidade climática anual e sazonal no território brasileiro tem grande expressividade e se torna o maior fator condicionante da disponibilidade hídrica.

Segundo estudo realizado por QUADROS et al. (2014) para o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), pode-se observar o seguinte comportamento: no Norte do país um clima equatorial chuvoso, praticamente sem estação seca; no Nordeste há um clima semiárido em que a estação chuvosa, com baixos índices pluviométricos, é restrita a poucos meses; já as regiões Sudeste e Centro-Oeste sofrem influência tanto de sistemas tropicais como de latitudes médias, com estação seca bem definida no inverno e estação chuvosa de verão com chuvas convectivas; e o Sul sofre influência dos sistemas de latitudes médias, onde os sistemas frontais são os principais causadores de chuvas durante o ano.

Conforme exposto acima e baseado nas séries históricas de precipitação, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) caracterizou a climatologia anual da precipitação (Figura 2) e a variação sazonal para todo país (Figura 3). Assim, pode-se verificar que a distribuição do regime de chuvas não é uniformemente distribuída ao longo do ano, o que causa desequilíbrio e desencadeia ações de gerenciamento diversificadas para enfrentar a escassez ou o excesso de água.

Figura 2 - Precipitação acumulada no ano (mm) durante o período de 1961 a 1990.

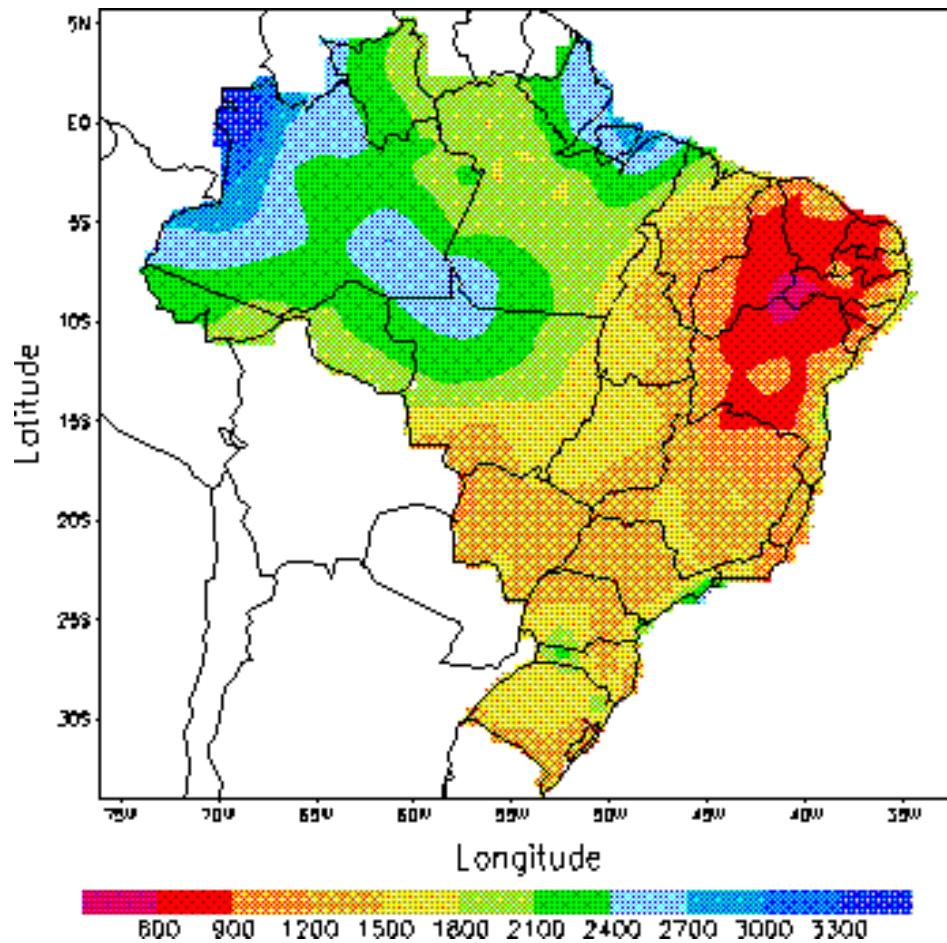


Figura 2 - Precipitação acumulada no Brasil para as quatro estações do ano no período de 1961 a 1990.

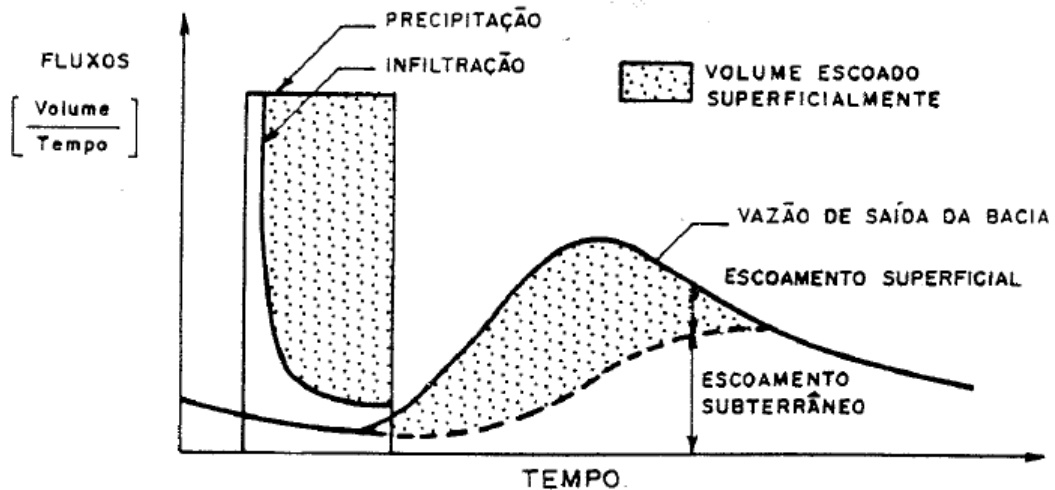
Fonte: INMET (2014, p.2).

### 3.2 Bacias Hidrográficas

As intensidades em que ocorrem os fenômenos hidrológicos podem ser analisadas em função do tempo, do espaço ou de ambos, em escalas geográficas que vão desde a global até a local, passando pela escala usual de bacia hidrográfica (NAGHETTINI, PINTO; 2007). Segundo TUCCI et al. (2001, p. 40), a bacia hidrográfica consiste num sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, levando em conta as perdas intermediárias, como os volumes evaporados, transpirados e infiltrados no solo.

Tal sistema físico consiste em um conjunto de terras que fazem a drenagem da água das precipitações para determinado curso de água. Conforme indicado na Figura 4, TUCCI (2001) afirma que o “papel hidrológico da bacia é transformar uma entrada de volume concentrada no tempo (precipitação) em uma saída de água (escoamento) de forma distribuída no tempo” (TUCCI et al., 2001, p. 42).

**Figura 4 - Resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica.**



Fonte: TUCCI et al., 2001, p. 42.

A formação da bacia hidrográfica dá-se por meio dos desníveis dos terrenos que direcionam os cursos da água, sempre das áreas mais altas para as mais baixas, devido ao efeito da gravidade associado ao relevo, que delimita a bacia, resultando na convergência do escoamento em um ponto denominado exutório conforme ilustrado na Figura 5. No contexto das obras hidráulicas, a bacia hidrográfica é definida a partir de uma seção transversal de interesse – podendo ser o local de captação pluvial, eixo de uma barragem ou seção fluvial caracterizada para observação de elementos do leito e/ou do escoamento fluvial (PIMENTEL, 2015).

**Figura 4 - Representação de Bacia Hidrográfica**



**Fonte: Pimentel (2015, p. 21).**

Do ponto de vista hidrológico, a classificação de bacias hidrográficas em bacia, sub-bacia e microbacia não pode ser realizada considerando apenas a área de drenagem total, já que apresentam efeitos dominantes na geração do deflúvio, tendo as microbacias como características distintas uma grande sensibilidade tanto às chuvas de alta intensidade, como também em relação ao uso do solo. Sendo assim, as alterações na quantidade e qualidade da água do deflúvio, em função de chuvas intensas e ou em função de mudanças no solo, são detectadas com mais sensibilidade em pequenas bacias do que nas grandes (TEODORO et al. 2007).

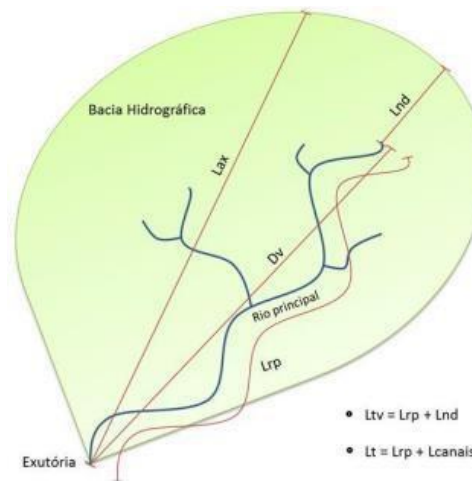
De acordo com levantamento bibliográfico realizado nas obras de TUCCI (2001), NAGHETTINI e PINTO (2007) e PIMENTEL (2015), a caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica tem como objetivo auxiliar a compreensão de análises hidrológicas e ambientais. Os principais atributos que compõem a caracterização de uma bacia hidrográfica estão elencados no Quadro 1 e serão detalhados a seguir.

**Quadro 1 - Características morfométricas de bacias hidrográficas**

Características Morfométricas	Tipos de Análises
Características geométricas	Área total, Perímetro total, Fator de forma e Coeficiente de compactidade
Características do relevo	Orientação, Declividade mínima, Declividade média, Declividade máxima, Altitude Mínima, Altitude média, Altitude máxima,
Características da rede de drenagem	Comprimento do curso d'água principal, Comprimento total dos cursos d'água, Sinuosidade, Densidade de drenagem e Ordem dos cursos d'água.

Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 6 ilustra as medidas de comprimento dentro de uma bacia hidrográfica que serão utilizados para calcular demais parâmetros.

**Figura 5 - Medidas de comprimento em uma bacia hidrográfica**

Fonte: Bier (2013, p. 37)

Onde:

$Ltv$  = Comprimento do talvegue (m);

$Lrp$  = Comprimento do rio principal (m);

$Lax$  = Comprimento axial da bacia (m);

$Lt$  = Comprimento total dos canais (m);

$Lcanal$  = Comprimento dos canais afluentes ao rio principal (m);

$Lnd$  = Distância da nascente do rio principal até o divisor de águas (m);

$Dv$  = Distância vetorial do rio principal (m);

Segundo LIMA (2009), a orientação de uma bacia define a direção feral para qual a declividade exposta, influenciando na evapotranspiração, devido a sua influência sobre a quantidade de radiação solar recebida pela bacia.

A relação entre o comprimento do rio principal ( $L_{rp}$ ) e o comprimento de talvegue ( $L_{tv}$ ) é denominado sinuosidade ( $Sin$ , adimensional, Equação (1)), responsável por influenciar a velocidade dos escoamentos. Quanto maior for o valor da sinuosidade, maior será o amortecimento das velocidades do escoamento.

$$Sin = \frac{L_{rp}}{L_{tv}} \quad (1)$$

A área de drenagem de uma bacia hidrográfica é definida como a área plana (projeção horizontal) incluindo seus divisores topográficos. Tal dimensão é fundamental para definir o potencial de geração de escoamento de uma bacia hidrográfica, uma vez que o seu valor multiplicado pela lâmina da chuva precipitada define o volume de água recebido pela bacia.

Já a forma da bacia a tem efeito sobre o comportamento hidrológico da bacia, como no tempo de concentração ( $T_c$ ), que é definido como o tempo, a partir do início da precipitação, necessário para que toda a bacia contribua com a vazão na seção de controle. Quanto menor o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica, mais rápida será a resposta de ocorrência da descarga ou vazão no exutório da bacia hidrográfica em decorrência de uma determinada precipitação.

Há inúmeras fórmulas, em função da região e das características da bacia para o cálculo do tempo de concentração, podendo-se citar a fórmula usual do Natural Resources Conservation Service (NRCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos conforme Equação 2.

Equação 2- Tempo de Concentração

$$t_c = 57 \frac{(L_{rp})^{0,385}}{L_{tv}} \quad (2)$$

Onde:

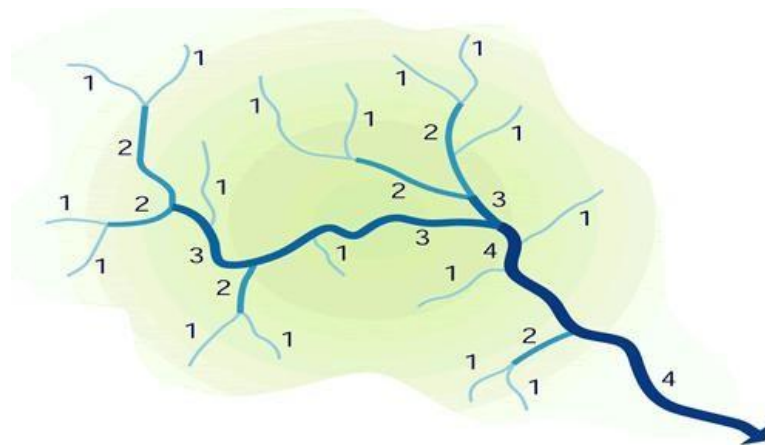
$t_c$  = tempo de concentração (min);

$L_{rp}$  = Comprimento do rio principal (m);

$H$  = diferença entre cotas do ponto mais afastado e do considerado (m).

Segundo PIMENTEL (2015), a ramificação da rede de drenagem pode ser avaliada através da ordem dos cursos d'água (*nordem*), que consiste num processo de classificação de um determinado curso d'água no conjunto total da bacia hidrográfica na qual se situa. A autora aborda o critério de Horton modificado por STRAHLER em 1952, em que consiste em numerar os rios de montante para jusante. Primeiramente, os cursos d'água que não recebem tributários são considerados de primeira ordem e a confluência de dois canais de mesma ordem resultam num curso d'água de ordem aumentada em uma unidade. Rios com ordens diferentes constituem trechos de jusante, na qual a ordem do maior dos dois será mantida. A ordem da bacia hidrográfica será igual à do trecho de maior ordem. Na Figura 7 está exemplificado esta metodologia.

Figura 7: Diagrama esquemático de uma rede de drenagem, classificando a ordem dos rios



Fonte: ANA (2012, p. 35).

Outro atributo é coeficiente de compacidade ( $Kc$ ) exposto na Equação 3, é a relação entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de mesma área que a bacia. Quanto mais próximo de 1 for o coeficiente de compacidade, mais a forma da bacia, irá se aproximar de um círculo, e menor será seu tempo de concentração. Tornando a bacia mais propensa a enchentes. Já para valores maiores que 1, a bacia apresenta boa drenagem.

## Equação 3- Coeficiente de Compacidade

$$K_c = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

Sendo:

$P$  = Perímetro (m);

$A$  = Área (km<sup>2</sup>);

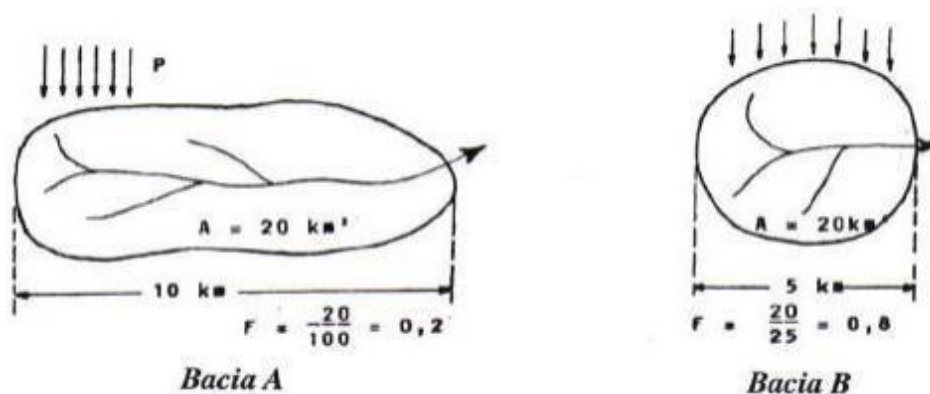
Também podemos citar o fator de forma ( $K_f$ ), que estabelece a relação entre a largura média e o comprimento axial ( $L_{AX}$ ) da bacia hidrográfica como demonstrado na Equação 4.

## Equação 4- Fator de forma

$$K_f = \frac{A}{L_{AX}^2} \quad (4)$$

Nesse caso, a forma da bacia hidrográfica é comparada à forma de um retângulo conforme ilustrado na Figura 8. Quanto menor o fator de forma, mais alongada é a bacia e maior será seu tempo de concentração.

Figura 8: Ilustração da determinação do fator de forma para duas bacias de mesma área.



Fonte: Lima (2009, p. 53).

HORTON (1932 apud LIMA 2009) definiu densidade de drenagem como a razão entre o comprimento total dos cursos d'água e a área da bacia hidrográfica e

está relacionado com o tempo gasto para a saída do escoamento superficial da bacia (Equação 5).

Equação 5- Densidade de Drenagem

$$D_d = \frac{L_t}{A} \quad (5)$$

Onde:

$D_d$  = densidade de drenagem ( $m/m^2$ )

$L_t$  = comprimento total de todos os cursos d'água (m);

$A$  = área da bacia hidrográfica ( $m^2$ )

Quanto à densidade de drenagem, as bacias podem ser classificadas conforme disposição no Quadro 2.

**Quadro 1: Classificação quanto à Densidade de Drenagem**

$Sin = LrpLtv$	(1)
$tc = 57 Lrp3Ltv0,385$	(2)
$Kc = 0,28. PA$	(3)
$Kf = ALAX2$	(4)
$Dd = LtA$	(5)
Baixa	$Dd \leq 5 \text{ km/km}^2$
Média	$5 \text{ km/km}^2 < Dd < 13,5 \text{ km/km}^2$
Alta	$13,5 \text{ km/km}^2 \leq Dd < 155,5 \text{ km/km}^2$
Muito Alta	$Dd \geq 155,5 \text{ km/km}$

Fonte: Strahler (1957 apud LIMA, 2009, p. 68).

Outro parâmetro de caracterização é a declividade, responsável por regular o tempo de duração do escoamento superficial e de concentração da precipitação nos leitos dos cursos d'água. Além deste, há a amplitude altimétrica da bacia, que corresponde a diferença entre a elevação máxima e mínima. Dividindo-se a amplitude altimétrica pelo comprimento da bacia obtém-se uma medida do gradiente ou da declividade geral da bacia (Equação 6).

Equação 6- Declividade da bacia

$$S = \left(D \frac{L}{A}\right) \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

S = declividade média (%);

D = distância entre as curvas de nível (m);

L = comprimento total das curvas de nível (m);

A = área da bacia hidrográfica (m<sup>2</sup>).

O autor LIMA (2009) apresenta o método de WISLER & BRATER (1964) como uma maneira de realizar a análise completa das características de altitude de uma bacia, que pode ser realizada através da medição de subáreas compreendidas entre pares sucessivos de curvas de nível em um mapa topográfico. Em seguida avalia-se a porcentagem correspondente a cada uma destas subáreas em relação a área total da bacia. Por fim, com soma simples obtém-se a porcentagem da área total que fica acima ou abaixo de uma certa altitude. Assim sendo, a altitude média da bacia é calculada pela Equação 7.

Equação 7- Altitude media

$$H_{média} = \frac{\sum(a.h)}{A} \quad (7)$$

Onde:

a = subárea entre as curvas de nível (m<sup>2</sup>);

h = altitude média do intervalo (m);

A = área da bacia hidrográfica (m<sup>2</sup>).

No que se refere à características fisiográficas para aproveitamentos hidrelétricos na bacia, PEREIRA (2015, p. 120) ressalta que se deve identificar o rio principal, sua nascente assim como o município, altitude, extensão do rio até a foz e seus principais afluentes. Posteriormente deve-se caracterizar o relevo e a quantidade de aproveitamentos hidrelétricos presentes e futuras instalações.

### 3.3 Aspectos legais quanto aos usos múltiplos da água

Entre os séculos XIX e XX ocorreu a troca do modelo econômico, de agrário para industrial, o que exigiu a utilização e ampliação da energia elétrica. Neste contexto, foi publicado o Código de Águas (Decreto 24.643 de 10 de julho de 1934) com objetivo de garantir o aproveitamento racional dos recursos hídricos voltados para a geração e distribuição de energia (SILVESTRE, 2008).

Dentre os temas abordados pelo Decreto 24.643, são tratados: o uso da água e sua propriedade; concessão de poder ao Estado para controlar e incentivar o aproveitamento industrial das águas; divisão dos recursos hídricos entre União, Estados e Municípios. Este instrumento tinha como objetivo facilitar a fiscalização, controlar a utilização e garantir a autonomia de cada ente da federação.

Após a promulgação do Código das águas, em 1939 houve a criação do Conselho Nacional de Água e Energia Elétrica (CNAEE), com intuito de manter o plano de interligação de usinas e sistemas elétricos. Este conselho permitiu o desenvolvimento do Setor Energético, propondo ao governo medidas que possibilitavam às empresas produtoras de energia ampliar ou modificar suas instalações, estender suas redes de distribuição e celebrar novos contratos de fornecimento.

A aplicação do Código de Águas, juntamente com a evolução dos problemas sócios e econômicos do país, possibilitou alterações no modelo de administração pública e de novas normas legais. Tal conjuntura levou à extinção do CNAEE e a criação da Eletrobrás, o Departamento Nacional de Águas e Energia e o Sistema Nacional de Eletrificação sob a responsabilidade do Ministério de Minas e Energia.

Posteriormente, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) criou a Resolução n. 20/86 com o intuito de classificar as águas através de parâmetros técnicos, assegurando o uso correto dos corpos d'água com suas finalidades preponderantes. O uso destes recursos pode ser classificado como consuntivo, quando parte da água retirada é consumida durante seu uso, e não consuntivo, quando a água serve apenas como veículo para uma certa atividade (CARVALHO; MELLO; SILVA, 2007).

Com a promulgação da Política Nacional dos Recursos Hídricos (Lei Federal nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997), surgiu a necessidade de produção de dados e modelos informatizados para a gestão de forma a realizar o monitoramento de uso e ocupação das terras e o atendimento de setores públicos e privados. Deste modo, o gerenciamento de bacias hidrográficas é um instrumento orientador das ações do poder público e da sociedade a longo prazo e tem como objetivo garantir exploração dos recursos naturais de forma sustentável.

Concomitantemente, a Política Nacional dos Recursos Hídricos prevê que, em situações de escassez, o uso prioritário destes recursos é o consumo humano e a dessedentação de animais e deve proporcionar o uso múltiplo das águas, especialmente para fins de abastecimento urbano, geração hidrelétrica, irrigação, navegação, piscicultura, aquicultura, preservação da flora e fauna entre outros (BRASIL, 1997).

A Lei nº 9.433 também criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) e estabeleceu que a administração, fiscalização e uso das águas sejam de forma compartilhada e democrática entre os entes federados. Assim, foram criados órgãos, conselhos e comitês para desenvolverem e gerenciarem os recursos hídricos a nível de bacia hidrográfica.

Em seguida, com a promulgação da Resolução nº 32, de 15 de outubro de 2003, foi adotado o conceito de região hidrográfica como espaço territorial compreendido por uma bacia, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas com características naturais, sociais e econômicas homogêneas ou similares, com o objetivo de orientar o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos (BRASIL, 2003). Essa divisão está disposta na Figura 09.

Figura 09: Regiões Hidrográficas do Brasil



Fonte: Wikipédia (2022, n.p.).

Em síntese, a rede hidrográfica brasileira pode ser caracterizada da seguinte forma: as bacias do Paraná, Uruguai e do São Francisco apresentam o predomínio de rios de Planalto, que, em decorrência do relevo, apresentam em seu leito rupturas de declive e vales encaixados que lhes conferem grande potencial hidrelétrico; os rios apresentam predomínio de regime pluvial, com cheias no verão e estiagens no inverno, havendo predominância de rios perenes, com exceção da região Nordeste que apresenta caráter intermitente. Outras exceções ocorrem no rio Amazonas, com regime complexo devido a diversidade de afluentes; no Uruguai, onde os rios apresentam cheias na primavera; e nos rios do Nordeste, cujas cheias são de outono/inverno (TUCCI; HESPANHOL; NETTO, 2001).

A partir do mapa apresentado acima, pode-se notar que todas as áreas urbanas, industriais, agrícolas ou de preservação pertencem a uma bacia hidrográfica, sendo estas áreas únicas de interação das águas com o meio físico, o meio biótico e o meio social, o econômico e cultural (YASSUDA, 1993 apud TRAJANO et al., 2012).

Através do Censo Demográfico realizado em 2010 pelo IBGE, pode-se observar na Figura 14, uma concentração de habitantes em áreas litorâneas, gerando assim um desequilíbrio regional na disponibilidade da água em relação à população. A maior disponibilidade hídrica se encontra na Região Hidrográfica Amazônica, sendo 80,8% de todo volume, porém atende 5,08% da População e 6,9% da produção industrial. Enquanto isso, a Região Hidrográfica do Paraná, que concentra 32,14% da população e 58% da produção industrial, têm apenas 6,53% destes recursos. e antigos empreendimentos hidrelétricos estão, em maior ou menor grau, vulneráveis às mudanças climáticas.

Figura 10: Densidade demográfica



Fonte: IBGE (2011, p. 1).

Na Tabela 1, é possível demonstrar tal irregularidade através de pesquisas realizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia (IBGE) e mapas disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA).

#### Quadro 2- Regiões hidrográficas no Brasil e suas disponibilidades de água

S =DLA.100	(6)
Hmédia =a.hA	(7)
Regiões hidrográficas brasileiras	Área (km <sup>2</sup> )
Amazônica	3.870.000,00
Tocantins-Araguaia	920.000,00
Atlântico NE Ocidental	274.300,00
Parnaíba	333.056,00
Atlântico NE Oriental	286.800,00
São Francisco	638.466,00
Atlântico Leste	388.160,00
Atlântico Sudeste	214.629,00
Paraná	879.873,00
Paraguai	363.446,00
Uruguai	24.300,00
Atlântico Sul	187.552,00
Brasil	8.380.582,00

Fonte: ANA; IBGE (2015, p. 1).

O crescimento e a modernização da economia brasileira nas últimas décadas geraram um enorme e sistemático aumento da demanda, principalmente nas grandes áreas urbanas e em regiões predominantemente industriais. Para suprir tal demanda, veio também a necessidade de aumentar a capacidade de geração do sistema que, por sua vez, requer uma rede de transmissão complexa e que transporta um crescente fluxo de potência.

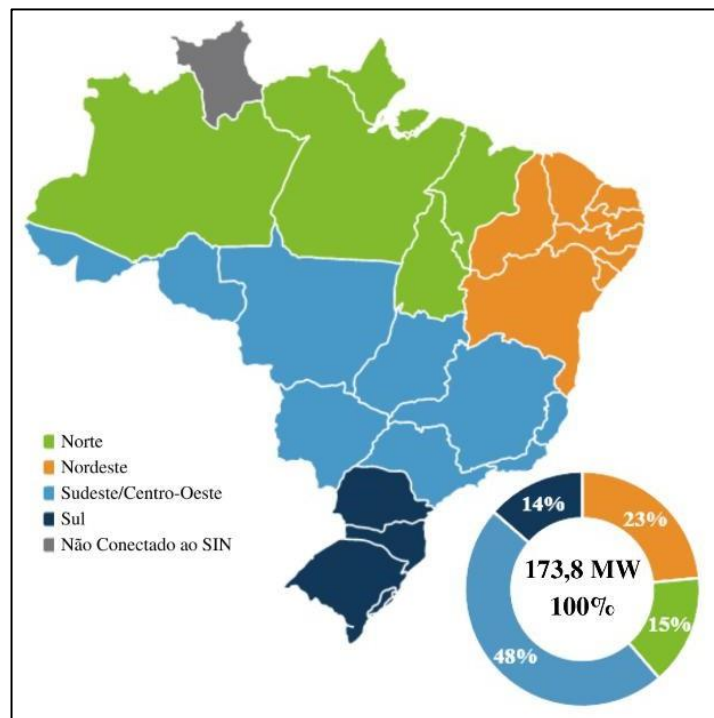
Em decorrência disso, em 1998 foi criado o Sistema Interligado Nacional (SIN) através da Resolução n. 351/98 do Ministério das Minas e Energia, em conformidade com a Lei 9.648/98 e o Decreto 2.655/98. A criação do Operador Nacional do Sistema (ONS) teve o objetivo de atribuir a responsabilidade de coordenar e controlar a operação do SIN, realizada pelas companhias geradoras e transmissoras com o objetivo de transferir energia elétrica entre regiões, pois:

Como os períodos de estiagem de uma região podem corresponder ao período chuvoso de outra, a integração permite que a localidade em que os reservatórios estão mais cheios envie energia elétrica para a outra, em que os lagos estão mais vazios –



instaladas, evidenciando que o submercado Sudeste/Centro-Oeste detém a maior parcela da potência instalada SIN.

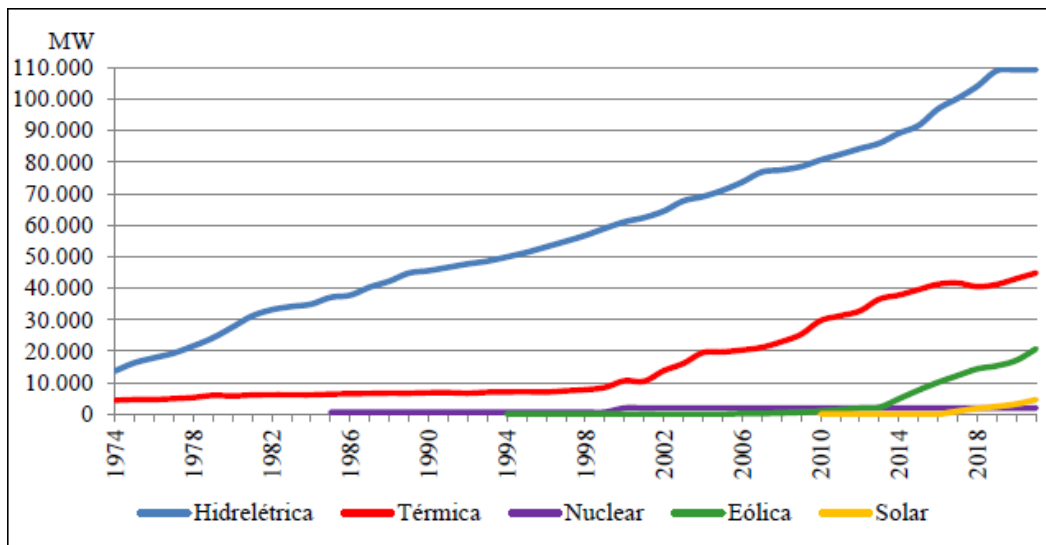
**Figura 12 - Capacidade Instalada por Submercado**



**Fonte: Elaboração própria a partir de dados do ONS (2021).**

Segundo registros do ONS apresentados no Gráfico 1, pode-se notar que a região Sudeste/Centro-Oeste é responsável por, aproximadamente, 48% da geração hidrelétrica em todo SIN, o que corresponde a aproximadamente 83 GW. Isso se deve ao relevo acidentado da região e ao grande volume de água escoado pela Bacia do Rio Paraná, que concentra rios como o Paraná, Paranaíba, Grande, Paranapanema, Tietê, Iguaçu, Dourados, entre outros. Essas características favoreceram a implantação de usinas hidrelétricas, correspondendo a 58,3 GW de potência instalada, sendo 54% da geração hidrelétrica.

**Figura 13 - Geração de Usinas Hidrelétricas por Subsistema (2000 - 2021)**

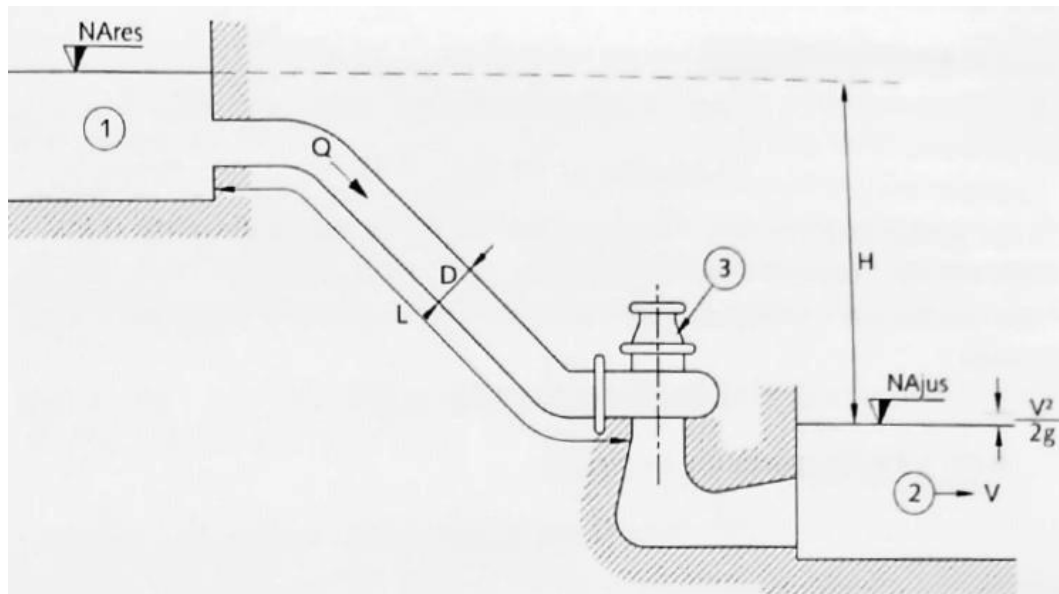


**Fonte: Elaboração própria a partir de dados do ONS (2021).**

Pensando no desenvolvimento socioeconômico do país foram construídos reservatórios, que são elementos construtivos cuja finalidade é armazenar a água que escoar em um curso d'água, podendo ter diversas funções conforme interesse público, seja para abastecimento da população, irrigação, navegação, controle de cheias, geração hidrelétrica, dentre outros.

Pensando no funcionamento de uma usina hidrelétrica, PASHKOV (1983 apud PEREIRA, 2015, p. 38) ilustra na Figura 15, onde a água se encontra num reservatório 1 criado por uma barragem que alimenta uma turbina. Já o recipiente 2 representa o canal de fuga da usina por meio do qual se restituem as águas ao leito natural do rio. A instalação 3 representa a casa de forças, que abriga o conjunto formado pela turbina hidráulica e o gerador elétrico, que são acoplados num eixo. A altura de queda, responsável pela energia potencial, é igual entre as diferenças entre os níveis do reservatório e do canal de fuga, desprezando-se a altura de velocidade ( $v^2/2g$ ), da ordem de 20 centímetros.

Figura 14 - Esquema Típico de uma instalação hidrelétrica



Fonte: Pashkov (1983 apud PEREIRA, 2015, p. 38).

A água contida no reservatório possui uma energia potencial em comparação a água presente no canal de fuga. Essa energia pode ser demonstrada na Equação 8.

Equação 8- Energia Potencial

$$E = \gamma.H.v = \rho.g.v.H \quad ((8))$$

onde:

$\gamma$  = peso específica da água = 9.810 N/m<sup>3</sup>;

H = altura total de queda (m);

v = velocidade (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

Como a energia por unidade de tempo é a potência (P) e a razão entre a velocidade e tempo é vazão (Q), temos:

Equação 9 – Potência

$$P = \gamma \cdot Q \cdot H = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad ((9))$$

onde:

$$\rho = \text{massa específica da água} = 1.000 \text{ kg/m}^3.$$

Com a usina em funcionamento, a energia hidráulica é convertida em energia mecânica pela turbina e depois em energia elétrica pelo gerador. Além disso, deve considerar os rendimentos na turbina na ordem de 90%, no gerador de 98% e no conjunto de 88%. Igualmente, a altura de queda bruta não é totalmente aproveitada devido às perdas de carga nos circuitos de adução e restituição, que são em geral da ordem de 2% a 5% da queda bruta (PEREIRA, 2015, p.39), desta forma temos que:

Equação 10 - Queda média líquida

$$H_L = H - \sum H_P \quad ((10))$$

onde:

$\sum H_P$  = soma das perdas de carga (m);

Consequentemente, a potência útil equivale a:

Equação 11 - Potência útil (a)

$$P = \mu \cdot \gamma \cdot g \cdot Q \cdot H_L = \mu \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_L \quad ((11))$$

onde:

$\mu$  = rendimento.

A potência elétrica é mensurada em Watts (W), podendo estabelecer a seguinte relação:  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ N.m/s}$

Considerando os valores médios dos rendimentos de turbina e gerador iguais a 88% e a aceleração da gravidade igual a  $9,8 \text{ m/s}^2$ , pode-se notar que a potência a ser instalada numa usina hidrelétrica é diretamente proporcional ao produto da vazão média pela queda média líquida (Equação 13).

Equação 13 - Potência útil (b)

$$P = 8,64 \cdot Q \cdot H_L \text{ (kW)} \quad ((13))$$

De acordo com PEREIRA (2015, p. 119), além dos atributos citados, é necessário realizar a curva-chave o canal de fuga, que caracteriza a variação dos níveis d'água do canal de fuga (variação de queda) em função das vazões defluentes da usina (soma das vazões turbinadas e vazões vertidas). A determinação dessa curva é feita com base no histórico de dados do posto fluviométrico instalado no canal de fuga da usina, levando em consideração que um histórico longo de leituras resulta na precisão da curva.

De acordo com PEREIRA (2015, p. 76), os reservatórios podem ser classificados de acordo com a duração de enchimento, podendo ser:

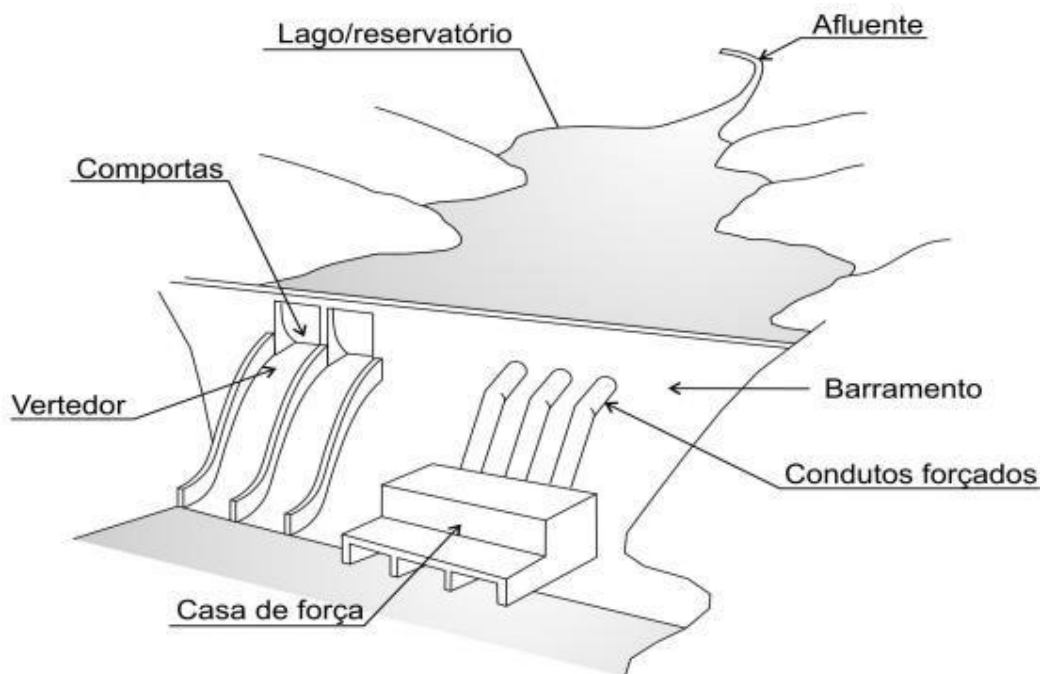
- Reservatórios de regulação diária, cujos volumes são da ordem de grandeza dos aportes médios diários ou semanais;
- Reservatórios sazonais, cujos volumes são da ordem de grandeza dos aportes da estação chuvosa. Geralmente estes reservatórios se encontram no curso superior dos rios, permitindo o armazenamento de água durante essa estação para utilização no período de forte consumo;
- Reservatórios internanuais, cujos volumes são superiores aos volumes dos aportes anuais, o que permite armazenar água durante um ano úmido para utilização em um ano seco.

Em paralelo, as usinas hidrelétricas podem ser classificadas pelo tipo de operação e, fio d'água e as de reservatórios de regularização. As usinas hidrelétricas a fio d'água correspondem a usinas sem regularização, cujo nível de água operativo (NA) sofre pequenas alterações. Esta característica implica em uma regularização diária ou semanal, o que permite o fornecimento da potência máxima em períodos de consumo elevado (PEREIRA, 2015, p.74).

Já as usinas com reservatórios dispõem de reservatório de acumulação/regularização, cujos níveis de água operativos variam significativamente em decorrência da sazonalidade climática e possibilita a geração de energia nos períodos de estiagem. Além disso, os reservatórios propiciam os usos múltiplos da água, como o controle das cheias dos rios, abastecimento das cidades, irrigação, piscicultura, recreação, transporte fluvial e outros.

Os principais elementos que constituem um reservatório com aproveitamento hidrelétrico são: o barramento, vertedor, lago, comporta, casa de forças e o afluente, que permite a entrada de vazão de cursos d'água que contribuem para o volume do reservatório, conforme mostrado na Figura 16. Uma vez ingressada no reservatório, a água tem as seguintes alternativas de efluência: pelo descarregador de fundo ou turbina, pelo vertedor durante eventos extremos ou evaporar para a atmosfera. A evaporação é proporcional a área da superfície de água do reservatório, podendo ter volumes anuais significativos caso a região seja de grande insolação, temperatura e vento (ANA, 2018).

**Figura 15: Componentes básicos de um reservatório**



Fonte: ANA (2018, p. 12).

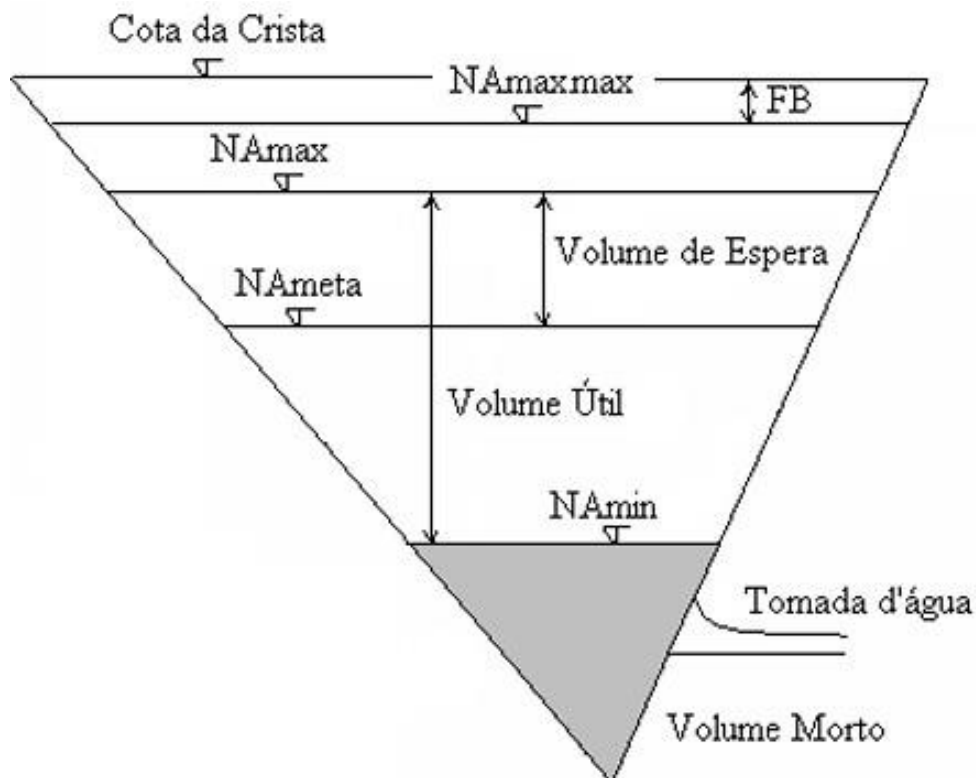
Como especificações relevantes de um reservatório representadas na Figura 17, pode-se citar (ANA, 2018; LOPES, SANTOS, 2012):

- Nível d'água mínimo operacional: corresponde ao nível mínimo necessário para a operação adequada do reservatório, sendo definido acima do limite superior da estrutura de tomada d'água de modo a evitar a formação de vórtices e o ingresso de ar no conduto forçado.
- Nível d'água máximo operacional: é nível máximo permitido para operação normal do reservatório, sem que haja vertimento. Este nível define o limite

máximo do volume útil do reservatório, podendo ser à cota da crista do vertedor ou à borda superior das comportas vertedor.

- Volume útil: é o volume disponível para operação do reservatório, ou seja, ao atendimento das diversas demandas de água, sendo este volume compreendido entre os níveis máximo e mínimo de operação do reservatório.
- Volume de espera: corresponde à parcela do volume útil do reservatório destinada ao amortecimento de cheias visando ao atendimento das restrições de vazão a jusante do barramento. Estas restrições são adotadas em função da capacidade de escoamento do canal a jusante e pelo não comprometimento de infraestruturas existentes em zonas de inundação.
- Nível d'água máximo maximorum: corresponde à sobrelevação máxima do nível d'água, medida a partir do máximo operacional, disponível para a passagem de cheias. Esta sobrelevação consiste em um "free-board" (borda livre) definido entre o nível da crista do vertedor e da crista do barramento que garante que as ondas formadas pela ação dos ventos não passem por sobre o barramento, fato este poderia ser danoso à estrutura.

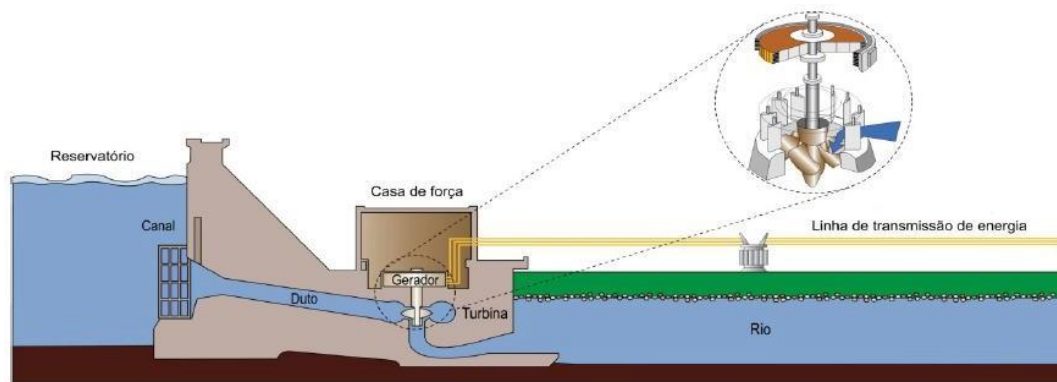
**Figura 16: Níveis e volumes característicos de um reservatório**



Fonte: Santos; Lopes (2002, p. 8).

Além do reservatório, os aproveitamentos hidrelétricos possuem sistemas de captação e adução formados por túneis, canais ou condutos metálicos que têm a função de levar a água até a casa de força, onde estão as turbinas, que durante o seu movimento giratório, convertem a energia cinética em energia elétrica, como pode ser observado na Figura 18. Depois de passar pela turbina, a água é restituída ao leito natural do rio pelo canal de fuga. Por último, há o vertedor cuja função é permitir a saída da água, de modo seguro, sempre que os níveis do reservatório ultrapassam os limites recomendados ou quando o vertedor for dotado de comporta que é acionada em função do regime operacional para cada situação específica (ANA, 2008).

**Figura 17: Perfil Esquemático de um Aproveitamento Hidrelétrico**



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2008, p. 30).

Um aspecto importante que se deve ser ressaltado é que a geração de energia elétrica só ocorre quando existe uma demanda por ela. O gerenciamento desta relação é baseado em um conjunto de instruções ordenadas pelo controlador do sistema eletroenergético integrado, o Operador Nacional do Sistema (ONS), sob o nome de “despacho centralizado”, que, especificamente, realiza a programação de geração para cada usina do sistema e outras fontes para o fornecimento efetivo de energia elétrica de forma confiável e econômica, atendendo aos requisitos de demanda do sistema.

## 4 METODOLOGIA

A seguir serão apresentados os itens descrevendo a metodologia adotada para realização deste trabalho, compreendendo o levantamento de dados históricos de vazão, níveis dos reservatórios, geração, caracterização da bacia e análises propostas. Todos os mapas utilizados neste trabalho estão disponíveis em anexo.

### 4.1 Modelagem

Segundo NAGHETTINI e PINTO (2007), a quantificação das fases do ciclo hidrológico, das variabilidades e de suas inter-relações, requer a coleta sistemática de dados básicos que se desenvolvem ao longo do tempo ou do espaço. Assim, é possível estabelecer uma acurácia quanto mais longos e precisos forem os registros de dados hidrológicos.

No Brasil, as principais entidades produtoras de dados hidrológicos são a Agência Nacional de Águas (ANA), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e, em regiões com aproveitamento hidrelétrico, o Operador Nacional do Sistema (ONS).

Para realizar esta pesquisa, foram utilizados dados oriundos de relatórios, boletins, guias sobre aspectos climáticos, meteorológicos, como também sobre geração de energia da bacia hidrográfica do rio Paranaíba, disponíveis nos respectivos órgãos conforme apresentado no Quadro 3.

**Quadro 3: Principais fontes de dados**

$E = \gamma \cdot H \cdot v = \rho \cdot g \cdot v \cdot H$	(8)
$P = \gamma \cdot Q \cdot H = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$	(9)
$HL = H - \sum HP$	(10)
$P = \mu \cdot \gamma \cdot g \cdot Q \cdot HL = \mu \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot HL$	(11)
$P = 8,64 \cdot Q \cdot HL \text{ (kW)}$	(13)
Tema	Principais Fontes
Aspectos gerais	Limites e sedes político-administrativas (SNIRH, 2013) e Limites de bacias contribuintes (ANA, 2018).

Hidrografia	Base hidrográfica integrada (SNIR, 2021) e Limites de ottobacias (SNIRH, 2018)
Climatologia e precipitação	Avaliação Ambiental Integrada (EPE, 2007), Banco de Dados Meteorológicos do INMET, Dados hidrológicos (ONS) e HydroWeb (ANA).
Demografia	Censos Demográficos do IBGE 2010
Energia	Mapa do Sistema Elétrico (IBGE, 2017), Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico – SIGEL (ANEEL, 2011), Análise energética e consumo (EPE) Avaliação Ambiental Integrada (EPE, 2007), Plano Nacional de Energia - 2030 (MME, 2007) e Plano Decenal de Energia 2008-2017 (MME & EPE, 2007)

Fonte: Autoria própria (2021).

### Média

A média tem como objetivo obter a medida de tendência central (4). Dentro do ciclo hidrológico, a média estabelece uma regularização total de vazões em dada seção fluvial, ou seja, estabelece que as vazões defluentes do reservatório serão constantes (TUCCI et al., 2001, p. 91). Além disso, a média pode ser utilizada para estimar padrões de comportamentos do volume dos reservatórios de acordo com a escala de tempo desejada a fim de avaliar a sazonalidade.

Equação 14: Média amostral

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (14)$$

Onde:

$X_i$  = número de elementos a serem somados;

$n$  = quantidade de elementos;

### 4.3 Moda

Corresponde à medida de tendência central definida como o valor mais frequente de um grupo de valores observados. Com a moda calculada para o período analisado, será possível verificar se a geração ou volume apresentam padrões. Por se tratar de um conjunto amostral grande (8.024 dias registrados), será elaborado o diagrama de frequências a fim de verificar quais valores apresentam maior frequência e com isso, determinar se a usina opera acima do volume mínimo operativo e eventuais sobrecargas nas unidades geradoras.

### 4.4 Variabilidade em torno da média

Pode ser obtida através do cálculo do desvio padrão (Equação 15), sendo necessária para determinar a capacidade do reservatório a fim de armazenar volumes em épocas de cheias para atenuar os efeitos da estiagem. Além disso, o desvio padrão pode ser utilizado para indicar ocorrência de algum fenômeno climático e restrições operativas.

Equação 1: Variância

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n} = (\bar{X}_i^2 - \bar{X}^2) \quad (15)$$

Equação 2: Desvio Padrão

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} = \sqrt{\sigma^2} \quad (16)$$

Sendo:

X = média aritmética da amostra;

n = tamanho da amostra;

X<sub>i</sub> = dado da série;

σ = desvio padrão.

### 4.5 Coeficiente de Correlação Linear de Pearson

O coeficiente de correlação ( $r$ ) é uma medida da intensidade ou grau de associação entre duas variáveis analisadas. De acordo com NAGHETTINI e PINTO (2007, p. 355), neste estudo serão realizadas correlações entre volume útil-geração. As variáveis na expressão as mesmas da Equação 17.

#### 4.5 Coeficiente de Correlação Linear de Pearson

**Quadro 4: Interpretação do Coeficiente de Correlação Linear**

$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$	(17)
Valor de $r$	Interpretação
0,00 a 0,19	Correlação muito fraca
0,20 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 1,00	Correlação muito forte

Fonte: Souza (2001, p. 45).

#### 4.6 Caracterização Morfométrica

Na caracterização morfométrica serão abordados os parâmetros envolvendo as características físicas e de forma do terreno, os quais serão expostos no Quadro 5 com seus respectivos símbolos, fórmulas, unidades e em questão. Os significados e relevâncias de tais parâmetros já foram abordados no tópico 3.2 deste trabalho.

**Quadro 5: Parâmetros morfométricos**

Numeração	Abreviação	Parâmetro	Definição	Unidade
Equação 3	$K_c$	Coeficiente de compacidade	$K_c = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$	-
Equação 4	$K_f$	Fator de forma	$K_f = \frac{A}{LAX^2}$	-
Equação 5	$D_d$	Densidade de drenagem	$D_d = \frac{L_t}{A}$	-
Equação 1	$S_{in}$	Sinuosidade	$S_{in} = \frac{L_{rp}}{L_{tv}}$	-
Equação 6	$S$	Declividade da bacia	$S = \left( \frac{D \cdot L}{A} \right) \cdot 100$	m/m

Fonte: Autoria própria (2022).

onde:

$P$  = Perímetro da bacia (km);

$A$  = Área da bacia (km<sup>2</sup>);

$LAX$  = Comprimento do eixo da bacia (km)

$Lt$  = Comprimento total de canais (km);

$Ltv$  = Comprimento do talvegue (km);

$Lrp$  = Comprimento do canal principal (km);

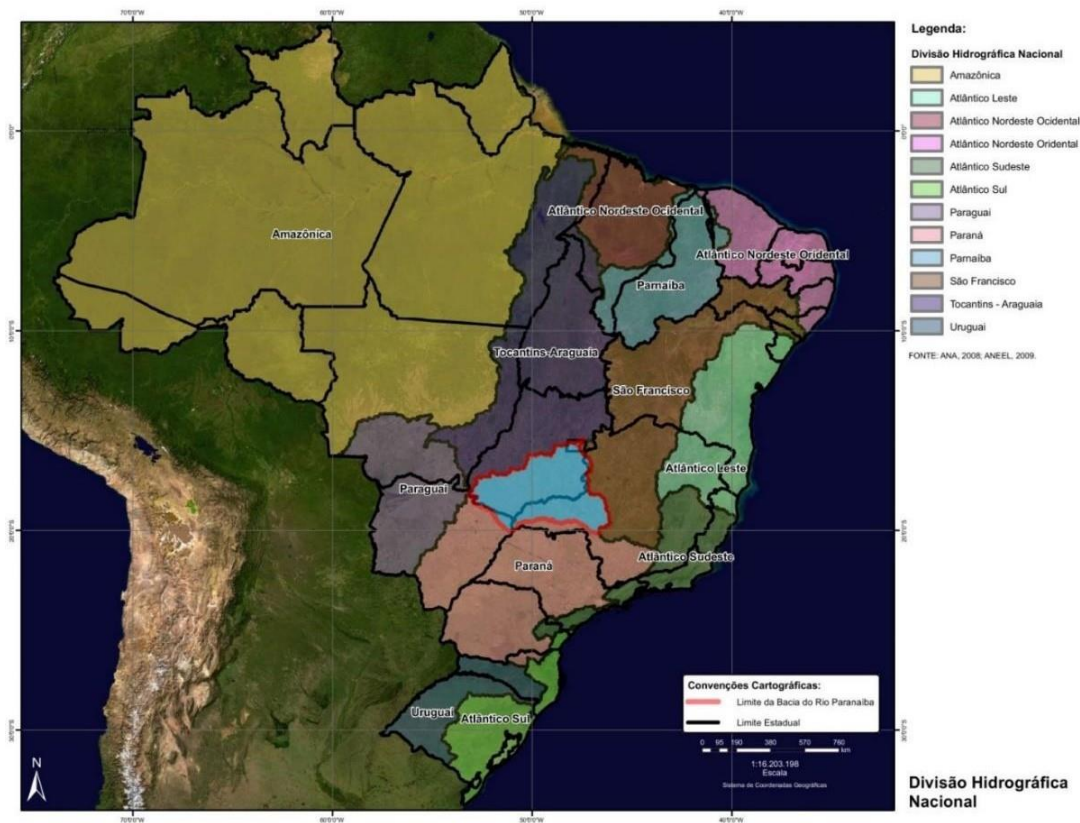
$D$  = distância entre as curvas de nível (m);

$L$  = comprimento total das curvas de nível (m);

### **3.2.1 Caracterização da área de estudo**

A bacia hidrográfica do rio Paranaíba está localizada entre os paralelos 15° e 20° sul e os meridianos 45° e 53° oeste, sendo a segunda maior unidade hidrográfica da Região Hidrográfica do Paraná (25,4% de sua área) conforme ilustrado na Figura 19. Sua área de drenagem é de 222.767 km<sup>2</sup>, contemplando 197 municípios e o Distrito Federal (DF).

Figura 18: Localização da Bacia do Rio Paranaíba dentro da Divisão Hidrográfica



Fonte: PRH da Bacia do Rio Paranaíba (2011, p. 15).

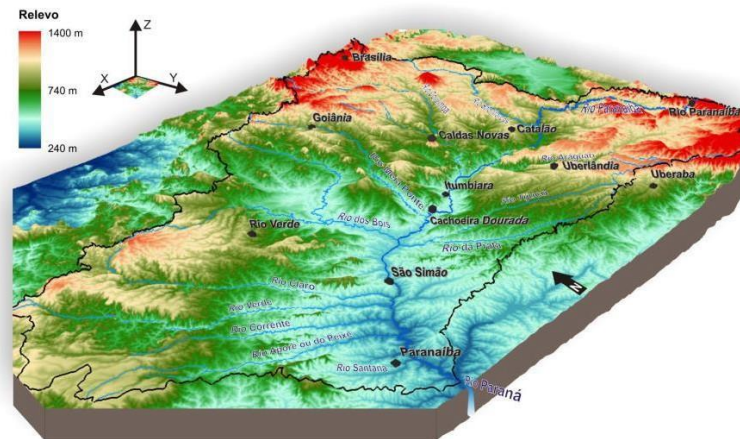
Esta bacia vem apresentando um expressivo desenvolvimento nos últimos anos, se consolidando como um importante eixo logístico, conectando as regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, e como uma fronteira agrícola-pecuária em franca expansão, em especial para a criação de bovinos, suínos e galináceos. Em relação à agricultura, destaca-se as monoculturas de soja, milho, café, feijão e algodão e cana de açúcar.

Além disso, apresenta importante trecho navegável da Hidrovia do Paraná e um expressivo parque de geração hidrelétrica, que é complementada pela atividade industrial e forte concentração populacional nos centros urbanos, que abrigam cerca de 8,5 milhões de habitantes (PRH da Bacia do Rio Paranaíba, 2011).

Sua nascente é Serra da Mata da Corda (MG) numa altitude de cerca de 1.100 m, no município rio Paranaíba. Seguidos 250 km aproximadamente, o rio Paranaíba tornar-se uma limítrofe de unidades federativas de Goiás e Minas Gerais, recebendo o rio São Marcos pela margem direita. Quando o trecho do rio se encontra no limite de Araguari (MG), localiza-se a maior usina hidrelétrica da Bacia, a UHE Emborcação. Seus próximos afluentes são rio Araguari pela margem esquerda e o rio Corumbá pela



Figura 20: Representação gráfica da Bacia do Rio Paranaíba



Fonte: PRH da Bacia do Rio Paranaíba (2011, p. 15).

Em relação a sua declividade, a nascente do rio Paranaíba está localizada na cota 1.100 e seu exutório no nível 328, nível este do lago da hidrelétrica de Ilha Solteira, barragem no rio Paraná, à jusante. Sua declividade média é de 0,495m/km e seu comprimento do canal principal é de 1.170 km.

As características climáticas da bacia do rio Paranaíba é bem diversificada, devido a sua topografia, sua posição geográfica e, principalmente, os aspectos dinâmicos da atmosfera, que incluem sistemas meteorológicos de micro, meso e grande escalas, que atuam direta ou indiretamente no regime pluvial, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e as Frentes Frias, principais responsáveis pela precipitação e o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e o Vórtice Ciclônico de Ar Superior que, dependendo das suas posições, ocasionam grandes períodos de estiagem. (MINUZI et al., 2007, apud SILVA; FERREIRA, 2015).

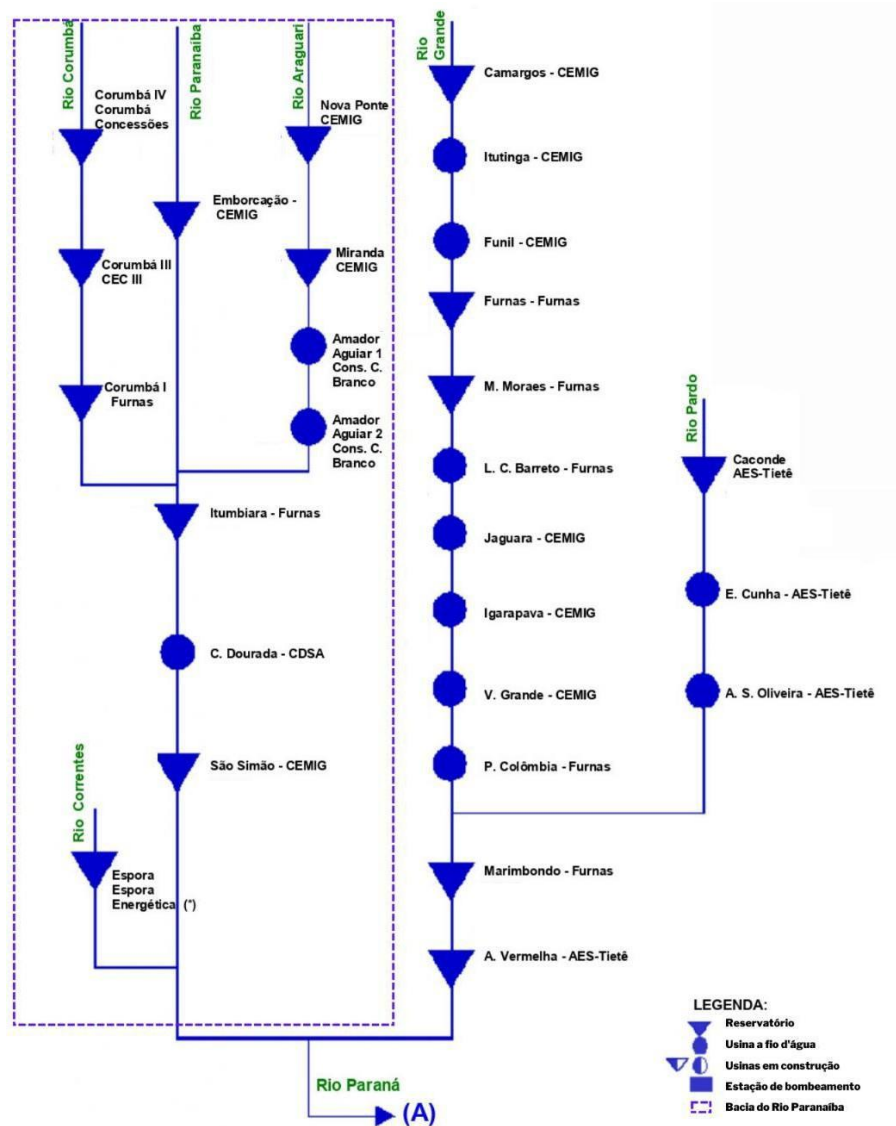
#### 3.4.1 Usinas Hidrelétricas analisadas

Na área da bacia instalam-se as usinas hidrelétricas (UHEs) que funcionam como centralizador entre as redes de energia do Norte/Nordeste e Sul/Sudeste. Segundo o Sistema de Informações de Geração da ANEEL (2022), a bacia do rio Paranaíba apresenta 58 empreendimentos com aproveitamento hidrelétrico, sendo 21 Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) em operação, 15 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e 22 Usinas Hidrelétricas (UHEs). Além disso, estão em construção 6 PCHs e 1 UHE nesta região.

Destes aproveitamentos hidrelétricos, serão objeto de estudo as usinas hidrelétricas com reservatórios de regularização conectadas ao Sistema Interligado Nacional estão ilustrados na Figura 22, sendo eles: Corumbá I, Corumbá III, Corumbá IV, Emborcação, Espora, Itumbiara,

Miranda, Nova Ponte e São Simão. Para a descrição técnica das usinas foi consultado PEREIRA (2022).

Figura 21: Usinas Integrantes do SIN na Região Sudeste/Centro-Oeste



Fonte: Adaptação do Informativo Preliminar Diário da Operação (IPDO - ONS, 2022, p. 1).

### **3.4.2 UHE Corumbá I**

A UHE Corumbá I tem 375 MW de potência instalada dividida em três unidades geradoras. Situa-se no Rio Corumbá, no município de Caldas Novas (GO), sendo afluente do rio Paranaíba pela margem direita. A usina apresenta barragem do tipo enrocamento/núcleo e entrou em operação em 1997. A barragem é do tipo enrocamento com núcleo, tendo altura máxima de 90 m, 540 m de comprimento de crista e seu vertedouro apresenta quatro comportas de 5,8 m x 7,6 m com capacidade de vazão de 6.800 m<sup>3</sup>/s. Seu reservatório possui 65 km<sup>2</sup> de área inundada e capacidade máxima de acumulação de 1,03 km<sup>3</sup>.

As obras desta usina foram iniciadas em 1982, pelas Centrais Elétricas de Goiás (CELG), sendo transferidas para FURNAS em 1984. Devido à sua localização, a UHE Corumbá I adiciona ganhos energéticos ao subsistema Sudeste/Centro-Oeste, em especial ao Distrito Federal.

### **3.4.3 UHE Corumbá I**

A UHE Corumbá III tem 93,6 MW de potência instalada. Situada no rio Corumbá, no município de Luziânia (GO). A barragem do tipo enrocamento tem 54 m de altura máxima, 800 m de comprimento de crista e seu vertedouro apresenta três comportas de 8,40 m x 11,36 m com capacidade de vazão de 1.854 m<sup>3</sup>/s. Seu reservatório possui 77,42 km<sup>2</sup> de área inundada e capacidade máxima de acumulação de 972 hm<sup>3</sup>

Sua operação é gerenciada pela Geração CIII (60%) e a Energética Corumbá III S.A (40%). A energia produzida é responsável por suprir cerca de 10% da demanda de Brasília, que está localizada a 130 km de distância. Além disso, a usina também desempenha o papel estratégico de garantir o abastecimento aos três poderes federais, no caso de problemas no fornecimento de eletricidade.

### **3.4.4 UHE Corumbá II**

A UHE Corumbá IV (Figura 25) apresenta 127 MW de potência instalada dividida em duas unidades geradoras. Situa-se no rio Corumbá, no município de Luziânia (GO). A barragem do tipo enrocamento tem 76 m de altura máxima, 7.290 m de comprimento de crista e seu vertedouro apresenta três comportas de 7 m x 9,40 m com capacidade de vazão de 1.280 m<sup>3</sup>/s. Seu reservatório apresenta 184 km<sup>2</sup> de área inundada e capacidade máxima de acumulação de 3.679,8 hm<sup>3</sup>.

A construção desta UHE iniciou em 2001 e entrou em operação em abril de 2006, sendo gerenciada pela Corumbá Concessões S.A. energia produzida é responsável por suprir cerca de 15% da demanda de Brasília e seu reservatório também fornece água potável à população (CORUMBÁ CONCESSÕES S.A., 2016).

#### **3.4.5 UHE Nova Ponte**

A UHE Nova Ponte tem 510 MW de potência instalada dividida em três unidades geradoras. Situa-se no trecho alto do rio Araguari, no município de mesmo nome em Minas Gerais (MG). A usina foi implantada pela Companhia Elétrica de Minas Gerais (CEMIG) entre os anos de 1987 e 1995. A barragem tem 142 m de altura máxima, 1.620 m de comprimento de crista e seu vertedouro apresenta quatro comportas de 11 m x 17,35 m com capacidade de vazão de 6.140 m<sup>3</sup>/s. Seu reservatório possui cerca de 443 km<sup>2</sup> de área inundada e capacidade máxima de acumulação 12.792 hm<sup>3</sup>.

#### **3.4.6 UHE Espora**

A UHE Espora (Figura 27) tem potência instalada igual à 32 MW e foi implantada no rio Corrente, no município de Aporé (GO), próximo à divisa do estado Mato Grosso do Sul. A barragem de enrocamento apresenta 45,8 de altura máxima e comprimento de crista de 1.600 m. O vertedouro tem três comportas. Seu reservatório possui 28,06 km<sup>2</sup> de área inundada e capacidade de acumulação de 209 hm<sup>3</sup>, sendo gerenciada pela Espora Energética S.A.

#### **3.4.7 UHE Miranda**

A UHE Miranda tem 408 MW de potência instalada e foi implanta no rio Araguari, no município de Indianópolis (MG), a jusante de Nova Ponte. Sua operação iniciou em 1998, e foi incorporada ao parque gerador da ENGIE em 2017, em leilão do Governo Federal. A barragem de enrocamento com núcleo tem 85 m de altura e comprimento de crista de 1.050 m. O vertedouro, em calha, tem quatro comportas de 12,5 m x 19,8 m com capacidade de vazão de 8.630 m<sup>3</sup>/s. Além disso, a usina apresenta área inundada de 50,61 km<sup>2</sup> e uma capacidade de acumulação de 1.120 hm<sup>3</sup>.

### **3.4.8 UHE Emborcação**

A UHE Emborcação foi implantada no trecho alto do Rio Paranaíba, entre os municípios de Araguari (MG) e Catalão (GO), durante os anos de 1977 e 1981 e é gerenciada pela CEMIG. No início de sua operação em 1982, sua potência correspondia a 596 MW, sendo 02 unidades geradoras de 298 MW. A partir de 1983, mais 02 unidades geradoras de mesma potência foram instaladas, resultando em 1.192 MW de potência instalada e a barragem tem 158 m de altura máxima e seu vertedouro tem quatro comportas de 12 m x 18,77 m com capacidade máxima de 7.600 m<sup>3</sup>/s. A usina apresenta área inundada de 476,59 km<sup>2</sup> e capacidade máxima de acumulação de 17.724,72 hm<sup>3</sup>.

### **3.4.9 UHE Itumbiara**

A UHE Itumbiara tem 2.080 MW de potência instalada e foi implantada no rio Paranaíba, entre os municípios de Tupaciguara (MG) e Itumbiara (GO) durante os anos 1974 e 1980, sendo gerada pelo grupo FURNAS. A barragem tem 106 m de altura máxima e o vertedouro apresenta seis comportas de 9 m x 15 m com capacidade máxima de 16.000 m<sup>3</sup>/s. A usina apresenta uma área inundada de 798 km<sup>2</sup> e capacidade de acumulação de 17.000 hm<sup>3</sup>.

### **3.4.10 UHE São Simão**

A UHE São Simão tem 1.680 MW de potência instalada e foi implantada no Rio Paranaíba, no município de São Simão (GO), entre 1973 e 1980. A barragem tem 127 m de altura máxima e o vertedouro apresenta nove comportas de 15 m x 18,78 m com a capacidade máxima de 24.100 m<sup>3</sup>/s

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este tópico tem como finalidade apresentar os resultados obtidos neste trabalho, incluindo mapas, tabelas e gráficos, assim como interpretar e discutir os resultados de forma objetiva.

### 5.1 Aproveitamento Energético na Bacia do Rio Paranaíba

Segundo SCHREIBER (1977), são necessários 20 anos de análise para aferir o comportamento de uma área de drenagem com aproveitamento hidrelétrico. Já PEREIRA (2015) expõe que são necessários de 30 a 50 anos de dados para análise devido este ser o tempo de vida útil de uma construção de usina. Entretanto, a coleta de dados de geração e volume útil de reservatórios estão dispersas pelos órgãos e empresas governamentais, além de apresentarem dados consistentes, ou seja, comum em todas as bases, a partir do ano 2000. Tal falta prejudica a acurácia da análise.

Analisando todos os gráficos, podemos ver uma queda na geração e no volume útil dos reservatórios no ano de 2001, em que governo federal recorreu a blecautes programados para evitar o colapso do sistema elétrico brasileiro, reduzindo em 20% o consumo do país (OLIVEIRA, 2021). Isso se deu a crise hídrica no período de junho a setembro de 2001 e a políticas energéticas ineficientes, como o atraso de obras de transmissão e geração de energia, e falta de previsão do uso dos reservatórios. Somente em fevereiro de 2002 a geração retornou às suas condições normais.

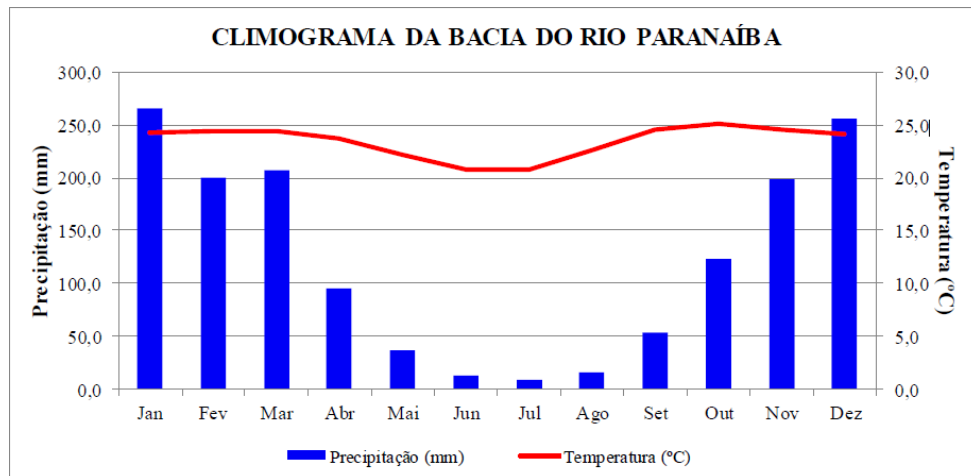
Outro fenômeno que pode ser observado nos gráficos seguintes é a crise hídrica que ocorreu em 2014 perdurando até 2017. Este fenômeno teve início no estado de São Paulo em outubro de 2013 e se estendeu aos demais estados do Sudeste ao longo de 2014 e 2015, mantendo-se até 2017 em várias áreas, como no estado de Minas Gerais, onde está localizado 30% da bacia hidrográfica.

Já em 2021 foi observado o efeito da La Niña (O FENÔMENO LA NIÑA..., 2021). Em geral, este fenômeno gera chuvas abundantes na Amazônia e no Nordeste, enquanto no Sul ocorre estiagem e a região Sudeste e Centro-Oeste os efeitos são imprevisíveis.

Figura 23. Através deste climograma, pode-se aferir que o período úmido na bacia do Rio Paranaíba ocorre de outubro a março do ano seguinte, gerando um

aumento no volume dos reservatórios e propiciando uma maior capacidade de geração hidrelétrica. Já os meses de abril a setembro correspondem ao período de estiagem, e por consequência, os volumes dos reservatórios e a geração hidrelétrica são menores neste período

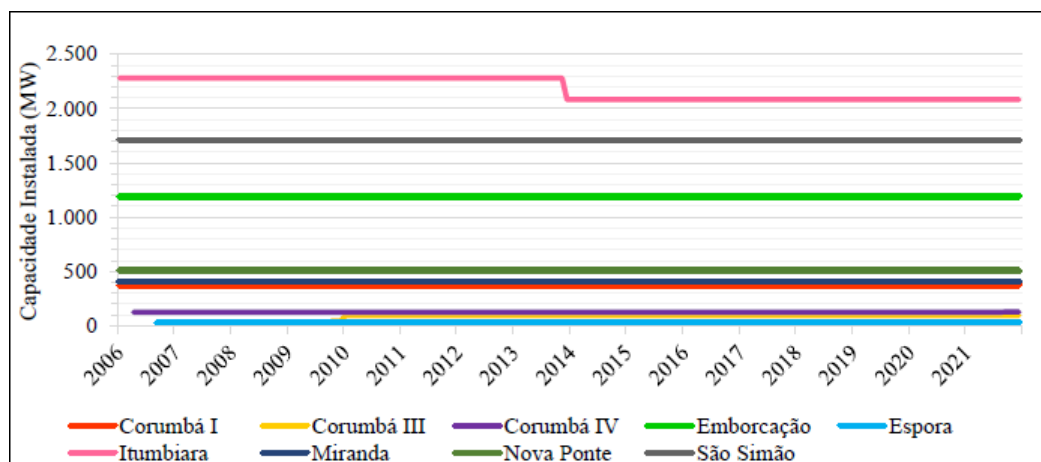
**Figura 22: Climograma da Bacia do Rio Paranaíba**



Fonte: ANA (2012, p. 22). Org. Silva; Ferreira (2012).

No gráfico ilustrado na Figura 24 pode-se notar a redução de 198 MW da capacidade instalada na UHE Itumbiara em dezembro de 2013, pois foi efetuado a troca de unidades geradoras.

Figura 23: Capacidade Instalada de Usinas com Reservatórios na Bacia do Rio Paranaíba



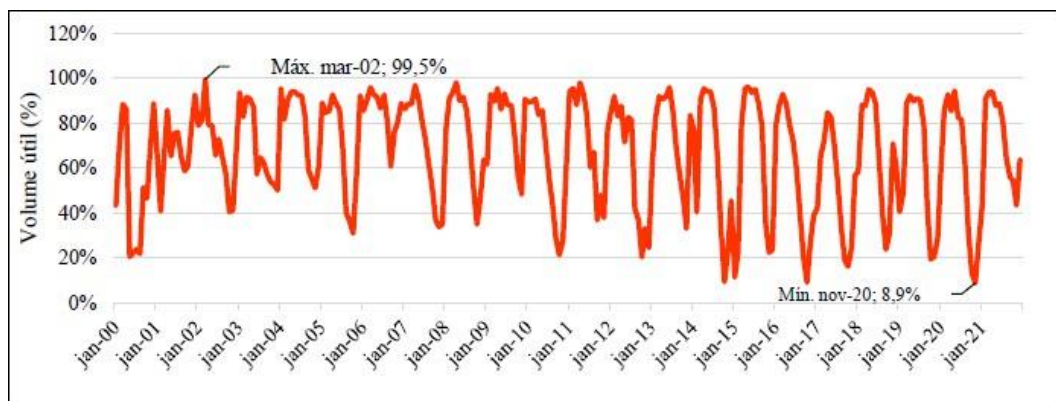
Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

## 5.2. UHE Corumbá I

Em relação à UHE Corumbá I, podemos observar na Figura 25 que o volume do reservatório segue o climograma elaborado por SILVA e FERREIRA (2012), apresentando seus maiores volumes nos períodos de outubro a março e os menores volumes entre março e setembro. Conseqüentemente, a geração acompanha o mesmo perfil conforme ilustrado na Figura 26.

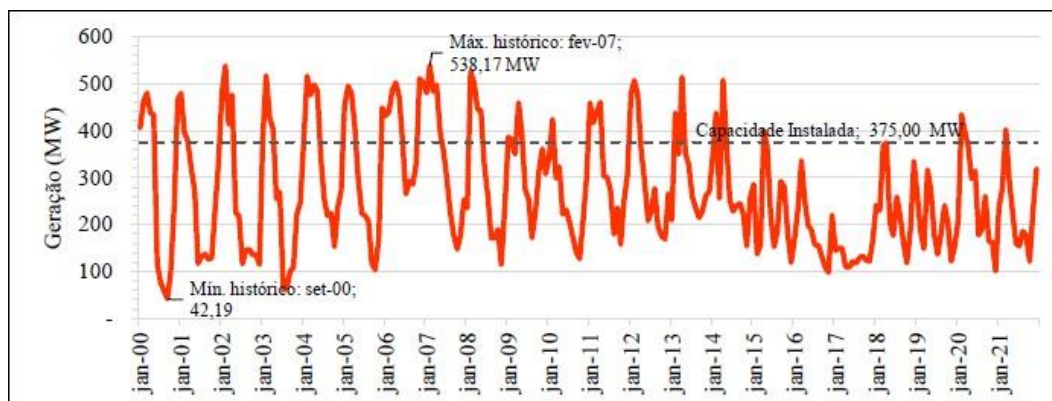
Cabe destacar o comportamento inesperado para o mês de novembro de 2020, que deveria ser de cheia no reservatório. Porém, a partir de setembro de 2020 foi observado o fenômeno La Niña, com chuvas menos frequentes e elevadas temperaturas.

Figura 24: Volume útil do Reservatório da UHE Corumbá I entre 2000-2021 (%)



Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

Figura 25: Geração da UHE Corumbá I entre 2000-2021 (MW)



Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

Quanto aos cálculos média histórica, variância e desvio padrão para a UHE Corumbá I estão descritos na Tabela 2 e na Tabela 3.

**Tabela 2: Comportamento do Reservatório da UHE Corumbá I**

Corumbá I	Média Histórica Mensal	Variância	Desvio Padrão
Janeiro	69,1%	18,3%	22,2%
Fevereiro	77,0%	15,7%	20,3%
Março	88,1%	5,2%	7,8%
Abril	91,0%	4,3%	5,2%
Mai	84,2%	9,8%	16,2%
Junho	80,3%	11,6%	16,6%
Julho	74,2%	13,2%	16,9%
Agosto	60,6%	15,0%	18,6%
Setembro	46,6%	14,1%	16,6%
Outubro	37,1%	15,2%	18,4%
Novembro	42,4%	15,9%	19,7%
Dezembro	60,0%	19,1%	23,6%

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do ONS (2022).

**Tabela 3: Comportamento da Geração na UHE Corumbá I**

Corumbá I	Média Histórica Mensal (MW)	Variância	Desvio Padrão
Janeiro	340,82	97,87	112,64
Fevereiro	394,20	106,23	131,18
Março	374,82	87,46	112,15
Abril	396,20	77,82	100,23
Mai	313,15	81,68	98,91
Junho	240,71	66,81	79,93
Julho	194,72	60,59	69,31
Agosto	183,62	41,68	57,32
Setembro	184,00	52,89	64,07
Outubro	169,90	52,97	67,50
Novembro	207,05	62,42	90,89
Dezembro	272,32	78,36	107,26

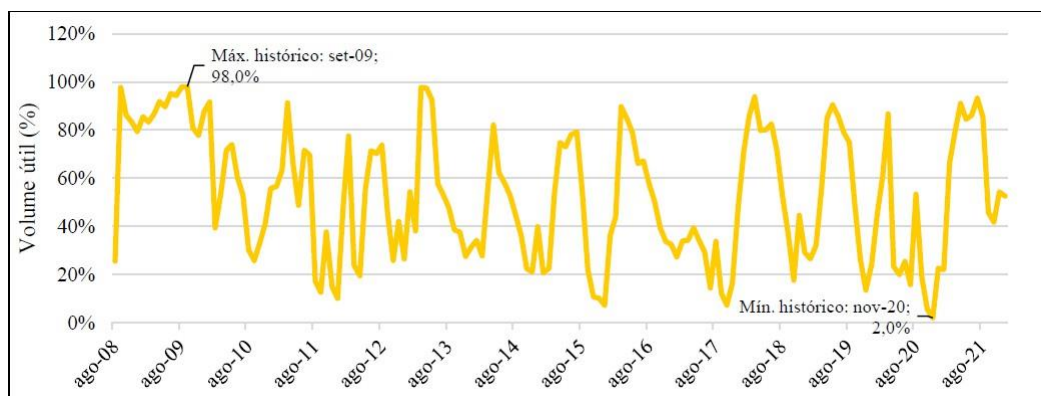
Fonte: Elaboração própria a partir de dados do ONS (2022).

### 5.3. UHE Corumbá III

Para a usina de Corumbá III, foram obtidos 4.457 registros diários, que correspondem ao período de 07/10/2009, data em que o reservatório entrou em operação comercial, até o dia 31/12/2021. Entretanto, a usina entrou em operação em outubro de 2019. Por intermediar a UHE Corumbá I e a UHE Corumbá IV, a UHE Corumbá III, este reservatório apresenta um volume útil de armazenamento médio anual de 50%, devido a necessidade de manter as vazões mínimas a jusante para não comprometer o funcionamento da UHE Corumbá IV e o ecossistema local. No Gráfico 9, temos o volume útil do reservatório entre os períodos de agosto de 2008 a 2021.

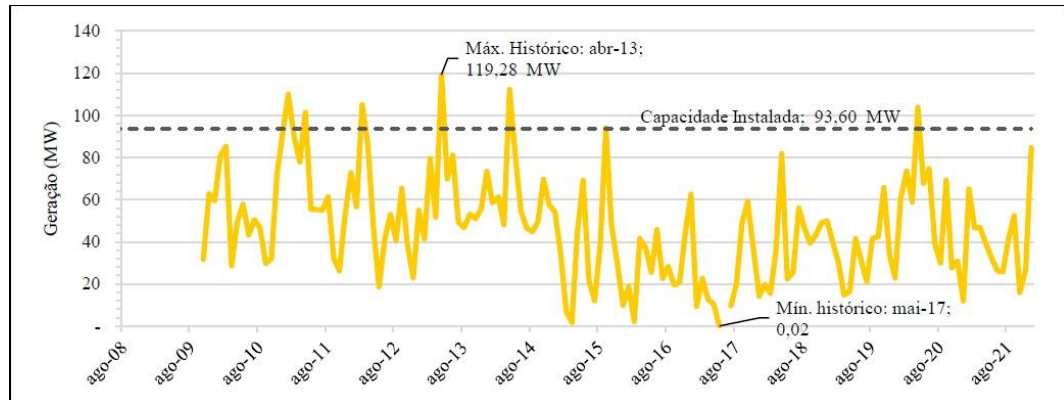
De acordo com a série histórica, temos um volume médio anual de 50%, que é inferior ao mínimo operativo (73%). A mediana deste período encontra-se em 46,75% e um desvio padrão de 25,46%. Ao analisarmos as Figuras 27 e 28 e as Tabelas 4 e 5, podemos constatar que os maiores desvios ocorrem de janeiro a maio. Além disso, podemos observar que o período seco da bacia (março a agosto) tende a apresentar os maiores acumulados para posterior manutenção do leito do rio e abastecimento da sociedade.

Figura 26: Volume útil do Reservatório da UHE Corumbá III entre 2008-2021 (%)



Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

Figura 27: Geração da UHE Corumbá III entre 2008-2021 (MW)



Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

**Tabela 4: Comportamento do Reservatório da UHE Corumbá III**

Corumbá III	Média Histórica Mensal	Variância	Desvio Padrão
Janeiro	47,58%	18,67%	23,46%
Fevereiro	51,92%	19,34%	21,98%
Março	69,32%	21,58%	24,53%
Abril	69,78%	20,14%	25,96%
Mai	68,01%	18,35%	22,71%
Junho	66,78%	15,93%	20,99%
Julho	62,60%	19,03%	24,99%
Agosto	53,53%	17,57%	23,27%
Setembro	42,04%	19,01%	26,89%
Outubro	33,74%	17,30%	24,23%
Novembro	34,46%	19,48%	24,64%
Dezembro	39,05%	18,41%	23,62%

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

**Tabela 5: Comportamento da Geração na UHE Corumbá III**

Corumbá III	Média Histórica Mensal (MW)	Variância	Desvio Padrão
Janeiro	49,57	22,34	28,53
Fevereiro	51,50	31,32	35,45
Março	42,11	24,39	25,59
Abril	63,59	35,17	38,12
Mai	45,17	25,29	25,43

Junho	41,70	22,74	22,89
Julho	36,65	19,73	17,38
Agosto	40,54	20,18	10,70
Setembro	49,62	25,14	19,98
Outubro	40,73	14,12	17,09
Novembro	44,23	13,01	15,41
Dezembro	50,90	22,44	27,89

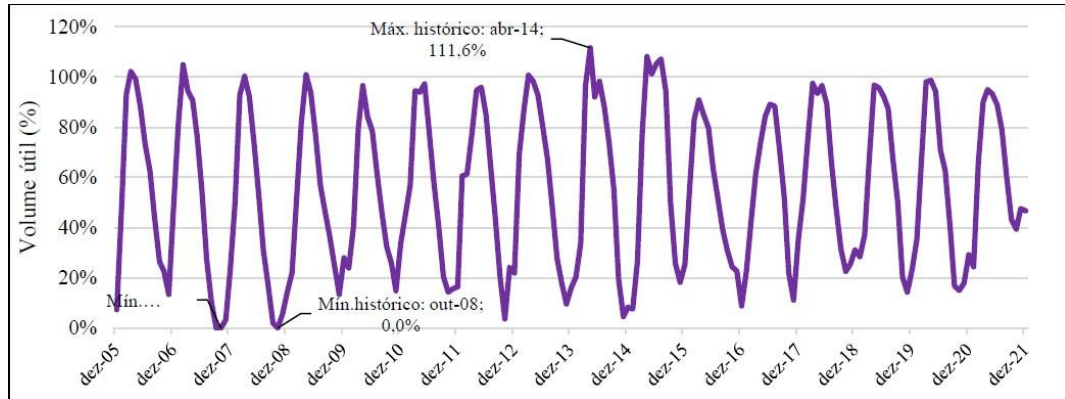
Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

Em relação a série histórica de geração, a usina operou acima da média em 48% do período. Porém, como esta usina operou 75% do período abaixo do volume mínimo, foram registrados 713 dias com geração igual a 0 MW. Nota-se que os maiores desvios em relação à média histórica se concentram no período de dezembro a maio do ano subsequente. Os dados apresentam baixa correlação tanto quando analisados na escala mensal e quanto na escala diária. Efetuando o cálculo de Correlação Linear de Pearson, obtemos um coeficiente de correlação igual a 0,18, indicando que neste reservatório a correlação entre volume útil do reservatório e geração de energia é muito fraca. Os coeficientes negativos nos meses de junho e outubro indicam que, quando o volume útil está elevado, a geração tende a diminuir, o que está em concordância, devido ao armazenamento necessário para manutenção do rio e ao armazenamento que será feito no reservatório da usina a jusante durante o período seco.

#### 5.4 UHE Corumbá I

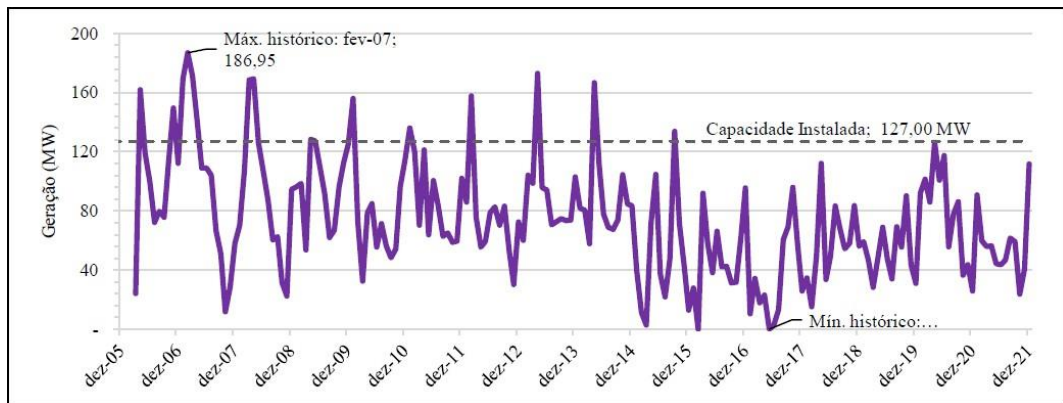
O reservatório para acumulação de água da UHE Corumbá IV iniciou suas operações em dezembro de 2005, enquanto sua entrada em operação comercial (geração) ocorre efetivamente em março de 2006. Em decorrência disso, foram utilizados 5.995 registros diários entre os dias de 24 de março de 2006 e 31 de dezembro de 2021. Quanto aos volumes mínimos, foram observados valores nulos em 2007 e 2008. Tal fato se deu devido ao déficit de precipitação na região em que a usina está inserida. Segundo o Boletim de Monitoramento e Análise Climática (CLIMANÁLISE, 2007), a região teve chuvas abaixo da média histórica como ilustrado nas Figura 29 e Figura 30 .

**Figura 28 - Volume útil do Reservatório da UHE Corumbá IV entre 2005-2021 (%)**



Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

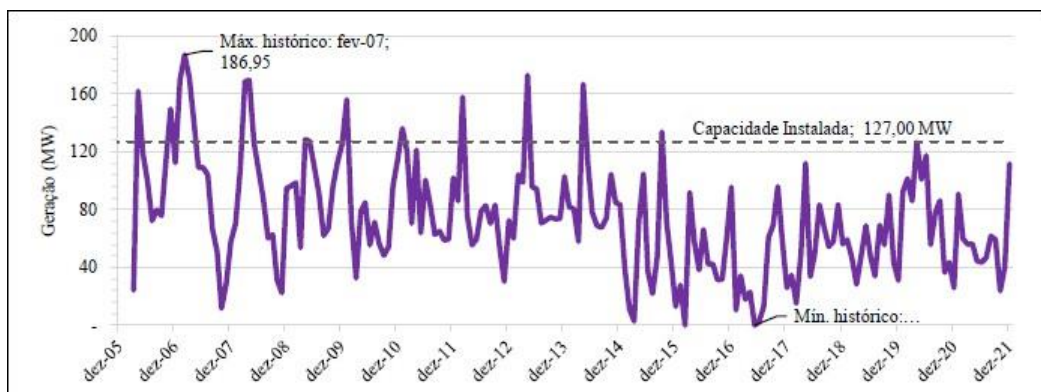
Figura 29: Geração da UHE Corumbá IV entre 2005-2021 (MW)



Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

Ao observar a geração histórica no Figura 30 e as médias mensais de volume útil na Tabela 6, notamos que a geração atinge valores nulos em 98 dias. Isso se deve ao uso múltiplo deste reservatório, que é responsável por fazer o tratamento de efluentes e abastecer a região de Brasília. Por conta das obras saneamento, a usina teve suas atividades reduzidas entre 2014 e 2016, retornando a operação normal em 2017 (CAMORI; SOARES, 2022).

Figura 30 - Geração da UHE Corumbá IV entre 2005-2021 (MW)



**Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).**

A UHE de Corumbá IV apresenta variação do volume do reservatório de acordo com os períodos úmidos e secos, armazenando volumes durante a estiagem e utilizando o volume para geração durante o período úmido.

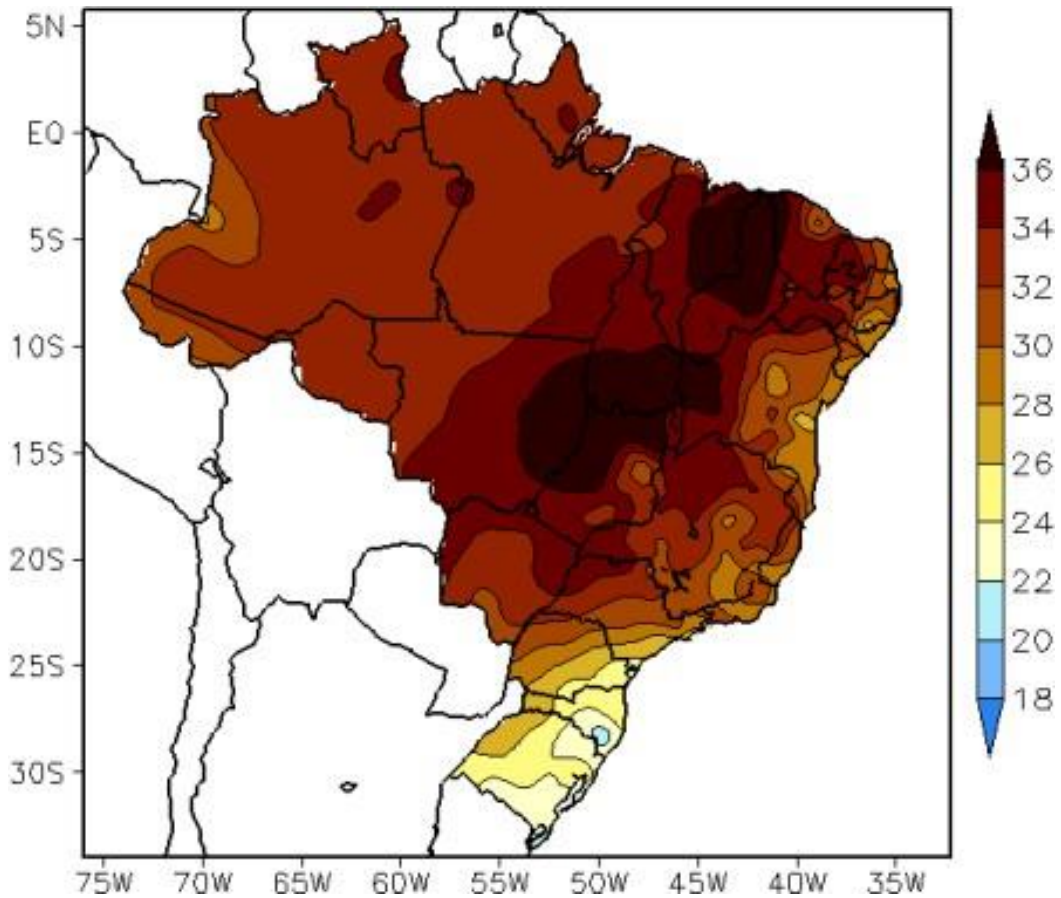
**Quadro 10: Comportamento do Reservatório da UHE Corumbá IV**

Corumbá IV	Média Histórica Mensal	Variância	Desvio Padrão
Janeiro	35,77%	15,61%	18,50%
Fevereiro	55,98%	16,03%	19,31%
Março	85,64%	10,55%	12,43%
Abril	95,88%	6,11%	9,42%
Maio	92,36%	4,48%	6,06%
Junho	84,29%	8,89%	11,30%
Julho	72,04%	13,82%	16,45%
Agosto	52,53%	14,84%	19,11%
Setembro	33,48%	12,28%	15,49%
Outubro	19,65%	6,81%	9,70%
Novembro	17,52%	7,31%	10,73%
Dezembro	24,55%	9,55%	10,87%

**Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).**

Além disso, foi constatado temperaturas acima da média histórica. No local onde a UHE Corumbá IV se encontra tem como temperatura média anual de 22°C e em 2007 este valor saltou para 32°C (Figura 30) que contribuiu para a evaporação da água no reservatório.

**Figura 30 - Temperaturas máximas no Brasil**



Fonte: Climanálise (CPTEC/INPE, 2008, p. 1).

Quanto ao desvio padrão elevado para a geração de energia apresentado na Tabela 07.

**Quadro 11: Comportamento da Geração da UHE Corumbá IV**

Corumbá IV	Média Histórica Mensal	Variância	Desvio Padrão
Janeiro	80,70	35,05	46,02
Fevereiro	79,79	42,52	48,28
Março	67,88	35,98	48,29
Abril	105,83	43,64	49,85
Maiο	80,48	31,87	37,79
Junho	74,78	27,70	33,04
Julho	64,37	21,51	26,20
Agosto	64,13	7,41	9,86

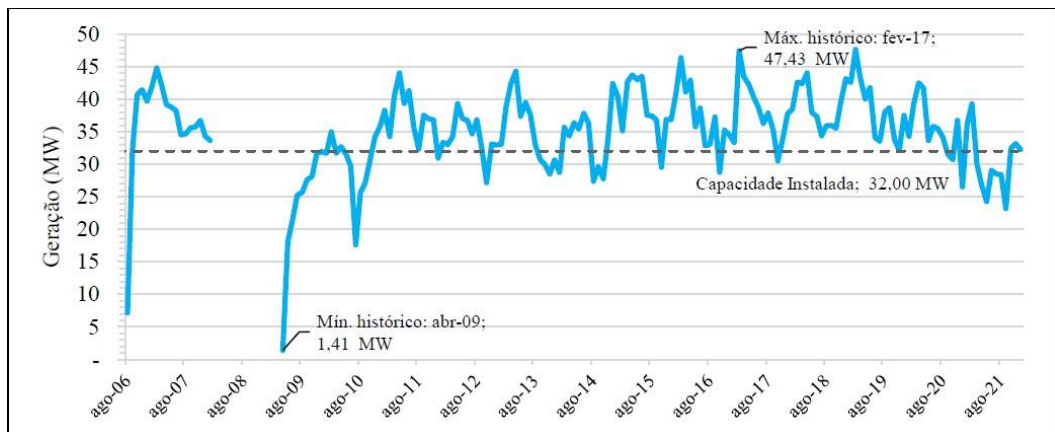
Setembro	68,25	14,92	22,35
Outubro	62,77	25,71	31,00
Novembro	64,44	26,75	34,30
Dezembro	76,56	31,67	36,89

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

### 5.5. UHE Espora

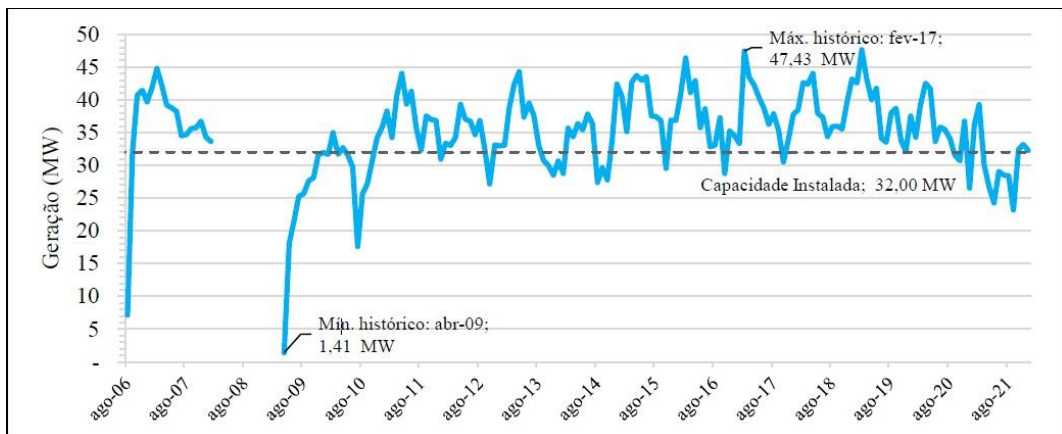
A UHE Espora apresentou um volume operacional nulo no dia 31 de janeiro de 2008 (ÁGUA...,2008), sofreu embargos durante sua recuperação e voltou a operar em setembro de 2010 conforme ilustrado Figura 33. Tal fato se deve ao rompimento da barragem devido às chuvas fortes. Pode-se observar que o mês crítico para o reservatório é o outubro, tal fato se deve ao início do período seco na região.

Figura 31- Volume útil do Reservatório da UHE Espora entre 2006-2021 (%)



Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

Figura 32- Geração da UHE Espora entre 2000-2021 (MW)



Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

Podemos observar na Tabela 13 valores elevados para o desvio padrão e variância para o volume útil do reservatório. Isso se deve ao fato do reservatório ser pequeno e sofrer com mais intensidade as elevações de temperatura na região.

**Quadro 12: Comportamento do Reservatório da UHE Espora**

Espora	Volume médio (%)	Volume Mediano (%)	Desvio Padrão (%)
Janeiro	40,66	32,25	31,42
Fevereiro	51,28	49,96	35,82
Março	69	90,26	38,82
Abril	75,56	98,01	39,01
Mai	75,29	96,22	38,43
Junho	70,27	85,96	36,37
Julho	62,38	71,78	33,83
Agosto	50,27	53,47	29,46
Setembro	35,12	29,04	25,36
Outubro	25,36	20,78	20,84
Novembro	24,44	14,71	22,93
Dezembro	32,71	22,32	28,85
Ano	50,55	50,11	37,08

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

**Quadro 13: - Comportamento da Geração da UHE Espora**

Espora	Média (MW)	Mediana (MW)	Desvio Padrão (MW)
Janeiro	25,09	28,82	8,3
Fevereiro	23,24	23,8	10,52
Março	25,09	31,31	10,93
Abril	23,98	30	11,07
Mai	24,38	27,82	9,1
Junho	23,98	24,86	8,85
Julho	22,72	21,47	8,79
Agosto	22,12	21,37	8,74
Setembro	22,06	21,19	8,75

Outubro	22,12	20,87	7,51
Novembro	23,5	22,33	7,96
Dezembro	24,33	8,21	8,21
Ano	23,54	23,85	9,15

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

Podemos observar na Tabela 09 valores elevados para o desvio padrão e variância para o volume útil do reservatório. Isso se deve ao fato do reservatório ser pequeno e sofrer com mais intensidade as elevações de temperatura na região.

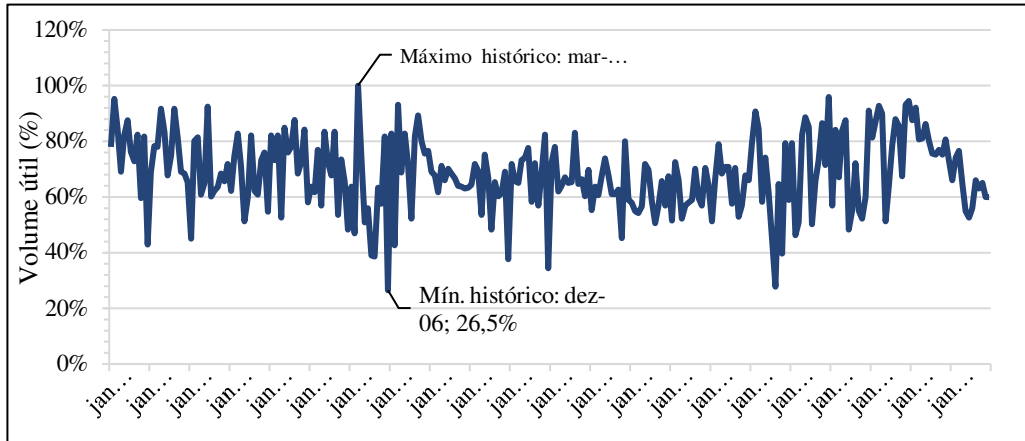
**Quadro 14: Grau de Correlação – UHE Espora**

	Coeficiente de correlação	Interpretação
Janeiro	0,55	Moderada
Fevereiro	0,63	Moderada
Março	0,79	Forte
Abril	0,75	Forte
Mai	0,68	Moderada
Junho	0,66	Moderada
Julho	0,63	Moderada
Agosto	0,39	Fraca
Setembro	0,33	Fraca
Outubro	0,42	Moderada
Novembro	0,42	Moderada
Dezembro	0,51	Moderada
Ano	0,53	Moderada

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

## 5.6 UHE Miranda

**Figura 33: Volume útil do Reservatório da UHE Miranda entre 2000-2021 (%)**



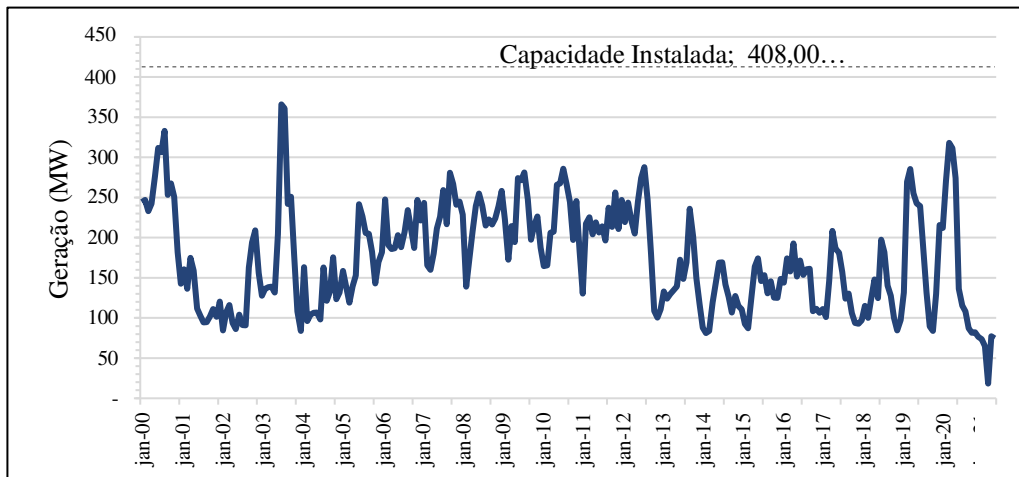
Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

Efetuada os cálculos de média e desvio padrão com os dados diários agrupados de forma mensal conforme exposto na Tabela 17, pode-se notar uma pequena oscilação em relação ao histórico dos últimos 20 anos.

**Quadro 15: Comportamento do Reservatório da UHE Miranda**

Miranda	Volume médio (%)	Volume Mediano (%)	Desvio Padrão (%)
Janeiro	66,75	66,73	14,64
Fevereiro	68,51	67,41	12,42
Março	70,72	70,80	14,60
Abril	71,66	71,84	12,10
Mai	69,79	68,43	13,41
Junho	69,23	68,08	11,38
Julho	65,81	65,88	12,19
Agosto	65,36	64,36	13,55
Setembro	66,74	65,66	13,05
Outubro	67,78	67,07	12,24
Novembro	67,01	67,41	10,50
Dezembro	67,26	67,75	14,92
Ano	68,04	67,75	13,13

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

**Figura 34: Geração da UHE Miranda entre 2000-2021 (MW)**

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

**Quadro 16: Comportamento da Geração da UHE Miranda**

Miranda	Média (MW)	Mediana (MW)	Desvio Padrão (MW)
Janeiro	180,55	166,07	66,57
Fevereiro	171,57	164,66	65,89
Março	171,46	162,09	66,93
Abril	156,05	147,01	68,14
Mai	139,95	117,94	62,16
Junho	143,07	119,70	63,31
Julho	157,92	148,97	71,80
Agosto	172,93	180,29	84,63
Setembro	191,11	187,89	20,57
Outubro	199,33	213,17	82,61
Novembro	204,74	204,75	70,52
Dezembro	193,68	78,93	78,93
Ano	173,54	164,78	69,11

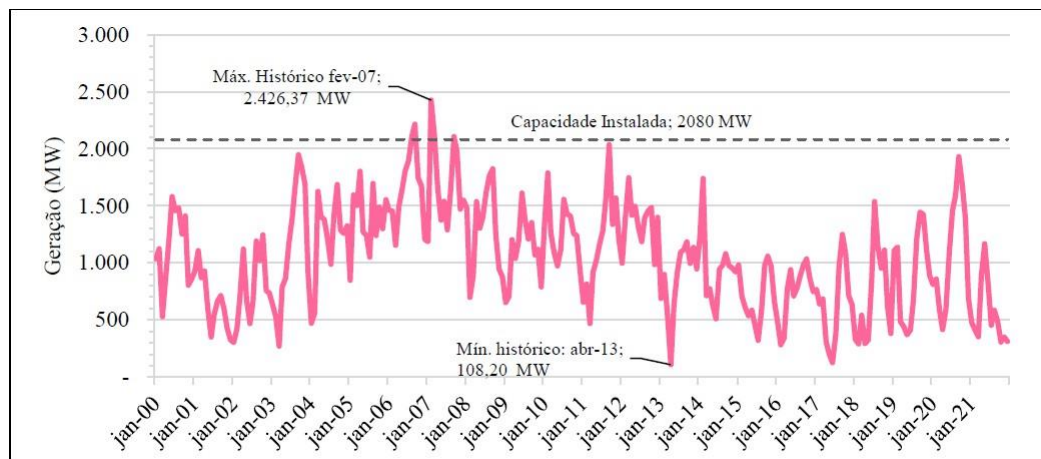
Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

**Quadro 17: Grau de Correlação – UHE Miranda**

Período	Coeficiente de correlação	Interpretação
Janeiro	0,17	Muito Fraca
Fevereiro	0,02	Muito Fraca
Março	0,05	Muito Fraca
Abril	0,07	Muito Fraca
Maio	-0,25	Fraca
Junho	0,05	Muito Fraca
Julho	0,22	Fraca
Agosto	0,14	Muito Fraca
Setembro	0,27	Fraca
Outubro	0,07	Muito Fraca
Novembro	0,07	Muito Fraca
Dezembro	0,23	Fraca
Ano	0,08	Muito Fraca

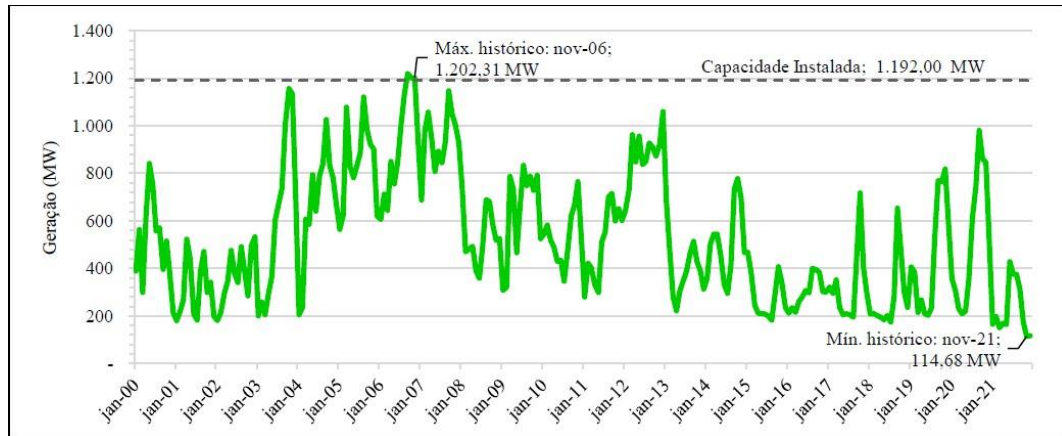
Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

## 5.7 UHE Emborcação

**Figura 35 - Volume do Reservatório da UHE Emborcação entre 2000-2021 (%)**

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

**Figura 39 - Geração da UHE Emborcação entre 2000-2021 (MW)**



Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

**Quadro 18: Comportamento do Reservatório da UHE Emborcação**

Emborcação	Média Histórica Mensal	Variância	Desvio Padrão
Janeiro	42,33%	19,22%	23,67%
Fevereiro	48,87%	20,76%	25,06%
Março	55,28%	21,35%	25,35%
Abril	58,07%	22,97%	26,47%
Mai	57,78%	23,19%	26,36%
Junho	56,04%	22,73%	25,75%
Julho	53,09%	21,19%	24,04%
Agosto	48,12%	19,36%	22,11%
Setembro	41,90%	18,02%	20,40%
Outubro	35,64%	16,89%	19,12%
Novembro	32,30%	15,10%	17,38%
Dezembro	34,97%	14,88%	18,20%

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

**Quadro 19: Comportamento da Geração da UHE Emborcação**

Emborcação	Média (MW)	Mediana (MW)	Desvio Padrão (MW)
Janeiro	291,22	233,28	176,27
Fevereiro	284,20	217,54	174,75
Março	336,72	248,32	242,01
Abril	333,08	252,03	210,32

Maio	336,60	247,43	214,32
Junho	342,12	282,09	200,70
Julho	373,43	295,74	223,47
Agosto	448,56	419,98	232,46
Setembro	504,42	510,37	232,39
Outubro	496,18	503,44	242,59
Novembro	458,98	452,04	246,01
Dezembro	496,18	242,59	242,59
Ano	382,04	333,64	232,05

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

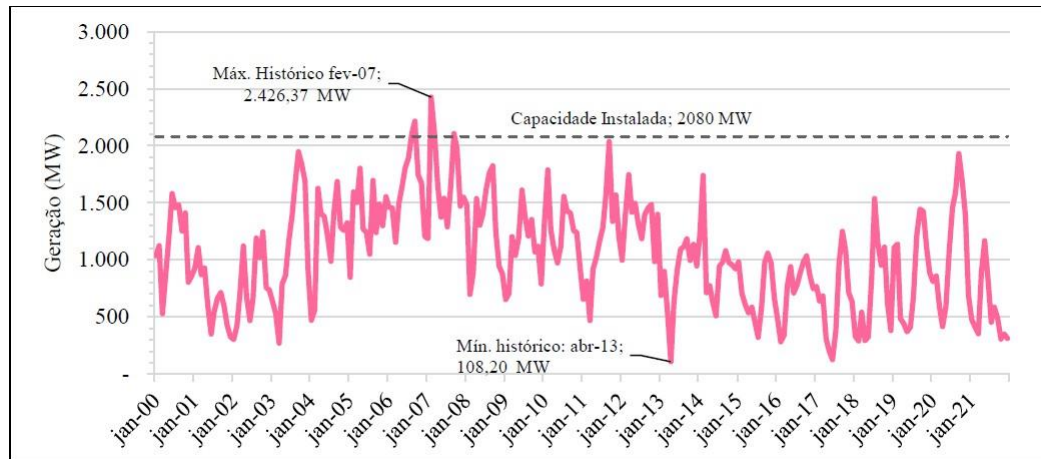
**Quadro 20 - Grau de Correlação – UHE Emborcação**

Período	Coefficiente de Correlação	Grau
Janeiro	0,45	Moderada
Fevereiro	0,54	Moderada
Março	0,73	Forte
Abril	0,66	Moderada
Maio	0,60	Moderada
Junho	0,66	Moderada
Julho	0,74	Moderada
Agosto	0,70	Forte
Setembro	0,61	Moderada
Outubro	0,48	Moderada
Novembro	0,48	Moderada
Dezembro	0,48	Moderada
Ano	0,48	Moderada

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

## 5.8 UHE Itumbiara

**Gráfico 26 - Volume do Reservatório da UHE Itumbiara entre 2000-2021 (%)**



Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

**Quadro 21: Comportamento do Reservatório da UHE Itumbiara**

Itumbiara	Volume médio (%)	Volume Mediano (%)	Desvio Padrão (%)
Janeiro	37,89	32,22	23,54
Fevereiro	46,3	39,08	26,55
Março	55,52	56,81	28,48
Abril	63,51	60,33	28,88
Mai	67,85	69,34	26,73
Junho	65,51	69,8	26,63
Julho	62,4	62,02	24,37
Agosto	54,32	49,08	23,75
Setembro	42,5	38,1	22,89
Outubro	33,76	29,6	21,27
Novembro	28,02	20,2	18,44
Dezembro	27,8	20,2	18,66
Ano	49,39	43,96	28,21

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

**Quadro 22: Comportamento da Geração da UHE Itumbiara**

Itumbiara	Média (MW)	Mediana (MW)	Desvio Padrão (MW)
Janeiro	633,07	579,81	406,84

Fevereiro	659,09	578,02	455,95
Março	643,13	541,67	449,82
Abril	644,73	608,55	448,33
Maio	677,79	661,42	415,32
Junho	705,11	699,78	427,18
Julho	796,52	817,65	433,86
Agosto	944,13	981,59	404,56
Setembro	964,53	993,63	434,19
Outubro	924,60	967,08	391,38
Novembro	690,88	649,61	324,37
Dezembro	688,80	638,98	325,41
Ano	754,86	753,73	439,39

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

**Quadro 23: Grau de Correlação – UHE Itumbiara**

Período	Coeficiente de correlação	Interpretação
Janeiro	0,31	Fraca
Fevereiro	0,37	Fraca
Março	0,50	Moderada
Abril	0,53	Moderada
Maio	0,43	Moderada
Junho	0,49	Moderada
Julho	0,44	Moderada
Agosto	0,51	Moderada
Setembro	0,51	Moderada
Outubro	0,30	Fraca
Novembro	0,44	Moderada
Dezembro	0,45	Moderada
Ano	0,33	Fraca

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

## 5.9 UHE Nova Ponte

**Quadro 24: Comportamento do reservatório da UHE Nova Ponte**

Nova Ponte	Volume médio (%)	Volume Mediano (%)	Desvio Padrão (%)
Janeiro	43,79	29,21	27,70
Fevereiro	48,58	37,47	28,28
Março	53,62	46,26	28,25
Abril	57,80	55,23	28,80
Maio	58,51	52,95	28,98
Junho	58,32	52,80	29,02
Julho	56,44	52,24	28,69
Agosto	53,07	48,05	27,93
Setembro	48,56	40,39	26,90
Outubro	43,78	34,70	26,27
Novembro	40,00	32,22	25,99
Dezembro	39,57	28,64	26,18
Ano	50,16	43,63	28,57

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

**Quadro 25: Comportamento da Geração da UHE Nova Ponte**

Nova Ponte	Média (MW)	Mediana (MW)	Desvio Padrão (MW)
Janeiro	206,70	169,11	111,17
Fevereiro	195,09	167,80	106,62
Março	193,15	151,46	104,18
Abril	190,30	138,79	105,19
Maio	179,61	136,03	98,95
Junho	188,59	140,73	98,02
Julho	213,07	177,26	110,72
Agosto	242,53	229,06	125,41

Setembro	260,50	278,49	125,82
Outubro	264,13	272,76	115,96
Novembro	255,15	261,82	109,91
Dezembro	214,70	107,22	107,22
Ano	217,09	186,52	114,05

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

**Quadro 26: Grau de Correlação – UHE Nova Ponte**

Período	Coefficiente de correlação	Grau
Janeiro	0,46	Moderada
Fevereiro	0,49	Moderada
Março	0,61	Moderada
Abril	0,65	Moderada
Mai	0,47	Moderada
Junho	0,52	Moderada
Julho	0,57	Moderada
Agosto	0,57	Moderada
Setembro	0,57	Moderada
Outubro	0,48	Moderada
Novembro	0,45	Moderada
Dezembro	0,38	Fraca
Ano	0,45	Moderada

Fonte: Autoria própria a partir de dados do ONS (2022).

### 5.10 Análise Comparativa dos Parâmetros das UHEs

A partir da análise dos dados de volume útil e geração de energia das nove usinas hidrelétricas estudadas na bacia do Rio Paranaíba, é possível identificar padrões e diferenças significativas no comportamento operacional de cada aproveitamento.

**Sazonalidade e comportamento dos volumes:** Todas as usinas apresentaram sazonalidade marcante nos volumes dos reservatórios, com picos entre março e maio (final do período úmido) e mínimos entre setembro e novembro (final do período seco). A UHE Corumbá I apresentou volume médio mensal variando de 37,1% (outubro) a 91,0% (abril), com amplitude de 53,9 pontos percentuais. A UHE Corumbá

IV apresentou amplitude ainda maior, de 78,4 pontos percentuais (17,5% em novembro contra 95,9% em abril), evidenciando maior vulnerabilidade à sazonalidade. Já a UHE Miranda apresentou a menor variação sazonal, com amplitude de apenas 6,3 pontos percentuais.

**Correlação volume-geração:** Os coeficientes de correlação de Pearson revelaram comportamentos distintos entre as usinas. A UHE Espora apresentou a correlação anual mais elevada ( $r = 0,53$ , moderada), com correlação forte nos meses de março ( $r = 0,79$ ) e abril ( $r = 0,75$ ). Em contraste, a UHE Miranda apresentou correlação anual muito fraca ( $r = 0,08$ ), por operar predominantemente como usina a fio d'água. A UHE Corumbá III também apresentou correlação muito fraca ( $r = 0,18$ ), reflexo das restrições de vazão mínima a jusante. As UHEs Emborcação, Nova Ponte, Itumbiara e São Simão apresentaram correlações moderadas ( $r$  entre 0,33 e 0,48).

**Desvio padrão e variabilidade:** A UHE Espora apresentou os maiores desvios padrão relativos no volume (média anual de 37,1%), tornando-o mais suscetível a variações climáticas. A UHE São Simão (1.680 MW) operou com desvio padrão de 319,7 MW (19% da capacidade), refletindo maior estabilidade. A UHE Itumbiara apresentou o maior desvio padrão absoluto de geração (439,4 MW, equivalente a 21% da potência instalada).

**Impacto de eventos climáticos:** Três eventos críticos foram identificados no período: a crise energética de 2001, com queda abrupta nos volumes e geração; a crise hídrica de 2014-2017, com mínimos históricos nas UHEs Emborcação, Nova Ponte e Itumbiara; e o efeito La Niña em 2020-2021, que causou redução inesperada nos volumes durante o período chuvoso, como observado em novembro de 2020 na UHE Corumbá I.

**Eficiência operacional:** A UHE São Simão registrou 125 ocorrências com geração acima da capacidade instalada, atingindo pico de 1.701,93 MW (1,3% acima dos 1.680 MW nominais). A UHE Corumbá III operou 75% do período abaixo do volume mínimo operativo (73%), com 713 dias de geração nula. A UHE Corumbá IV, responsável pelo abastecimento de Brasília, teve 98 dias de geração nula.

**Uso do solo e impactos antrópicos:** Dados do MAPBIOMAS (2022) revelaram que entre 2000 e 2020 aproximadamente 338.079 milhões de hectares de

vegetação natural do cerrado foram convertidos para uso antrópico na bacia, afetando o regime hidrológico e contribuindo para a redução dos volumes dos reservatórios.

## 6 CONCLUSÃO

Os reservatórios conferem segurança para o abastecimento de água pela regularização que promovem nos escoamentos fluviais e podem ser utilizados para geração de energia. Apesar dos impactos ambientais causadas pela implantação, a matriz de geração hidráulica é considerada limpa, os reservatórios têm uma vida útil, de pelo menos cinquenta anos, ocasionando o assoreamento gradativo do leito do rio.

A partir dos dados levantados e analisados foi possível concluir que os reservatórios interligados às usinas hidrelétricas da bacia do Rio Paranaíba têm sua geração atrelada ao volume útil disponível no reservatório, porém, a depender da usina, a correlação está entre baixa e moderada. Além disso, observa-se uma sazonalidade da produção energética de acordo com as estações do ano, sendo o período úmido observado entre outubro de um ano até março do ano seguinte.

Pode-se aferir também que em épocas de cheias, a geração é acima da capacidade instalada das usinas, o que pode gerar uma sobrecarga no sistema de transmissão de energia. Além disso, observa-se nesta região uma frequência elevada nos últimos anos do fenômeno La Niña, o que impacta na redução do volume dos reservatórios e na geração.

Os reservatórios conferem segurança para o abastecimento de água pela regularização que promovem nos escoamentos fluviais e podem ser utilizados para geração de energia. Apesar dos impactos ambientais causadas pela implantação, a matriz de geração hidráulica é considerada limpa, os reservatórios têm uma vida útil, de pelo menos cinquenta anos, ocasionando o assoreamento gradativo do leito do rio.

Por fim, torna-se necessário uma consolidação e centralização dos dados, pois há divergências entre órgãos governamentais de pesquisa e desenvolvimento. Esse fato pode gerar necessidade de utilizar métodos de Machine Learning para tratamento de dados e simulações das ocorrências passadas.

## 7 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2009. Brasília: ANA, 2009.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Atlas Brasil: abastecimento urbano de água. Brasília: ANA, 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Plano de recursos hídricos e do enquadramento dos corpos hídricos superficiais da bacia hidrográfica do rio Paranaíba. Brasília: ANA, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Atlas de energia elétrica do Brasil. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Sistema de Informações de Geração da ANEEL. Brasília: ANEEL, 2022.
- ÁGUA de barragem inunda e interdita BR-364 em Goiás. G1, 31 jan. 2008.
- BIER, F. L. Caracterização morfométrica e hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Taquarembó – RS. 2013. TCC – UFSM, 2013.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, 1997.
- BRASIL. CNRH. Resolução nº 32, de 15 de outubro de 2003. Divisão Hidrográfica Nacional. Brasília, 2003.
- CAMORI, E. C.; SOARES, A. K. Análise da operação da UHE Corumbá IV. 2022.
- CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. Hidrologia. Rio de Janeiro: UFRRJ, 2006.
- CARVALHO, D. F.; MELLO, J. L. P.; SILVA, L. D. B. Irrigação e drenagem. Rio de Janeiro: UFRRJ, 2007.
- CLIMANÁLISE. Boletim de Monitoramento e Análise Climática. São José dos Campos: CPTEC/INPE, 2007.
- CORUMBÁ CONCESSÕES S.A. Relatório anual 2016. Brasília, 2016.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Avaliação Ambiental Integrada da Bacia do Rio Paranaíba. Brasília: EPE, 2007.
- IBGE. Censo demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.
- INMET. Normais climatológicas do Brasil 1961-1990. Brasília: INMET, 2014.
- LIMA, W. P. Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas. 2. ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2009.
- LOPES, J. E. G.; SANTOS, R. C. P. Capacidade de reservatórios. São Paulo: EPUSP, 2002.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomass – Coleção 7 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. 2022.

MME. Plano Nacional de Energia 2030. Brasília: MME, 2007.

MOREIRA, I. A. Modelagem hidrológica chuva-vazão. 2005. Dissertação (Mestrado) – UFPE, 2005.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. Hidrologia estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

O FENÔMENO LA NIÑA e seus impactos no Brasil. CPTEC/INPE, 2021.

OLIVEIRA, E. Crise energética de 2001: lições e impactos. 2021.

ONS. Histórico da operação: geração de energia. 2022.

ONS. Mapa do Sistema Interligado Nacional. 2019.

PEREIRA, J. G. Usinas hidrelétricas: planejamento e construção. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2015.

PEREIRA, J. G. Comunicação pessoal sobre características técnicas das UHEs. 2022.

PIMENTEL, S. M. Hidrologia: engenharia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

PRH DA BACIA DO RIO PARANAÍBA. Resumo executivo. Brasília: ANA, 2011.

QUADROS, M. F. L. et al. Climatologia e variabilidade climática no Brasil. CPTEC/INPE, 2014.

QUEIROZ, A. T. O papel da cobertura vegetal no ciclo hidrológico. 2012. Dissertação – UFV, 2012.

SCHREIBER, G. P. Usinas hidrelétricas. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

SILVA, A. C.; FERREIRA, M. C. Climatologia e análise ambiental da bacia do rio Paranaíba. 2012.

SILVA, A. C.; FERREIRA, M. C. Variabilidade climática e seus impactos na bacia do Paranaíba. 2015.

SILVESTRE, M. E. D. Código de Águas: histórico e evolução. 2008.

SNIRH. Base de dados hidrológicos. 2013-2021.

SOUZA, G. S. Introdução aos modelos de regressão linear e não-linear. Brasília: Embrapa, 2001.

TEODORO, V. L. I. et al. Conceito de bacia hidrográfica e classificação. Rev. Bras. Geografia Física, v. 10, 2007.

TRAJANO, R. C. N. et al. Gestão de bacias hidrográficas. 2012.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; NETTO, O. M. C. Gestão da água no Brasil. Brasília: UNESCO, 2001.

TUCCI, C. E. M. et al. Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: ABRH, 2001.

USGS. The water cycle. 2018.

WWAP. The United Nations World Water Development Report 2014: water and energy. Paris: UNESCO, 2014.