VARIABILIDADE HIDROLÓGICA E DESEMPENHO OPERACIONAL NA UHE PORTO PRIMAVERA: UMA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE SÉRIES TEMPORAIS

Gabriela Oliveira Marques de Velasco[1], Rafael da Rocha Camargo[1], Flávia Batista Cassiano[1], Yves Renzo Minoru Uesato[1], Naiara Lima Costa[1]

[1]*Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia e Ciências (UNESP-FEC), Rosana, Brasil (gabriela.om.velasco@unesp.br)*

Resumo: Este trabalho analisa o comportamento das vazões afluente, turbinada e defluente da UHE Porto Primavera, a partir de dados do ONS entre 2016 e 2020. Foram aplicadas técnicas de estatística descritiva e análise temporal para identificar padrões sazonais e variabilidade hidrológica. Os resultados indicam redução na disponibilidade hídrica ao longo do período e forte dependência da operação ao regime de afluência.

Palavras-chave: Hidrologia; Estatística descritiva; Vazão; Energia hidrelétrica; Segurança hídrica.

INTRODUÇÃO

A geração hidrelétrica desempenha papel central na matriz elétrica brasileira, sendo responsável por grande parte da produção de energia e diretamente dependente das condições hidrológicas das bacias hidrográficas (Empresa de Pesquisa Energética, 2023). Nesse contexto, a compreensão do comportamento das vazões ao longo do tempo é fundamental para o planejamento energético, a segurança hídrica e a operação eficiente dos empreendimentos hidrelétricos (CEPEL,s/d). Em um cenário marcado por variabilidade climática e crescente demanda por energia, a análise consistente desses parâmetros torna-se ainda mais relevante para garantir a confiabilidade do sistema elétrico (MARENGO e ALVES, 2015).

A análise estatística de séries temporais hidrológicas constitui uma ferramenta essencial para interpretar a variabilidade natural dos sistemas fluviais, permitindo identificar padrões sazonais, tendências de longo prazo e eventos extremos. Técnicas de estatística descritiva, como médias e medidas de dispersão, aliadas à análise gráfica, possibilitam sintetizar grandes volumes de dados e fornecer suporte à tomada de decisão em engenharia (TUCCI, 1993). Além disso, essas ferramentas representam uma etapa fundamental para o desenvolvimento de modelos preditivos mais complexos, uma vez que permitem compreender previamente o comportamento dos dados, identificar inconsistências e orientar a escolha de metodologias adequadas (MONTGOMERY e RUNGER, 2010).

No âmbito da engenharia de energia e de recursos hídricos, a análise descritiva desempenha papel estratégico, pois fornece subsídios para a avaliação do desempenho operacional de usinas, a gestão de reservatórios e o planejamento de sistemas em cascata. A caracterização das vazões permite, por exemplo, estimar a disponibilidade energética, avaliar riscos associados a períodos de escassez hídrica e otimizar a operação das unidades geradoras, contribuindo para a eficiência e sustentabilidade do sistema (ONS, 2020; ANA, 2021).

A Usina Hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta (Porto Primavera), localizada no rio Paraná, insere-se em um sistema em cascata caracterizado por forte interdependência operacional entre as usinas. Nesse tipo de arranjo, a dinâmica das vazões afluente, turbinada e defluente reflete tanto o regime hidrológico da bacia quanto as estratégias de operação adotadas para atender à demanda energética e garantir a estabilidade do sistema (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2020). Dessa forma, a análise integrada dessas variáveis permite compreender não apenas o comportamento hidrológico local, mas também as interações operacionais entre diferentes empreendimentos.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento das vazões afluente, turbinada e defluente da UHE Porto Primavera, a partir de dados disponibilizados pelo ONS, com ênfase no período de 2016 a 2020. Busca-se identificar padrões sazonais, variabilidade e possíveis tendências, contribuindo para a compreensão da relação entre disponibilidade hídrica e desempenho operacional da usina, além de fornecer suporte para análises futuras no contexto do planejamento energético.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir da base de dados abertos disponibilizada pelo ONS, que reúne informações hidrológicas e operacionais das usinas do Sistema Interligado Nacional (SIN). A base considerada engloba registros das Usinas

Hidrelétricas de Porto Primavera (PPR) e Jupiá (JUP), abrangendo o período de 2002 a 2020.

A aquisição dos dados foi realizada por meio do portal de dados abertos do ONS. Inicialmente, foi efetuada uma busca utilizando o termo "dados hidrológicos ONS", direcionando ao conjunto de dados intitulado "Dados Hidráulicos por Reservatório - Base diária", conforme ilustrado na Figura 1. Esse conjunto reúne dados verificados e consolidados pelo operador, disponibilizados em periodicidade diária.



Figura 1. Acesso ao conjunto de dados "Dados Hidráulicos por Reservatório – Base diária" no portal de dados abertos do ONS.

Na página do conjunto de dados (Figura 2), são disponibilizadas diversas planilhas correspondentes a diferentes períodos temporais, organizadas em arquivos separados. A partir dessa interface, foram identificados e selecionados os arquivos referentes aos intervalos de interesse, sendo realizado o download das bases contendo os dados históricos das usinas consideradas no estudo.



Figura 2. Interface do portal de dados abertos do ONS com a listagem das planilhas disponíveis para download da base hidrológica diária.

Destaca-se que os dados disponibilizados pelo ONS são atualizados em intervalos periódicos, não contemplando necessariamente os anos mais recentes no momento da coleta. Dessa forma, o período analisado corresponde ao intervalo mais completo disponível à época da obtenção dos dados.

Os dados disponibilizados são diários e foram organizados em médias anuais.

Inicialmente, a base foi submetida a um processo de filtragem para seleção exclusiva dos registros referentes à UHE Porto Primavera, garantindo maior consistência na análise do comportamento hidrológico da usina. Em seguida, foram selecionadas as variáveis de interesse: vazão afluente média (VAM), vazão turbinada média (VTM) e vazão defluente média (VDM), consideradas em seus valores médios diários.

Os dados estavam distribuídos em duas planilhas distintas (2002–2009 e 2009–2020), sendo realizada a unificação dessas séries para obtenção de um conjunto contínuo de informações. Após essa etapa, procedeu-se à organização temporal, padronização das variáveis e verificação de consistência dos dados, incluindo a identificação de possíveis falhas ou valores discrepantes.

A partir da base consolidada, foram calculadas médias mensais e anuais, bem como os respectivos desvios padrão. Para análise da variabilidade e identificação de padrões, foram construídos gráficos do tipo boxplot e séries temporais. As análises foram conduzidas com ênfase no período de 2016 a 2020, em função da maior completude e confiabilidade dos dados disponíveis.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação das vazões afluente, turbinada e defluente é fundamental para compreender tanto o comportamento hidrológico local quanto a eficiência operacional da usina. Nesse contexto, a Vazão Afluente Média (VAM) representa o volume de água disponível no sistema, influenciando diretamente o potencial de geração. A Vazão Turbinada Média (VTM), por sua vez, corresponde à parcela desse volume efetivamente convertida em energia elétrica, refletindo o despacho pelo Sistema Interligado Nacional (SIN) e as estratégias operacionais adotadas. Já a Vazão Defluente Média (VDM) permite avaliar a restituição da água ao curso do rio, sendo um importante indicativo do balanço hídrico e das condições de operação da usina (ONS, 2023).

A análise conjunta dessas três variáveis possibilita não apenas a caracterização do regime hidrológico ao longo do tempo, mas também a interpretação da resposta operacional da usina frente a diferentes cenários de disponibilidade hídrica. Esse tipo de abordagem está diretamente associado à análise de séries temporais hidrológicas, amplamente utilizada para identificar padrões, tendências e variabilidade em dados de vazão, sendo essencial para o planejamento e a gestão de recursos hídricos (ADAMOWSKI e

SUN, 2010). Além disso, a aplicação dessas técnicas permite avançar para modelos de previsão de vazão e geração hidrelétrica, contribuindo para a otimização da operação e o planejamento energético (PAPACHARALAMPOUS e TYRALIS, 2022). Esse tipo de metodologia auxilia na compreensão dos modelos utilizados pelo Operador Nacional (ONS), por exemplo (CEPEL, s/d.)

As análises estatísticas e a construção dos gráficos apresentados nesta seção foram realizadas com o auxílio do software Microsoft Excel, amplamente utilizado em estudos de engenharia para organização, tratamento e visualização de dados. A partir da base previamente consolidada, foram elaboradas tabelas contendo as médias anuais das vazões VAM, VTM e VDM para o período de 2016 a 2020, além de gráficos de séries temporais e diagramas do tipo boxplot, utilizados para avaliar a variabilidade e a dispersão dos dados (MONTGOMERY e RUNGER, 2010).

A disposição da UHE Porto Primavera dentro do sistema hidrelétrico da bacia do Rio Paraná também contribui para a compreensão do comportamento das vazões analisadas. Como ilustrado na Figura 3, esse sistema é caracterizado por uma configuração em cascata, composta majoritariamente por usinas a fio d'água, intercaladas por poucos reservatórios de regularização. De acordo com a Resolução Normativa ANEEL n. 425, de 1 de fevereiro de 2011 - Diário Oficial de 11 de fev. de 2011, seção 1, p. 56, usinas a fio d'água são caracterizadas como usinas hidrelétrica (ou pequena central hidrelétrica, que não é o caso), que utilizam reservatório com acumulação suficiente apenas para prover regularização diária ou semanal, ou ainda que utilize diretamente a vazão afluente do aproveitamento. Essa característica faz com que as condições hidrológicas de montante exerçam influência direta e praticamente imediata sobre as operações a jusante, reduzindo a capacidade de armazenamento e o controle independente das vazões ao longo do sistema (ANA, 2024).

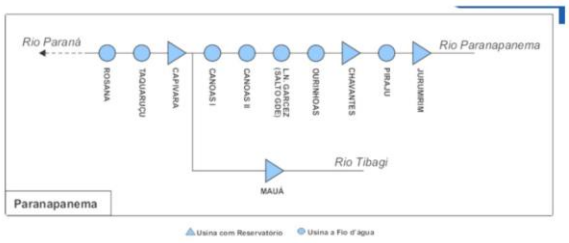


Figura 3: Usinas hidrelétricas na cascata do Rio Paraná, com destaque para a posição da UHE Porto Primavera.
Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2024).

Nesse contexto, o padrão observado nas vazões VAM, VTM e VDM reflete não apenas o regime natural do rio, mas também o sincronismo operacional necessário para garantir a estabilidade hídrica e energética do conjunto de usinas. Por atuar em um sistema com limitada capacidade de regularização, a UHE Porto Primavera assume um papel estratégico na acomodação das oscilações hidrológicas provenientes das usinas a montante.

Assim, o monitoramento e a análise integrada dessas variáveis permitem não apenas descrever o comportamento operacional da usina, mas também compreender sua função dentro de um sistema hidrelétrico altamente interdependente, no qual pequenas variações podem gerar impactos significativos no balanço hídrico, na segurança operacional e no atendimento à demanda energética do SIN.

Com base na base de dados consolidada, foram elaboradas tabelas 1, 2 e 3 contendo os valores médios mensais das vazões turbinada (VTM), defluente (VDM) e afluente (VAM), nessa ordem, para o período de 2016 a 2020, acompanhadas de seus respectivos desvios padrão. Essas tabelas permitem uma análise comparativa entre os diferentes tipos de vazão ao longo do tempo, evidenciando padrões sazonais e variações interanuais. Ressalta-se que, para o ano de 2020, os dados disponíveis contemplam apenas o período até o mês de setembro, em função da limitação da base de dados disponibilizada pelo ONS no momento da coleta. Ainda assim, os dados obtidos são suficientes para caracterizar o comportamento das vazões no período analisado e subsidiar as discussões apresentadas a seguir.

Tabela 1. VTM ao longo de 2016 a 2020.

Mês	2016	2017	2018	2019	2020
Jan.	6.195,22 ±526,64	7.139,92 ±1.208,42	6.972,08 ±1.056,09	6.684,63 ±856,53	6.620,77 ±813,37
Fev.	6.353,46 ±851,29	6.795,29 ±1.072,01	6.172,90 ±817,59	5.954,67 ±910,16	6.606,39 ±784,80
Mar.	7.256,78 ±450,03	6.837,67 ±810,84	6.833,75 ±964,70	6.039,82 ±927,42	6.096,46 ±857,83
Abr.	6.257,89 ±633,57	5.716,27 ±720,20	5.670,17 ±748,30	5.787,54 ±792,50	5.739,68 ±756,20
Mai.	5.862,58 ±625,78	5.717,93 ±758,40	5.055,16 ±353,05	5.111,83 ±572,89	4.952,26 ±172,00
Jun.	5.783,69 ±672,18	5.192,73 ±252,48	5.136,40 ±436,47	4.820,91 ±191,79	5.084,65 ±498,91
Jul.	5.813,69 ±708,60	4.979,41 ±355,24	4.612,34 ±407,23	4.782,54 ±164,99	5.056,76 ±253,53

Ago.	6.013,63 ±935,67	5.378,35 ±620,07	6.091,48 ±971,21	4.980,95 ±382,25	5.395,59 ±560,20
Set.	6.120,83 ±739,33	6.044,50 ±1.163,32	4.965,90 ±981,07	6.308,65 ±1.107,28	5.277,24 ±331,02
Out.	6.276,45 ±906,19	5.945,39 ±1.099,92	6.120,60 ±859,71	5.852,99 ±839,58	-
Nov.	5.709,76 ±786,12	5.216,70 ±1.049,22	6.548,52 ±771,61	5.359,52 ±559,05	-
Dez.	6.769,35 ±1.071,3	6.515,77 ±1.004,16	5.937,47 ±970,05	6.500,70 ±826,87	-
$\bar{x}$	6.206,59 ±821,63	5.954,31 ±1.095,46	5.843,23 ±1.097,74	5.681,06 ±922,81	5.277,24 ±331,02

A Tabela 1 apresenta os valores médios mensais da vazão turbinada (VTM). De modo geral, observa-se que os maiores valores de VTM ocorrem nos primeiros meses do ano, especialmente entre janeiro e março, período associado à estação chuvosa na região da bacia do Rio Paraná. Esse comportamento indica maior disponibilidade hídrica e, consequentemente, maior capacidade de geração de energia. Em contrapartida, os menores valores concentram-se nos meses de inverno, como junho e julho, refletindo a redução das vazões naturais. Além disso, nota-se uma possível tendência de diminuição dos valores médios ao longo dos anos analisados, o que pode estar relacionado a variações hidrológicas interanuais ou a mudanças nas estratégias operacionais do sistema.

Tabela 2. VDM ao longo de 2016 a 2020.

Mês	2016	2017	2018	2019	2020
Jan.	6.630,55 ±2.053,01	7.258,79 ±1.306,40	7.070,54 ±1.102,09	6.688,14 ±941,34	6.624,34 ±793,28
Fev.	7.411,38 ±2.762,22	6.942,49 ±1.283,89	6.176,47 ±817,67	5.958,19 ±910,12	6.610,04 ±784,87
Mar.	8.574,64 ±1.590,60	6.841,22 ±810,78	6.837,38 ±964,69	6.043,33 ±927,45	6.100,03 ±858,02
Abr.	6.267,34 ±636,96	5.719,84 ±720,17	5.673,69 ±748,33	5.791,07 ±792,44	5.743,20 ±765,25
Mai.	5.866,51 ±625,54	5.979,65 ±1.200,64	5.064,59 ±348,69	5.119,84 ±570,95	4.955,75 ±172,06
Jun.	6.918,47 ±2.241,23	5.501,84 ±643,99	5.150,84 ±429,52	4.826,96 ±191,79	5.092,66 ±495,48
Jul.	5.817,28 ±708,55	4.983,10 ±355,24	4.616,31 ±407,02	4.786,13 ±165,03	5.060,25 ±253,53
Ago.	6.022,07 ±927,65	5.381,90 ±620,07	6.095,00 ±971,22	4.984,5 ±382,27	5.407,08 ±574,24
Set.	6.127,47 ±739,97	6.048,20 ±1.163,40	4.978,80 ±975,95	6.321,71 ±1.108,33	5.280,69 ±330,81
Out.	6.294,55 ±910,34	5.950,68 ±1.098,55	6.124,26 ±860,13	5.859,07 ±836,66	-
Nov.	5.741,77 ±744,44	5.219,85 ±1.049,34	6.552,94 ±711,98	5.364,25 ±577,60	-
Dez.	6.772,98 ±1.071,38	6.519,48 ±1.004,29	5.943,12 ±968,11	6.504,25 ±826,77	-
$\bar{x}$	6.541,94 ±1.519,74	6.025,87 ±1.193,10	5.857,31 ±1.104,66	5.686,28 ±962,77	5.692,65 ±898,23

A Tabela 2 apresenta os valores médios mensais da vazão defluente (VDM), também com seus respectivos desvios padrão. Observa-se que o comportamento da VDM acompanha, de forma geral, o padrão da vazão turbinada, uma vez que ambas estão diretamente relacionadas ao volume de água liberado pela usina. No entanto, em determinados períodos, especialmente nos meses de maior vazão, a VDM apresenta valores superiores à VTM, o que pode indicar a ocorrência de vertimentos, quando o volume afluente excede a capacidade de turbinamento. Esse comportamento é esperado em sistemas com baixa capacidade de regularização, como é o caso de usinas a fio d'água, nas quais o controle do escoamento é limitado (BRASIL, 2011).

Tabela 3. VAM ao longo de 2016 a 2020.

Mês	2016	2017	2018	2019	2020
Jan.	6.560,97 ±1.941,06	7.282,02 ±1.448,02	6.947,25 ±919,16	6.564,82 ±1.069,74	6.578,32 ±1.079,96
Fev.	7.571,09 ±2.543,54	7.019,53 ±1.290,04	6.560,53 ±936,74	6.068,95 ±941,31	6.673,39 ±972,19
Mar.	8.590,15 ±1.477,67	6.725,05 ±1.008,66	6.767,20 ±1.229,89	6.020,22 ±935,17	5.918,34 ±1094,75
Abr.	6.131,22 ±1.034,79	5.680,06 ±830,27	5.681,57 ±767,82	5.807,00 ±835,35	5.901,43 ±985,97
Mai.	5.959,38 ±947,07	6.195,37 ±1.328,36	5.025,95 ±841,75	5.119,78 ±946,07	5.047,40 ±806,85

Jun.	6.790,64 ±2.095,38	5.390,08 ±662,56	5.087,23 ±987,08	4.708,02 ±556,33	5.028,86 ±639,73
Jul.	5.941,22 ±1.052,51	4.960,01 ±585,45	4.770,46 ±652,34	4.801,39 ±974,32	4.968,13 ±656,40
Ago.	5.921,99 ±1.028,02	5.443,59 ±898,30	6.079,55 ±1.334,79	5.053,54 ±1.173,38	5.529,66 ±1.125,86
Set.	5.976,47 ±908,74	5.873,65 ±1.267,70	5.274,64 ±1.283,85	6.274,10 ±1.121,53	5.333,65 ±210,90
Out.	6.379,21 ±1.051,66	6.289,80 ±1.482,84	6.000,55 ±1.234,06	5.959,07 ±930,11	-
Nov.	5.559,18 ±896,30	5.100,16 ±735,52	6.457,66 ±965,20	5.213,30 ±760,55	-
Dez.	7.027,19 ±1.642,82	6.449,91 ±1.302,64	6.174,08 ±1.151,53	6.581,08 ±998,30	-
$\bar{x}$	6.540,06 ±1.713,38	6.031,74 ±1.323,37	5.899,85 ±1.250,57	5.679,73 ±1.137,09	5.700,88 ±1.134,41

Já a Tabela 3 apresenta os valores médios mensais da vazão afluente (VAM), representando o regime hidrológico natural da bacia contribuinte. Observa-se maior variabilidade nos dados de VAM em comparação com as demais vazões, evidenciada pelos desvios padrão mais elevados na maior parte dos meses, o que reflete a influência direta de fatores climáticos, como precipitação e sazonalidade. Os maiores valores concentram-se nos meses de verão, enquanto os menores ocorrem no período seco, padrão característico de regiões tropicais. A comparação entre VAM, VTM e VDM permite a compreensão de como a usina responde às variações naturais de disponibilidade hídrica, evidenciando sua capacidade de adaptação operacional frente às oscilações do regime fluvial.

Para complementar a análise descritiva dos dados, os gráficos boxplots apresentados a seguir permitem uma visualização mais detalhada da distribuição estatística das vazões entre os anos avaliados. Esse tipo de representação gráfica possibilita identificar a dispersão dos dados, a amplitude interquartil, a posição das medianas e a ocorrência de valores discrepantes (*outliers*), contribuindo para uma interpretação mais robusta do comportamento hidrológico e operacional da usina ao longo do período analisado (MONTGOMERY e RUNGER, 2010). Assim, a Figura 4 apresenta o boxplot das médias mensais da VTM entre os anos de 2016 e 2020.

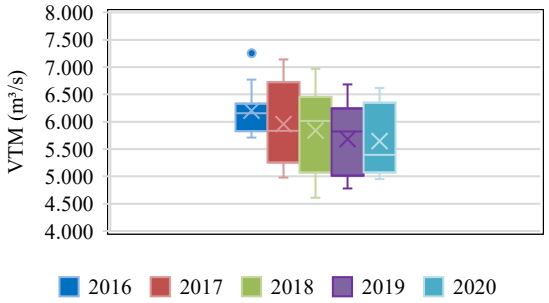


Figura 4: Gráfico Boxplot da VTM de 2016 a 2020.

Fonte: Elaborado pelos próprios autores a partir dos dados disponibilizados pela ONS Dados Abertos.

A análise do boxplot evidencia diferenças importantes na variabilidade da VTM ao longo dos anos. Observa-se que os anos de 2017 e 2018 apresentaram maiores amplitudes interquartis, indicando maior dispersão operacional e maior variabilidade nas condições hidrológicas. Em contrapartida, os anos de 2016 e 2019 apresentaram distribuição mais concentrada, sugerindo comportamento operacional relativamente mais estável. Além disso, destaca-se a presença de um valor discrepante superior em 2016, associado a eventos hidrológicos excepcionais e possivelmente a condições específicas de operação da usina. De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2016), esse foi um ano com grande volume de chuva, especialmente concentradas em algumas regiões brasileiras, como a região Sudeste, com destaque ao estado de São Paulo, o que auxilia a explicar o ponto de discrepância.

De maneira geral, a proximidade entre as medianas demonstra certa regularidade operacional da VTM no período estudado, ainda que as diferenças na dispersão revelem alterações nas condições de disponibilidade hídrica e no gerenciamento da geração de energia. Segundo Tucci (1993), análises estatísticas desse tipo são amplamente utilizadas em estudos hidrológicos por permitirem avaliar simultaneamente padrões de variabilidade, estabilidade operacional e ocorrência de eventos extremos em séries históricas de vazão.

A partir dessa análise estatística, apresenta-se na Figura 5 a série temporal da VTM entre os anos de 2016 e 2020.

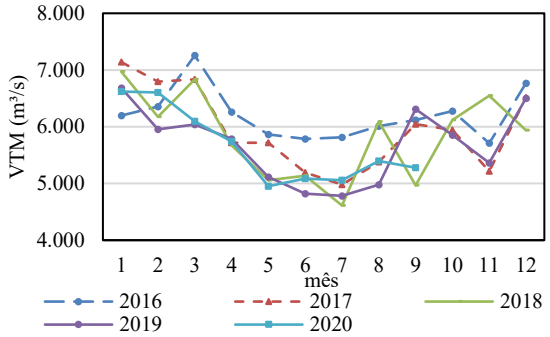


Figura 5: Série histórica da VTM de 2016 a 2020.

Fonte: Elaborado pelos próprios autores a partir dos dados disponibilizados pela ONS Dados Abertos.

A série histórica evidencia um comportamento sazonal bem definido, caracterizado por maiores valores nos primeiros e últimos meses do ano e reduções mais acentuadas entre os meses centrais, correspondentes ao período de estiagem. Esse padrão está diretamente relacionado à dinâmica hidrológica regional e à dependência da geração hidrelétrica em relação ao regime pluviométrico da bacia hidrográfica (ANA, 2023). O ano de 2016 caracteriza-se pela atipicidade na maior parte dos meses, reflexo de um alto volume de chuvas (INMET, 2016).

Entende-se que, embora exista uma tendência geral de repetição do comportamento sazonal entre os anos, algumas oscilações mensais indicam influência das estratégias operacionais adotadas pelo sistema elétrico, especialmente em função da demanda energética, do controle de reservatórios e das condições hidrometeorológicas específicas de cada período. Essa é uma característica fundamental do sistema brasileiro que é hidrotérmico (OLIVEIRA, 2020). O ano de 2020, por exemplo, apresentou comportamento relativamente mais uniforme ao longo dos meses, enquanto 2017 demonstrou maiores oscilações entre máximos e mínimos mensais.

Esses resultados demonstram que a VTM não depende exclusivamente da disponibilidade hídrica natural, mas também das decisões operacionais associadas à otimização da geração de energia e à gestão integrada dos reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN). Essa característica é reflexo do dilema do decisor e suportada por modelos matemáticos computacionais robustos que auxiliam na tomada de decisão da utilização ou não utilização da água (OLIVEIRA, 2020). Além disso, a identificação de padrões sazonais e de variabilidade temporal fornece subsídios importantes para estudos de planejamento energético, previsibilidade hidrológica e segurança operacional de usinas hidrelétricas (CEPEL, s/d.).

Na Figura 6 é apresentado o boxplot referente à VDM entre os anos de 2016 e 2020.

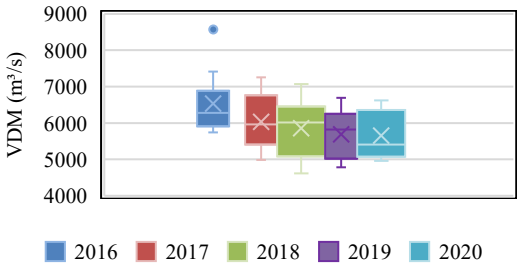


Figura 6: Gráfico Boxplot da VDM de 2016 a 2020.

Fonte: Elaborado pelos próprios autores a partir dos dados disponibilizados pela ONS Dados Abertos.

O boxplot da VDM apresenta comportamento semelhante ao observado para a VTM, o que era esperado devido à forte relação operacional entre ambas as variáveis. Entretanto, nota-se que a VDM apresenta amplitudes ligeiramente superiores em determinados anos, evidenciando a influência de vazões vertidas e de descargas não diretamente associadas à geração de energia. Os anos de 2017 e 2018 novamente demonstram maior dispersão dos dados, indicando maior variabilidade hidrológica e operacional durante o período.

Destaca-se novamente a presença de um ponto acima do limite superior da série, em 2016, associado a eventos atípicos. Segundo Tucci (1993), eventos extremos em séries de vazão são comuns em sistemas hidrológicos sujeitos à sazonalidade climática e ao gerenciamento operacional de reservatórios, sendo importantes indicadores da dinâmica hidráulica do sistema.

Além disso, observa-se relativa proximidade entre as medianas anuais, sugerindo certa estabilidade no comportamento médio da defluência ao longo do período estudado. Ainda assim, as diferenças na dispersão e nos limites superiores reforçam que a análise exclusiva de médias pode não representar adequadamente a variabilidade operacional da usina, tornando necessária a avaliação conjunta de métricas estatísticas complementares. A Figura 7 apresenta a série histórica das médias mensais da VDM para os anos de 2016 a 2020.

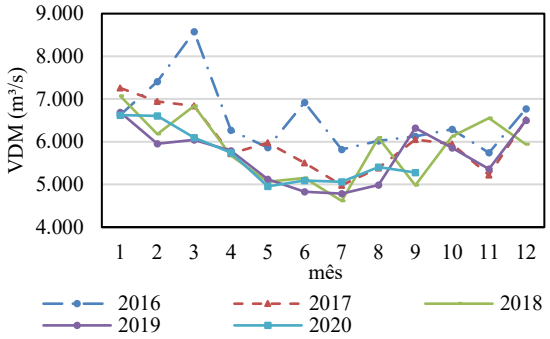


Figura 7: Série histórica da VDM de 2016 a 2020.

Fonte: Elaborado pelos próprios autores a partir dos dados disponibilizados pela ONS Dados Abertos.

A série temporal da VDM evidencia um comportamento sazonal relativamente bem definido, com maiores valores concentrados nos meses tipicamente chuvosos e reduções nos meses associados à menores precipitações, característica comum em séries hidrológicas de bacias brasileiras com forte influência climática sazonal (COLLISCHONN e TASSI, 2008). Esse padrão acompanha a dinâmica hidrológica característica da bacia do Rio Paraná e demonstra a influência direta das condições climáticas sobre a operação hidrelétrica (ANA, 2023).

Observa-se também a ocorrência de oscilações mais abruptas em determinados intervalos mensais, especialmente no ano de 2016, indicando possíveis episódios de aumento de afluência, vertimentos ou ajustes operacionais relacionados ao controle do reservatório e à demanda energética do Sistema Interligado Nacional. Comparativamente, os anos de 2019 e 2020 apresentaram comportamento mais uniforme, sugerindo menor variabilidade operacional ao longo do período anual.

Outro aspecto relevante é a forte proximidade entre os perfis temporais da VDM e da VTM, evidenciando que grande parte da vazão defluente esteve associada ao processo de turbinagem. Ainda assim, pequenas diferenças entre as curvas indicam momentos em que ocorreram descargas adicionais não convertidas diretamente em geração energética, o que pode estar relacionado a estratégias de segurança hidráulica e gerenciamento do reservatório.

Dessa forma, os resultados reforçam que a análise temporal da VDM constitui uma importante ferramenta para compreender a dinâmica operacional da usina, permitindo avaliar simultaneamente regularidade hidrológica, resposta operacional e possíveis eventos extremos associados ao sistema hidroenergético.

Na Figura 8 é apresentado o boxplot das médias mensais da VAM para o mesmo período. Por representar diretamente a entrada de água no sistema, a VAM constitui uma das variáveis mais relevantes para a compreensão do comportamento hidrológico da bacia e da disponibilidade hídrica para geração de energia.

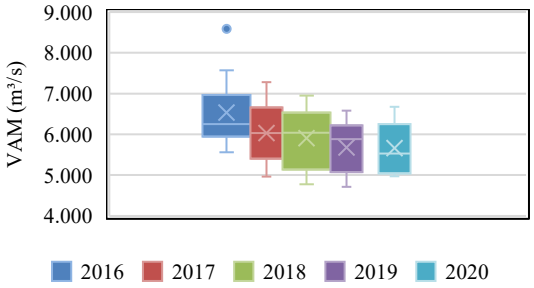


Figura 8: Gráfico boxplot da VAM de 2016 a 2020.

Fonte: Elaborado pelos próprios autores a partir dos dados disponibilizados pela ONS Dados Abertos.

O boxplot evidencia que a VAM apresenta variabilidade ao longo do período analisado, refletindo diretamente a influência das condições climáticas e hidrológicas da bacia hidrográfica sobre o sistema. Os anos de 2016 e 2017 apresentaram maiores amplitudes interquartis e maiores valores máximos, evidenciando os períodos com maior ocorrência de aportes hídricos elevados. Em contrapartida, os anos mais recentes apresentaram distribuições mais concentradas e medianas ligeiramente inferiores, sugerindo redução gradual da disponibilidade hídrica média ao longo do período estudado.

A assimetria observada em algumas distribuições demonstra que os eventos de maior vazão não ocorrem de maneira uniforme ao longo do ano, concentrando-se principalmente nos períodos chuvosos. Esse comportamento evidencia a forte sazonalidade hidrológica característica da região e reforça a importância da análise estatística da distribuição completa dos dados, e não apenas de seus valores médios. Conforme discutido por Collischonn e Tassi (2008), a variabilidade temporal das vazões constitui um dos principais fatores associados à gestão operacional de reservatórios e ao planejamento energético de sistemas hidrelétricos.

Na sequência, a Figura 9 apresenta a série histórica das médias mensais da VAM.

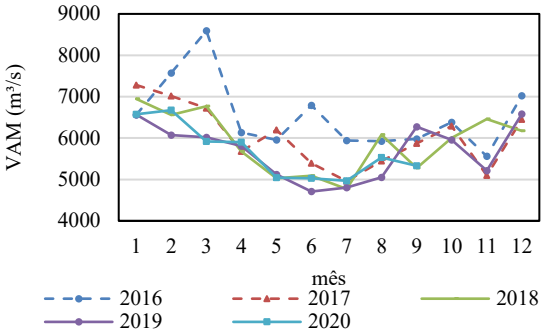


Figura 9: Série histórica da VAM de 2016 a 2020.

Fonte: Elaborado pelos próprios autores a partir dos dados disponibilizados pela ONS Dados Abertos.

A análise da série histórica da VAM corrobora as análises anteriores, reforçando o padrão é típico de bacias hidrográficas tropicais e subtropicais brasileiras, nas quais a precipitação exerce influência direta sobre a disponibilidade hídrica e, consequentemente, sobre a geração hidroenergética (ANA, 2023).

Observa-se também que a amplitude das oscilações tende a diminuir entre os anos mais recentes, especialmente entre 2018 e 2020, indicando a redução da disponibilidade hídrica média da bacia.

Outro aspecto relevante é a forte correlação visual entre os padrões observados para VAM, VTM e VDM, evidenciando como o comportamento da afluência condiciona diretamente a operação da usina. Dessa forma, alterações na disponibilidade hídrica impactam não apenas a capacidade de geração de energia, mas também o gerenciamento operacional do reservatório e o controle das vazões defluentes.

Nesse contexto, a análise conjunta das Figuras 8 e 9 permite compreender não apenas a distribuição estatística da VAM, mas também sua dinâmica temporal e suas implicações para o planejamento energético e a segurança operacional do sistema hidrelétrico. Além disso, a possível tendência de redução das vazões médias observada no período reforça a importância de estudos contínuos sobre variabilidade hidrológica e mudanças climáticas aplicadas ao setor elétrico.

Assim, a integração das análises estatísticas descritivas, incluindo médias, desvios padrão, boxplots e séries temporais, permitiu compreender de forma abrangente o comportamento hidrológico das vazões no período entre 2016 e 2020.

CONCLUSÃO

A análise das vazões afluente (VAM), turbinada (VTM) e defluente (VDM) da UHE Porto Primavera permitiu uma compreensão integrada do comportamento hidrológico da bacia e da resposta operacional da usina ao longo do período de 2016 a 2020. Os resultados evidenciaram a presença de um padrão sazonal bem definido, com maiores valores de vazão nos meses associados à estação chuvosa e redução significativa durante o período seco, refletindo diretamente o regime climático da região.

Observou-se que a vazão turbinada acompanha a disponibilidade hídrica indicada pela vazão afluente, demonstrando a coerência entre o volume disponível e a geração de energia. Por outro lado, a análise da vazão defluente indicou a ocorrência de vertimentos em determinados períodos, especialmente em meses de maior aporte hídrico, evidenciando limitações operacionais típicas de sistemas com baixa capacidade de regularização.

A comparação entre as três variáveis reforça o papel estratégico da UHE Porto Primavera dentro de um sistema hidrelétrico em cascata, no qual a operação depende fortemente das condições de montante e exige sincronização contínua entre as usinas. Nesse contexto, pequenas variações nas vazões podem impactar significativamente o balanço hídrico e a eficiência energética do sistema como um todo.

Além disso, o uso de técnicas de estatística descritiva mostrou-se adequado para a caracterização inicial dos dados, permitindo identificar padrões, variabilidade e possíveis tendências. Essa etapa constitui uma base fundamental para estudos mais avançados, como modelagem preditiva e otimização da operação hidrelétrica.

Por fim, ressalta-se que a limitação dos dados disponíveis para o ano de 2020, restritos ao período até setembro, não comprometeu a análise global do comportamento das vazões, embora indique a importância da utilização de séries históricas completas em estudos futuros. Dessa forma, o trabalho contribui para a compreensão da dinâmica hidrológica e operacional da usina, além de fornecer subsídios para análises mais aprofundadas no contexto do planejamento e gestão de recursos hídricos e energéticos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), em especial à Faculdade de Engenharia e Ciências (FEC) do Câmpus de Rosana, pelo suporte institucional e infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ADAMOWSKI, Jan; SUN, Karen. Development of a coupled wavelet transform and neural network method for flow forecasting of non-perennial

rivers in semi-arid watersheds. **Journal of Hydrology**, v. 390, n. 1-2, p. 85-91, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe anual 2023. Brasília: ANA, 2024. 118 p., il. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/101813. Acesso em: 25 de setembro. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: relatório pleno 2021. Brasília: ANA, 2022. 132 p., il. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/94125. Acesso em: 20 de setembro. 2025.

BRASIL. Resolução Normativa ANEEL n. 425, de 1 de fevereiro de 2011.

CEPEL - Centro de Pesquisa de energia elétrica. PREVIVAZ: Previsão de vazões diárias, semanais e mensais. Disponível em: https://www.cepel.br/linhas-de-pesquisa/previvaz/. Acesso em: 15 mai. 2026.

COLLISCHONN, Walter; TASSI, Rultinéia. Introduzindo hidrologia. 2008.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Panorama geral das condições meteorológicas e os principais eventos extremos significativos ocorridos no brasil em 2016. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Panorama-Geral-2016-Brasil.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2026.

MARENGO, Jose Antonio; ALVES, Lincoln M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, v. 19, n. 3, p. 485-494, 2015.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Applied statistics and probability for engineers**. John wiley & sons, 2010.

OLIVEIRA, Francisco José A (org). ONS. O planejamento da operação energética no sistema: conceitos, modelagem matemática, previsão de geração e carga/ Francisco José Arteiro de Oliveira. –- São Paulo : Artliber, 2020. 402 p. : il., color.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Glossário de termos técnicos do setor elétrico*. Rio de Janeiro: ONS, 2023.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Plano da Operação Energética (diversos relatórios)**. Rio de Janeiro: ONS, 2020.

PAPACHARALAMPOUS, Georgia; TYRALIS, Hristos. A review of machine learning concepts and methods for addressing challenges in probabilistic hydrological post-processing and forecasting. **Frontiers in Water**, v. 4, p. 961954, 2022.

TUCCI, Carlos EM. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Editora da universidade, 1993.