

Título:

Ajuste condicional nos cenários extremos de vazão não representativos gerados pelo modelo GEVAZP

Nº de Páginas: 20**Nº de Anexos:** 0**Dados do Cliente:**

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS

Rua Júlio do Carmo, 251 – Cidade Nova - Rio de Janeiro – RJ, CEP: 20211-160

Responsável:

Sra. Tatiana Frade Gonçalves Mundstock

Email: tatiana@ons.org.br

Departamento: Departamento de Sistemas Eletroenergéticos **Nº do PEP:** CPCT.ONELPD.714.008**Centro de Lucro:** C250000135**Centro de Custo:** C205000053**Resumo:**

Este documento se originou da investigação de valores extremos de vazão não representativos gerados pelo GEVAZP quando sujeito a uma tendência hidrológica muito baixa. São apresentados o equacionamento do modelo de geração de cenários de vazão, as análises realizadas e a estratégia de solução proposta. Os resultados apontam que os cenários extremos positivos de vazão não representativos do regime hidrológico observado são causados pela transformação lognormal três parâmetros quando existe uma tendência hidrológica muito baixa. Assim, foi proposta uma estratégia de ajuste condicional dos valores de vazão gerados, com suavização dos valores extremos positivos não representativos.

Observações:**Autores:**

Renata Pedrini – Cepel

João Victor G. Pandino de Oliveira - Cepel

Cristiane Barbosa da Cruz Oliveira – Cepel

Tiago Lino Bello – Cepel

Débora Dias Jardim Penna – ONS

Felipe Treistman - ONS

Palavras-Chave:Ajuste condicional no valor de vazão;
Planejamento da operação de médio prazo;
Cenários extremos positivos**Classificação de acesso:**☒ Público ☐ Interno ☐ Setorial ☐ Confidencial**Aprovação e data de emissão****André Luiz Diniz Souto Lima**
Chefe do Departamento DSE**Tel.:** (21) 2598-6046**E-mail:** diniz@cepel.br

CEPEL

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

PROJETO GEVAZP

Ajuste Condicional nos Cenários Extremos de Vazão não Representativos Gerados pelo Modelo GEVAZP

Outubro/2025

SUMÁRIO EXECUTIVO

Motivação: Este documento se originou da investigação de valores extremos positivos de vazão gerados pelo GEVAZP quando sujeito a uma Tendência Hidrológica (TH) muito baixa. São apresentados o equacionamento do modelo, as análises realizadas e a estratégia de solução proposta. A solução consiste no ajuste condicional do valor de vazão como forma de mitigação da geração desses cenários extremos positivos. Essa solução foi proposta a partir da exposição do problema pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) com posterior análise das possíveis causas

Objetivos: Diagnóstico das causas dos valores extremos de vazão não representativos gerados pelo modelo GEVAZP dada uma tendência hidrológica muito baixa e proposição de solução para o problema.

Metodologia: Primeiramente, é analisado o equacionamento matemático da geração de cenários, para entender quais partes do cálculo estão sendo afetadas por uma TH baixa. A seguir, é feita uma investigação prática, analisando as três etapas de geração de ruídos: geração de ruído normal, correlação espacial e transformação lognormal, quais as relações entre elas e os cenários de vazão gerados. Além disso, a investigação aprofunda-se na relação da variação da TH com a transformação lognormal dos ruídos. Por fim, é exposta a solução proposta e as conclusões das análises realizadas.

Resultados: As conclusões obtidas foram que os cenários extremos positivos de vazão não representativos são causados por uma combinação entre os maiores valores de ruídos e uma TH muito baixa. Os ruídos lognormais sofrem influência significativa dos valores da TH, alterando a forma de sua distribuição a partir da variação da TH. Valores mais baixos de TH geram um achatamento da distribuição com alongamento da cauda. Portanto, foi acatada a sugestão, inicialmente proposta pelo ONS, de ajuste condicional nos valores de vazão gerados, com suavização dos valores extremos positivos não representativos do regime hidrológico observado.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
1.1	Descrição do problema pelo ONS.....	5
1.2	Considerações iniciais	6
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	7
3	INVESTIGAÇÃO DO PROBLEMA.....	9
3.1	Análises dos ruídos para o caso base	9
3.2	Análise da Tendência Hidrológica.....	14
4	SOLUÇÃO PROPOSTA	17
5	FREQUÊNCIA DE AJUSTE	18
6	CONCLUSÕES.....	19
7	REFERÊNCIAS	20

1 INTRODUÇÃO

O modelo GEVAZP gera os cenários sintéticos de vazão para o modelo de curto-prazo, DECOMP, com base em um modelo Autorregressivo Periódico Anual, PAR(p)-A. Por meio dessa abordagem, a modelagem das vazões mensais incorpora a influência dos dados históricos, permitindo que cada cenário de afluência projetado para um determinado mês seja derivado das sequências observadas nos meses anteriores. Esse procedimento garante uma representação estatística da variabilidade hidrológica, levando em conta padrões sazonais e correlações temporais típicas das séries históricas. Além da componente autorregressiva ainda considera um ruído que adiciona variabilidade aos cenários.

O GEVAZP, utilizado para geração de cenários para o modelo de curto prazo, apresenta uma particularidade em que a vazão do 1º mês operativo é derivada das previsões semanais, provenientes do modelo SMAP/ONS para a maioria das UHEs.

Em sistemas hidrelétricos em cascata, as vazões incrementais das usinas podem assumir valores relativamente pequenos, ou até valores negativos — fisicamente inviáveis. Esses valores negativos, quando obtidos em escala mensal, costumam decorrer das simplificações associadas à representação da propagação da água entre reservatórios, bem como da consideração de processos como evaporação e armazenamento temporário nas áreas intermediárias entre as usinas. Para contornar esse problema, é comum aplicar transformações baseadas em distribuições lognormais, que garantem a positividade dos valores simulados [1]

No entanto, a imposição da lognormalidade altera a forma da distribuição original das vazões incrementais. Essa distorção é mais pronunciada em situações em que a tendência hidrológica é baixa — como em cenários hidrológicamente secos —, pois a transformação tende a reduzir ainda mais a média e a acentuar a cauda direita da distribuição, aumentando a frequência relativa de valores extremos elevados.

Para mitigar esse efeito de alongamento da cauda e evitar a geração de cenários hidrológicos excessivamente otimistas, esta proposta adota o ajuste condicional dos valores, eliminando os extremos não representativos do regime hidrológico observado conforme um critério estatístico definido.

O problema dos cenários extremos foi identificado pelo ONS inicialmente em 2024 e apresentado ao CEPEL em Reunião no dia 09/08/2024.

1.1 Descrição do problema pelo ONS¹

Durante os testes de uma nova configuração das usinas do Alto Tietê foi identificado pelo ONS um comportamento não esperado no GEVAZP. Segue a descrição do problema encontrado:

“Nesse estudo foi identificado que a cascata do Rio Tocantins passou a apresentar alguns cenários muito extremos positivos o que levou a um elevado deplecionamento dos reservatórios no DECOMP.

Como essa questão possivelmente tem a ver com o ruído utilizado, fizemos diversas variações do caso para tentar identificar qual etapa estaria contribuindo para essa questão. Ao se trocar a ordenação das Usinas Hidrelétricas (UHEs), não foi identificado o problema. Fizemos também um caso PAR(p) mantendo a ordenação original das UHEs, que demonstra que não é uma questão relacionado ao uso do PAR(p)-A, pois o problema continuou a aparecer.

¹ O trecho do ONS foi reproduzido mediante autorização, com o objetivo técnico de contextualizar a análise, sem implicar juízo de valor.

Relatório de Projeto – DSE – 2506/2025**Cliente: ONS**

Levantou-se a hipótese de que por estar com uma tendência hidrológica muito seca (35% da MLT em Peixe Angical), o problema poderia estar relacionado ao uso da lognormal 3 parâmetros. Sendo assim, nós fizemos alguns estudos de caso variando a tendência hidrológica (TH) para valores menores e maiores, em casos do tipo pente com 2.000 cenários, retirando assim a agregação de ruídos da avaliação. A tabela abaixo apresenta os resultados encontrados.

Tabela 1 - Impactos no valor máximo de afluência da variação da tendência hidrológica

PMO-NOV	AT-ofic 30%	th baixa 7%	th alta 73%	th super alta 230%
Máximo	25443,33	36117,64	8175,70	7439,53
MLT	991,27	991,27	991,27	991,27
Máximo %MLT	2567%	3644%	825%	751%
TH	144,76	72,00	720,00	2307,00
TH %MLT	30%	7%	73%	233%
vteo	485,48	375,14	1357,82	3764,46
Máximo %vteo	5241%	9628%	602%	198%
Ruído final	36,48	52,24	9,96	5,37

A primeira linha apresenta o máximo gerado para a UHE Peixe Angical. Observa-se que quanto menor a tendência hidrológica, maior é o máximo gerado. Para efeito de comparação, o caso com TH 30% da MLT gera um máximo que representa 5241% do valor teórico. Fazendo uma conta reversa, é possível chegar no ruído final (após a aplicação da matriz de carga e transformação lognormal 3p) de 36.48. Diminuindo a TH, o máximo gerado representa 9628% da média teórica. Para gerar esse valor, o ruído final é 52.24. Ao aumentar a TH o valor do máximo gerados reduz gradativamente.

Sendo assim, acreditamos que a lognormal 3p nesses casos de TH muito baixa, e próxima ao limite inferior, ao ter o “azar” de cair algum ruído normal também baixo, pode estar distorcendo muito a distribuição levando a essas vazões irreais, prejudicando o processo de otimização do DECOMP. Mas gostaríamos que fosse feita uma análise do problema para indicar se é realmente esse o motivo, ou há alguma outra questão envolvida.

Caso esse seja o motivo, uma possível solução que pensamos inicialmente é a utilização de algum tipo de censura do ruído final calculado, baseado nas vazões máximas mensais, de forma a evitar a geração desses cenários extremos desse tipo.”

1.2 Considerações iniciais

A princípio, o CEPEL corrobora o entendimento de que os valores de vazão extremos alcançados nos estudos apresentados pelo ONS não representam o regime hidrológico observado e podem resultar em uma operação problemática no DECOMP. Nas próximas seções, serão apresentadas análises conceituais sobre os aspectos que, durante a investigação do caso, foram identificados como relacionados às variações encontradas.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

O modelo GEVAZP gera cenários de vazão utilizando o modelo Autorregressivo Periódico Anual, PAR(p)-A [2], que é definido como:

$$\left(\frac{Z_t - \mu_m}{\sigma_m}\right) = \sum_{i=1}^{p_m} \phi_i^m \cdot \left(\frac{Z_{t-i} - \mu_{m-i}}{\sigma_{m-i}}\right) + \psi_t^m \cdot \left(\frac{A_{t-1} - \mu_{m-1}^A}{\sigma_{m-1}^A}\right) + a_t \quad (1)$$

Onde:

t : índice de tempo em função do ano i ($i = 1, 2, \dots, N$) e do mês m , totalizando T períodos

m : mês

N : número de anos

μ_m : média das afluições históricas no mês m

σ_m : desvio padrão das afluições históricas no mês m

p_m : ordem do modelo autorregressivo no mês m

ϕ_{p_m} : operador autorregressivo de ordem p_m

a_t : ruído independente

A_{t-1} representa a média das últimas 12 observações do processo estocástico Z_t com referência a $t-1$, como mostra a Eq. (2).

$$A_{t-1} = \sum_{\tau=1}^{12} \frac{Z_{t-\tau}}{12} \quad (2)$$

O modelo é composto por uma parte dependente, que depende das afluições passadas, e uma parte independente, representada pelos ruídos.

A criação desses ruídos envolve algumas etapas:

1. Criação de ruído normal, w_t com média zero e desvio padrão 1, não correlacionados;
2. De forma a incorporar a complementariedade hidrológica entre as regiões que compõem o SIN realiza-se a correlação espacial dos ruídos por meio da Eq. (3), onde b_t é o vetor com os ruídos correlacionados espacialmente e D é a matriz quadrada, de dimensão igual ao número de usinas hidrelétricas ou Reservatórios Equivalentes de Energia (REEs), que correlaciona espacialmente os ruídos, chamada de matriz de carga. A matriz de carga D , é uma transformação obtida a partir da matriz de correlação espacial U . Na matriz U o elemento u_{ij} é a covariância espacial lag zero entre os ruídos das usinas i e j ;

$$b_t = D w_t \quad (3)$$

3. A partir de b_t estima-se a distribuição lognormal 3 parâmetros obtendo-se o ruído multivariado dado por a_t .

A utilização de uma transformação lognormal 3 parâmetros surge como forma de mitigar as vazões incrementais negativas que podem surgir da configuração de usinas em cascata.

De forma a obter valores positivos de Z_t é necessário que:

$$Z_t = \mu_m + \sigma_m \sum_{i=1}^{p_m} \phi_i^m \cdot \left(\frac{Z_{t-i} - \mu_{m-i}}{\sigma_{m-i}} \right) + \sigma_m \psi_t^m \cdot \left(\frac{A_{t-1} - \mu_{m-1}^A}{\sigma_{m-1}^A} \right) + \sigma_m a_t > M_t \quad (4)$$

em que M_t é um limite inferior da distribuição, que pode ser igual a zero ou estimado com base na distribuição.

Assim,

$$a_t > \frac{M_t}{\sigma_m} - \frac{\mu_m}{\sigma_m} - \sum_{i=1}^{p_m} \phi_i^m \cdot \left(\frac{Z_{t-i} - \mu_{m-i}}{\sigma_{m-i}} \right) - \psi_t^m \cdot \left(\frac{A_{t-1} - \mu_{m-1}^A}{\sigma_{m-1}^A} \right) \quad (5)$$

Assume-se que a_t tem uma distribuição lognormal três parâmetros tal que pode-se definir um processo aleatório ξ_t com distribuição com média μ_{ξ_m} e desvio padrão σ_{ξ_m} que está relacionado ao processo estocástico a_t pela Eq. (6), de acordo com o definido em [3] e [1].

$$\xi_t = \log(a_t + \Delta_t) \quad (6)$$

onde Δ_t é denominado deslocamento e é calculado de forma a preservar a condição da Eq. (5), isto é:

$$a_t > \frac{M_t}{\sigma_m} - \frac{\mu_m}{\sigma_m} - \sum_{i=1}^{p_m} \phi_i^m \cdot \left(\frac{Z_{t-i} - \mu_{m-i}}{\sigma_{m-i}} \right) - \psi_t^m \cdot \left(\frac{A_{t-1} - \mu_{m-1}^A}{\sigma_{m-1}^A} \right) = \Delta_t \quad (7)$$

e ξ_t pode ser escrito como:

$$\xi_t = \mu_{\xi_t} + b_t \sigma_{\xi_t} \quad (8)$$

Definindo-se Δ_t pela Eq.(7), pode-se estimar os demais parâmetros de θ , μ_{ξ_t} e σ_{ξ_t} de tal forma a preservar os momentos dos ruídos históricos, μ_{a_t} e σ_{a_t} , por meio das seguintes relações:

$$\theta = 1 + \frac{\sigma_{a_t}^2}{(\mu_{a_t} - \Delta_t)^2} \quad (9)$$

$$\mu_{\xi_t} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\sigma_{a_t}^2}{\theta^2 - \theta} \right) \quad (10)$$

$$\sigma_{\xi_t}^2 = \ln(\theta) \quad (11)$$

Assim, a_t pode ser estimado como:

$$a_t = e^{\xi_t} + \Delta_t = e^{\mu_{\xi_t} + b_t \sigma_{\xi_t}} + \Delta_t \quad (12)$$

Observe que, por meio da Eq.(7), os ruídos resultantes da transformação em distribuição lognormal três parâmetros se tornam também dependentes das afluições passadas.

3 INVESTIGAÇÃO DO PROBLEMA

Na etapa de investigação do problema, partiu-se do mesmo deck utilizado nos testes do ONS, que é o deck do GEVAZP referente ao PMO de novembro de 2023 considerando a geração em formato pente de 2000 cenários de vazão utilizando a Amostragem Aleatória Simples. Primeiramente, serão analisados os ruídos do caso base, de forma a identificar qual etapa da geração de ruídos está correlacionada com a geração de cenários extremos de vazão e, posteriormente, será analisado o efeito da tendência hidrológica na geração de cenários excessivamente positivos de vazão.

3.1 Análises dos ruídos para o caso base

A investigação iniciou analisando em que etapa da geração de cenários originava-se o problema dos valores extremos de vazão.

Como a parte dependente da Eq. (1) é igual para todos os cenários, a geração de cenários extremos não representativos está associada com os ruídos do processo estocástico.

Conforme descrito na seção anterior, o processo de geração de ruídos estocásticos consiste em três etapas: geração do ruído normal, correlação espacial dos ruídos gerados e transformação num ruído lognormal.

A Figura 3.3 mostra os boxplots com os ruídos normais gerados para as usinas do estudo. Ao todo são consideradas 160 usinas nesse estudo. Algumas usinas possuem o boxplot zerado, pois são postos nulos, que possuem vazão incremental sempre zerada.

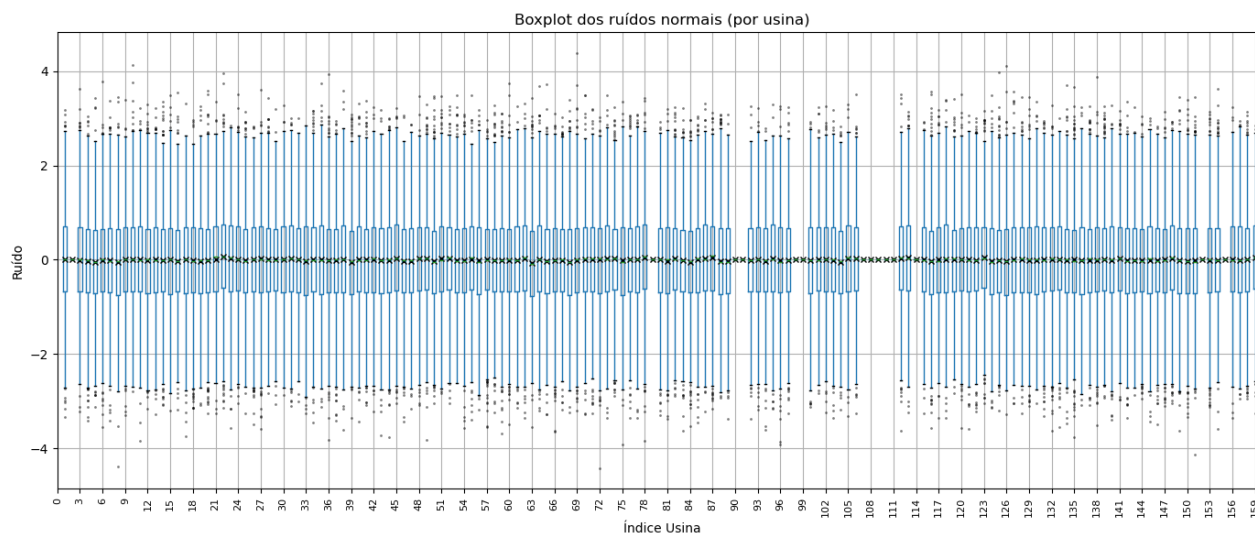


Figura 3.1- Boxplots com os ruídos normais por usina. As medianas são representadas em verde e as médias são representadas pelo "x" preto.

A validação da normalidade dos ruídos foi realizada mediante a aplicação dos testes de Shapiro-Wilk e Anderson-Darling, os quais identificaram que menos de 10% dos postos apresentaram desvios estatisticamente significativos da distribuição normal. Para esses casos, aplicou-se o critério prático de normalidade aproximada, que estabelece como aceitáveis valores de assimetria inferiores a 2 e curtose abaixo de 7. Todas as usinas atenderam a esses requisitos, comprovando que os ruídos possuem distribuição adequada para a modelagem proposta.

Os ruídos normais com correlação espacial, ilustrados na Figura 3.2 possuem uma forma bastante parecida com a dos ruídos normais da Figura 3.3. Ambas as figuras mostram ruídos com média próxima de zero e quase a totalidade dos valores distribuídos dentro do intervalo de três desvios padrão em torno da média (ou seja, entre -3 e 3).

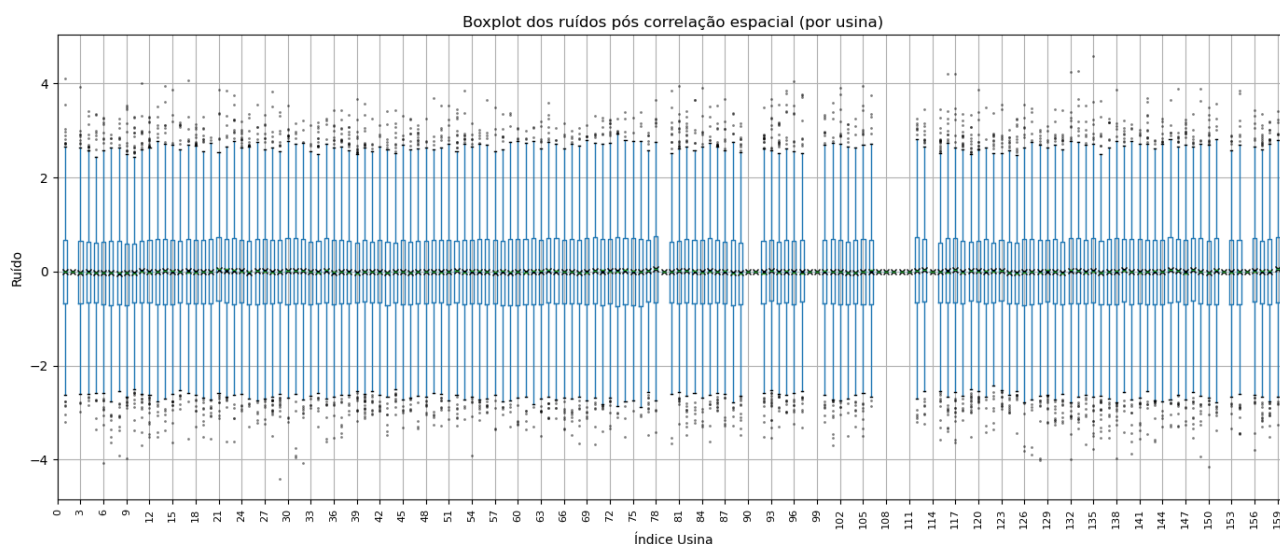


Figura 3.2- Boxplots com os ruídos normais correlacionados espacialmente. As medianas são representadas em verde e as médias são representadas pelo "x" preto.

A Figura 3.3 compara os valores máximos de ruídos independentes (ruído normal) com aqueles obtidos após a correlação espacial (ruído normal correlacionado espacialmente). No gráfico, a linha azul (ruído normal) geralmente fica acima da laranja (ruído normal correlacionado), indicando que a correlação espacial tende a reduzir os máximos. Ao calcular a diferença relativa entre os máximos dos ruídos normais e correlacionados espacialmente, observa-se que a mediana dessa diferença é de -14,13%, confirmando essa tendência de redução. No entanto, a presença de um desvio-padrão elevado (22,11%) e um quantil Q90 positivo (17,81%) indica que, em alguns casos extremos, os valores máximos podem aumentar. Assim, a introdução da correlação espacial nos ruídos não altera drasticamente os extremos, mas tende a reduzir a maioria dos máximos, com alguns casos isolados de aumento.

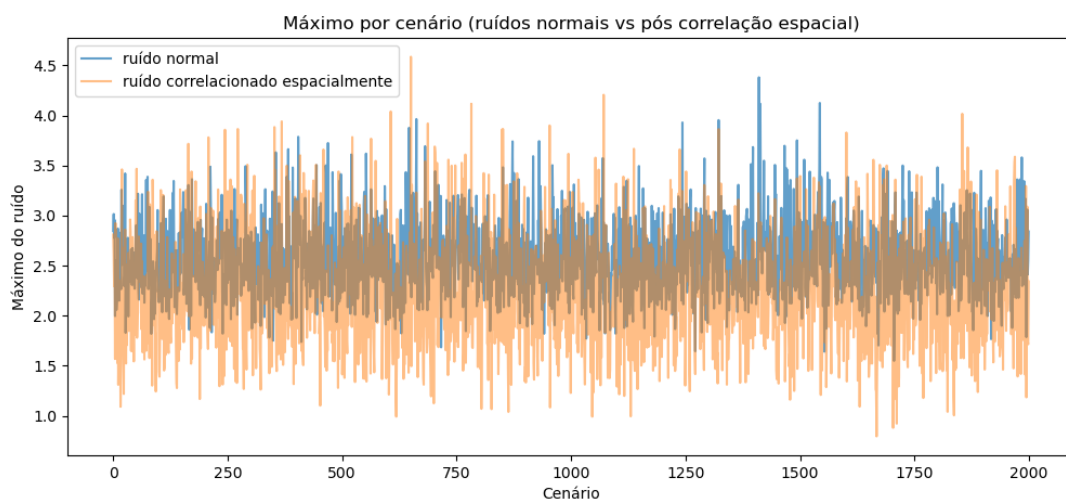


Figura 3.3 - Comparação dos máximos valores de ruído normal e ruído normal correlacionado espacialmente para os 2000 cenários gerados.

Assim, até o momento não foi percebido nenhum problema sistemático com os ruídos que leve à geração de cenários extremos de vazão.

Agora, a Figura 3.4 mostra o boxplot dos ruídos após passar pela transformação lognormal. Nota-se, principalmente, a presença de outliers acentuados.

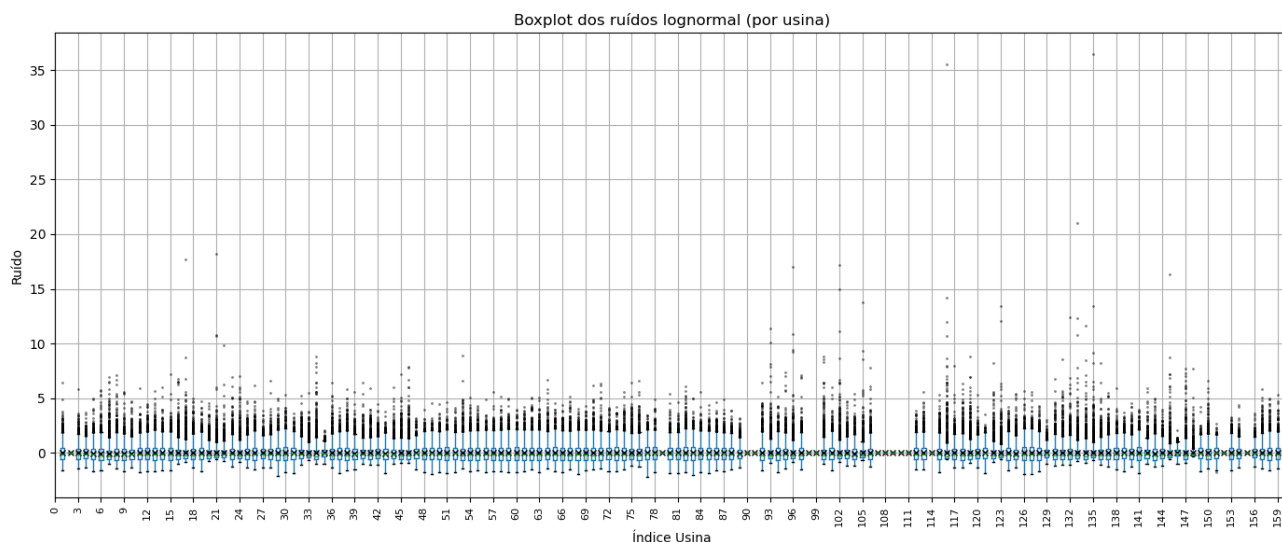


Figura 3.4- Boxplot com os ruídos após transformação lognormal. As medianas são representadas em verde e as médias são representadas pelo x preto.

Ao aproximar o gráfico da Figura 3.4 no eixo das ordenadas, representado na Figura 3.5, e comparar com os ruídos correlacionados espacialmente da Figura 3.2, é possível observar que, com a transformação lognormal, os outliers negativos são eliminados da distribuição e a excursão dos cenários negativos também diminui. No entanto, ao contrário da distribuição lognormal teórica, é necessário observar que, pela Eq. (12), os valores dos ruídos após transformação lognormal podem continuar a ser negativos devido ao deslocamento Δ_L .

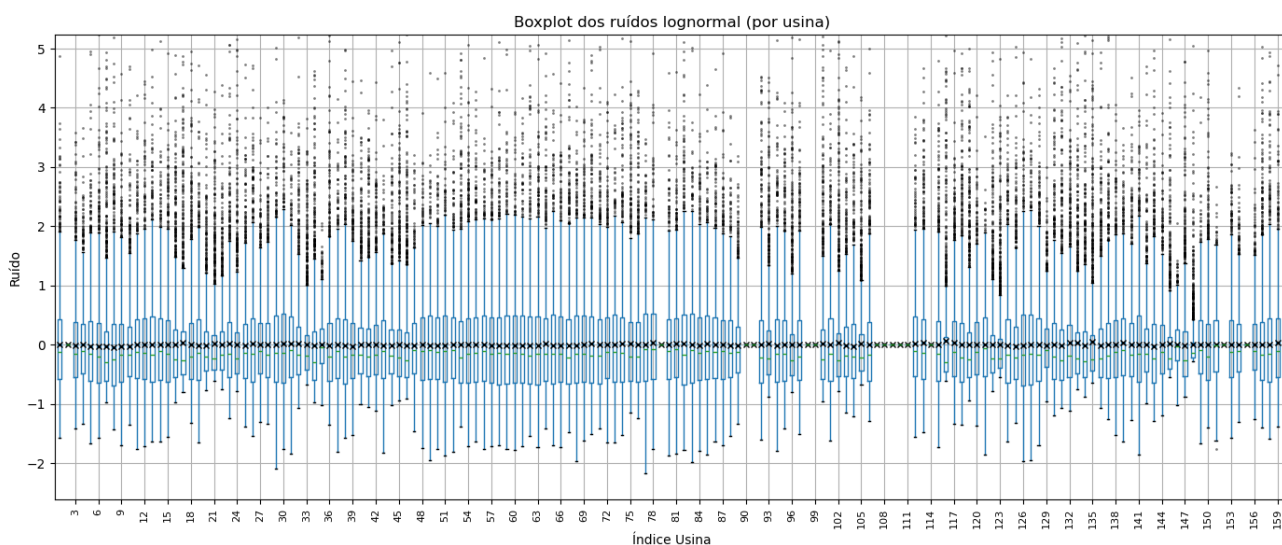


Figura 3.5- Boxplots com os ruídos após transformação lognormal, considerando o intervalo de -2 a 5 no eixo das ordenadas. As medianas são representadas em verde e as médias são representadas pelo “x” preto.

De forma gráfica, a Figura 3.6 compara os máximos valores dos ruídos normais correlacionados espacialmente antes e depois da transformação lognormal, para cada cenário e considerando todas as usinas do estudo. Observa-se que os extremos dos cenários sofreram um aumento considerável. A transformação lognormal aplicada aos ruídos já correlacionados espacialmente resultou em amplificação sistemática dos valores máximos, com aumento médio relativo de 21,4%. Este comportamento é esperado da transformação lognormal, que tende a alongar a cauda superior da distribuição.

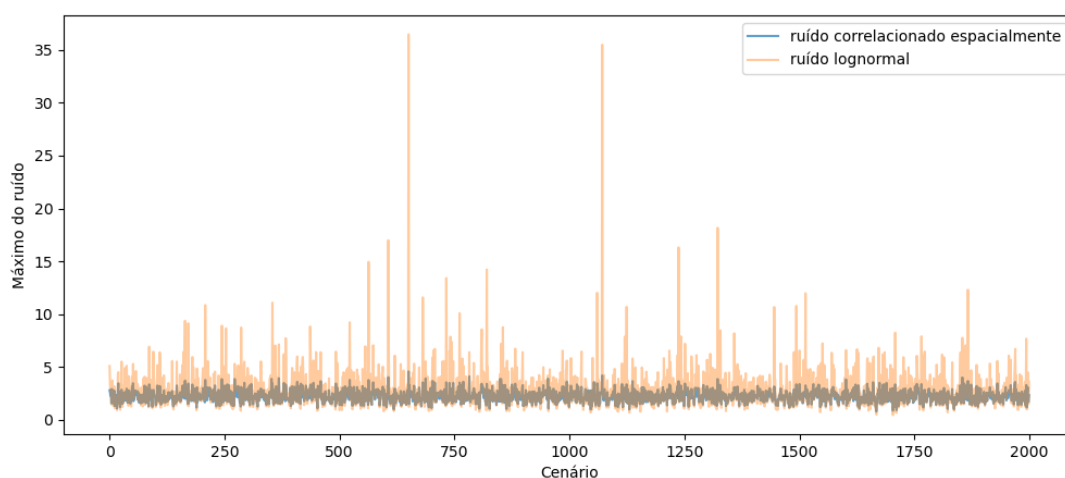


Figura 3.6 - Comparação dos máximos valores de ruído normal correlacionados espacialmente antes e depois da transformação lognormal, para os 2000 cenários gerados. Na legenda “ruído correlacionado espacialmente” é o ruído antes de passar pela transformação lognormal.

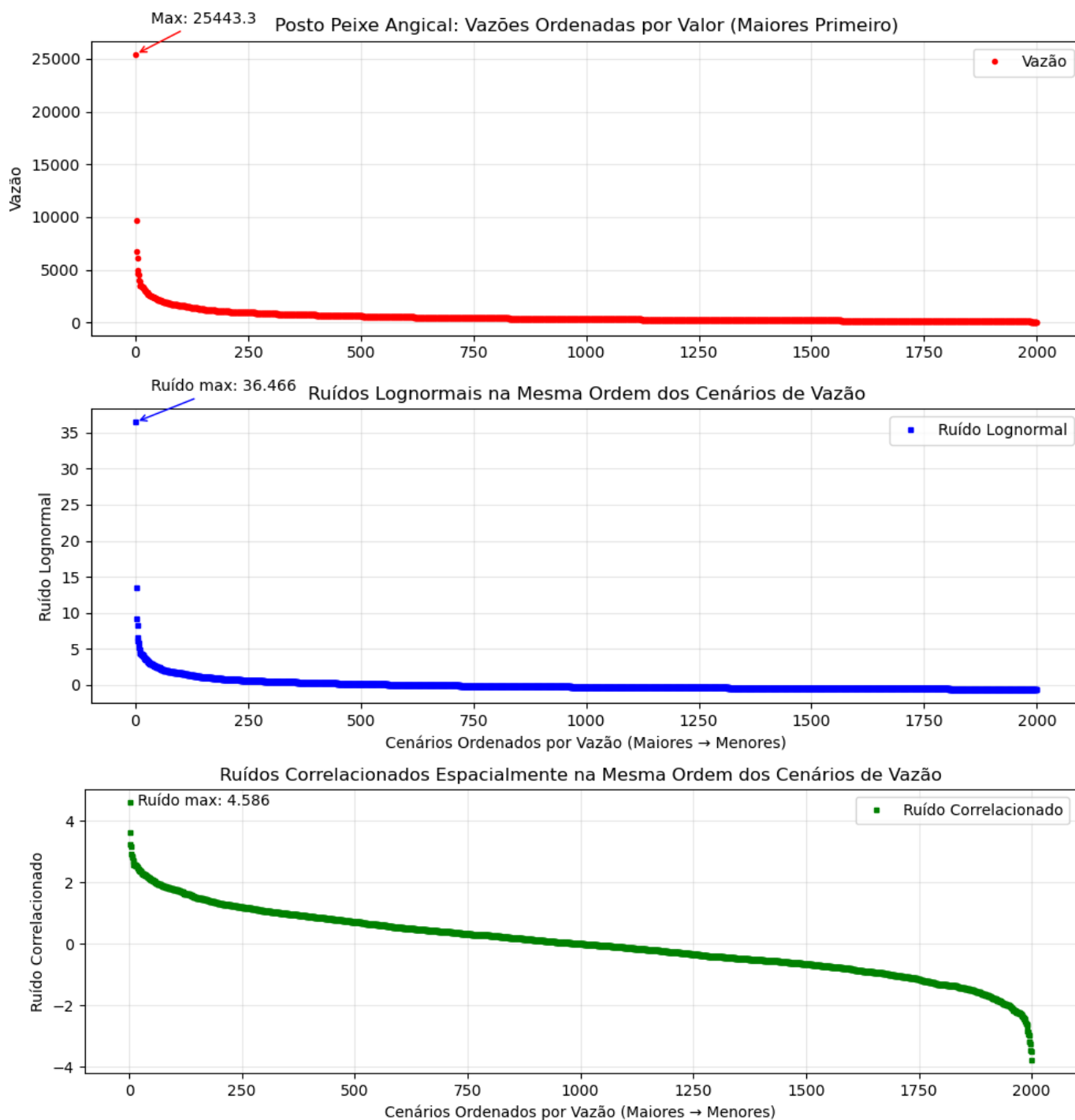
Para explorar essa relação vamos focar na usina de Peixe Angical. A Tabela 2 mostra os dez cenários com maior valor de ruído lognormal e seus valores de vazão correspondentes. A tabela ainda mostra os valores de vazão em porcentagem da Média de Longo Termo (MLT), mostrando como esses valores desviam consideravelmente dos valores de vazão históricos. A MLT da usina de Peixe Angelical para o mês de dezembro é de 991,27m³/s. Aqui vale destacar que o máximo valor de vazão histórica da usina de Peixe Angical para o mês de dezembro é de 4328 m³/s, equivalente a 437% da MLT.

Tabela 2 - Dez maiores valores de ruídos lognormais, valores de vazão correspondentes e porcentagem da MLT representada pelos valores de vazão.

CENÁRIO	RUÍDO LOGNORMAL	VAZÃO INCREMENTAL	% MLT
651	36,47	25443,33	2567
1072	13,43	9681,79	977
172	9,14	6744,92	680
1709	8,25	6135,85	619
1218	6,55	4973,3	502
1867	6,07	4643,08	468
110	5,84	4490,64	453
1661	5,14	4011,79	405
1473	4,92	3861,37	390

Para uma visão mais ampla, a Figura 3.7 mostra os valores de vazão ordenados em ordem decrescente com os valores de ruído após transformação lognormal, ruídos normais correlacionados espacialmente e

ruídos normais independentes seguindo a ordem dos cenários de vazão. Na figura é possível ver os cenários mais extremos de vazão, ruído lognormal e ruído correlacionado espacialmente se alinhando. No entanto, nota-se que o mesmo não acontece com os ruídos normais.



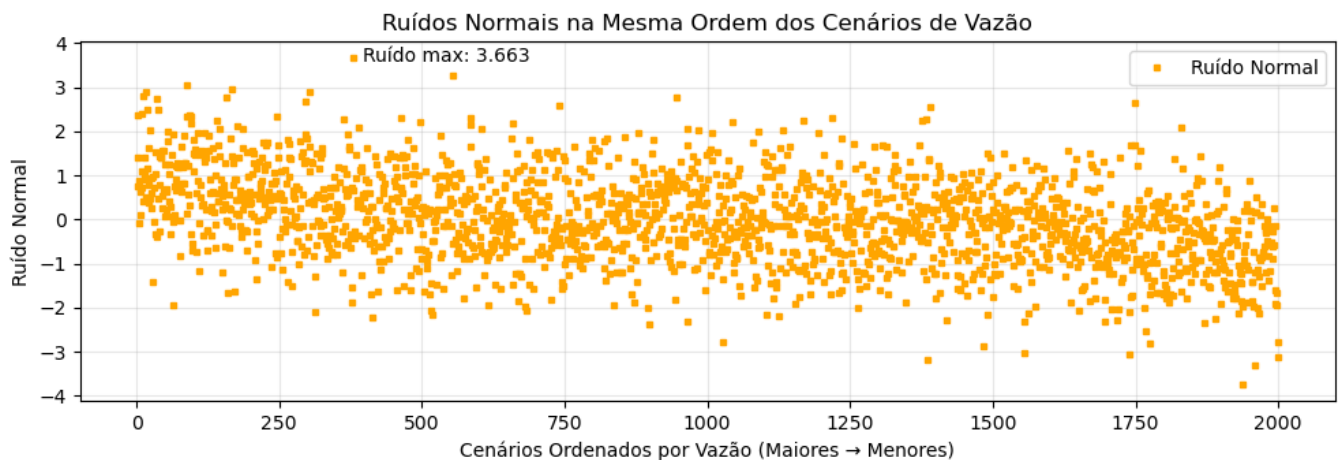


Figura 3.7 – Valores ordenados de vazão para a usina de Peixe Angical e respectivos valores de ruídos lognormal, ruídos correlacionados espacialmente e ruídos normais. O número do cenário não corresponde ao número real, aqui o valor de cenário corresponde a ordem dos cenários por valor decrescente de vazão.

Com os resultados apresentados nesta seção, observa-se que os maiores cenários obtidos a partir de ruídos normais espacialmente correlacionados — e, posteriormente, de ruídos lognormais — resultam nas maiores vazões simuladas. No caso dos ruídos normais, não se verifica uma relação direta entre os valores máximos dos ruídos e os valores máximos de vazão. Ressalta-se, contudo, que em uma distribuição normal com média zero e desvio padrão igual a 1, espera-se que cerca de 99,7% dos valores estejam dentro do intervalo de três desvios padrão em torno da média (ou seja, entre -3 e 3). Ainda assim, podem ocorrer valores acima desse limite, especialmente quando se utilizam amostras extensas, como neste caso, em que foram analisados dois mil ruídos.

A seguir, explora-se a segunda variável que tem relação com a variação da amplitude dos cenários de vazão, que é a TH. Assim, busca-se entender o efeito da geração de ruídos combinado com a TH.

3.2 Análise da Tendência Hidrológica

Para avaliar os efeitos da TH na geração dos ruídos, os testes foram conduzidos seguindo o mesmo procedimento adotado previamente pelo ONS. Assim, foi alterada a TH incremental de Peixe Angical para 72 m²/s no mês de novembro de 2023. Isso é feito alterando a TH escrita em termos de vazão natural no arquivo vazpast.dat. Considerando a TH de vazão natural para São Salvador no mês de novembro sendo 392,87 m²/s e dado que Peixe Angical está à jusante de São Salvador, a TH natural de Peixe Angical será então de 464,87 m²/s.

Gerando os cenários de vazão para essas condições, percebe-se que, ao modificar a TH, não houve alteração nos ruídos normais gerados, assim como não houve alteração nos ruídos normais com correlação espacial. No entanto, ocorre alteração no ruído lognormal. A relação entre o ruído lognormal e a TH é dada pelas Eqs. (7) a (12), já que tanto ξ_t quanto Δ_t são dependentes da TH.

A Figura 3.8 mostra a diferença entre os ruídos lognormais e as vazões. Nota-se que a cauda da distribuição se estende mais ao utilizar uma TH mais baixa.

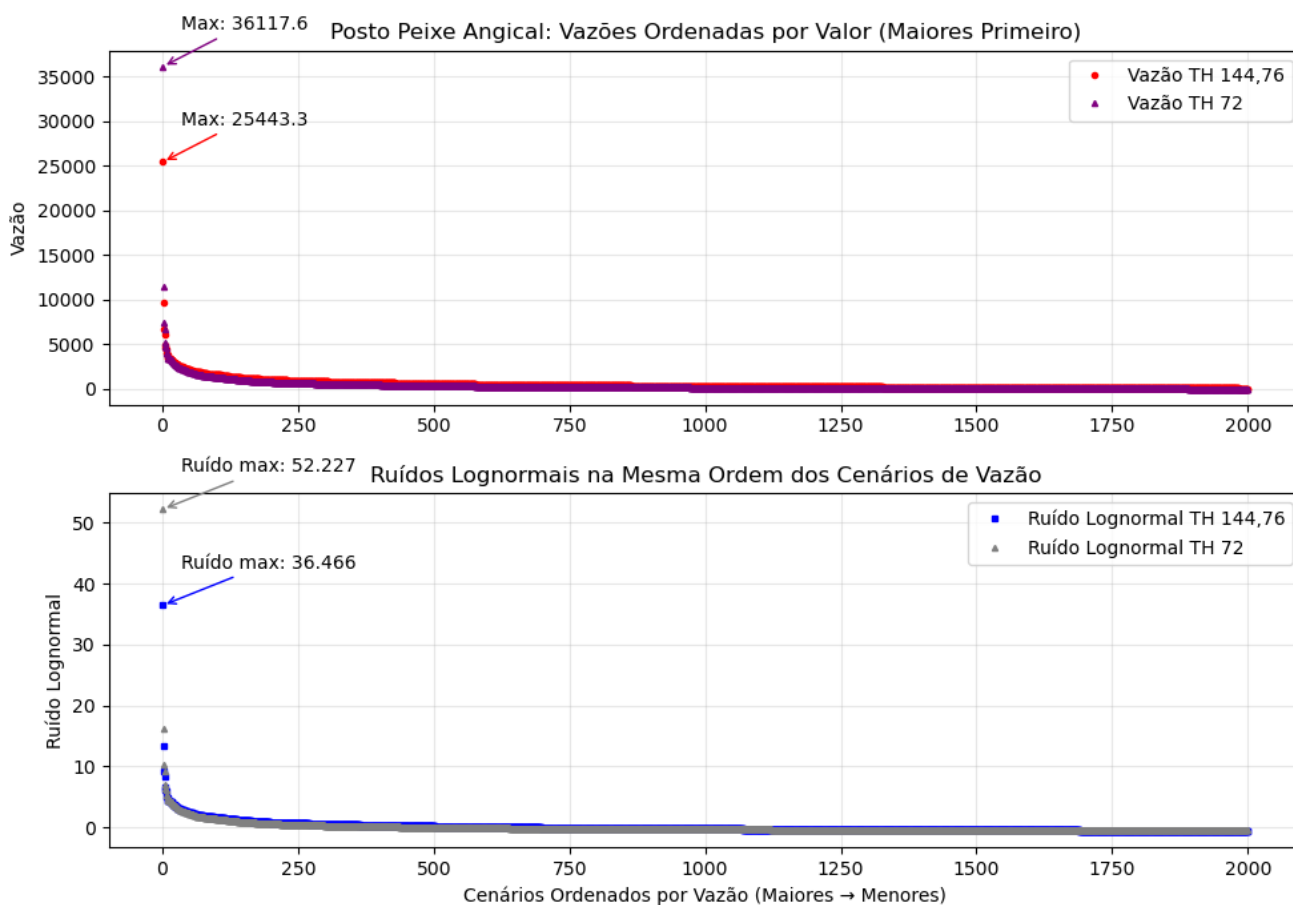


Figura 3.8 – Valores ordenados de vazão para a usina de Peixe Angical e respectivos valores de ruídos lognormal, considerando-se TH de 72m³/s e 144,76m³/s. O número do cenário não corresponde ao número real, aqui o valor de cenário corresponde à ordem dos cenários por valor decrescente de vazão.

Para analisar o que acontece com as distribuições de ruídos lognormais e as vazões ao alterar a TH, a Figura 3.9 mostra os boxplots dos ruídos lognormais e vazões considerando as TH mostradas na Tabela 1. A análise revela que, ao se adotar uma TH mais baixa, a distribuição dos ruídos lognormais torna-se mais achatada, com seus quartis concentrando-se próximo a zero, enquanto a cauda superior (valores extremos positivos) se alonga significativamente. O mesmo padrão é observado para as vazões. Inversamente, quando se utiliza uma TH mais elevada, a distribuição do ruído passa a exibir uma maior variabilidade em torno de zero, com uma dispersão mais simétrica e uma marcante redução na ocorrência de valores extremos. Para as vazões, uma TH alta resulta em um deslocamento da distribuição para patamares médios superiores, concomitantemente com a supressão de valores extremamente elevados.

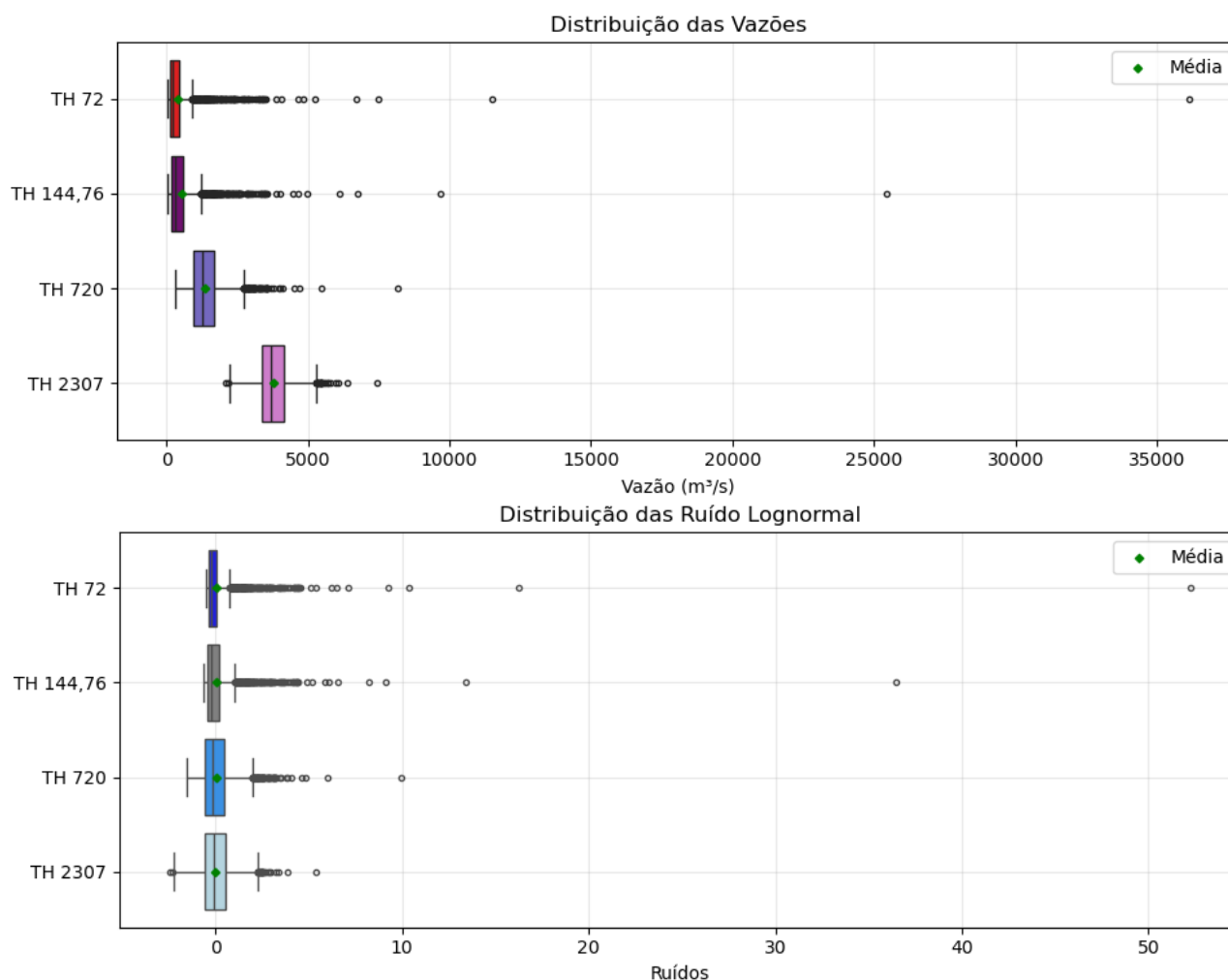


Figura 3.9 – Boxplots com os valores dos ruídos lognormais e vazões referente à usina de Peixe Angical para as THs mostradas no eixo das ordenadas.

Dadas as características do problema propõem-se a implementação de um ajuste condicional nos valores de vazão gerados.

4 SOLUÇÃO PROPOSTA

De forma a impedir que as vazões assumam valores extremos positivos não representativos do regime hidrológico observado, será aplicado um ajuste condicional no valor de vazão. Esse processo envolverá as seguintes etapas:

1. Cálculo do valor máximo do histórico ($Z_{max_{th}}$).
2. Estabelecimento de um limite acima do qual será aplicado o ajuste condicional no valor da vazão gerada, definido como:

$$Limite_{th} = Z_{max_{th}} + FD \cdot \sigma_{th} \quad (13)$$

onde: $Z_{max_{th}}$ é o valor máximo histórico (considerando um valor máximo para cada mês do ano) para a usina h , σ_{th} é o desvio padrão histórico, FD é um fator definido como $\in [0, 10]$ que multiplica o desvio padrão para estabelecimento do limite a partir do qual será aplicado o ajuste condicional no valor de vazão gerado. Quando FD é igual a zero, o limite é o máximo histórico, ou seja, ao se usar FD igual a zero está se utilizando o limite mais restritivo no valor de vazão.

3. O ajuste condicional será aplicado quando o valor gerado da vazão Z_{th} for maior do que o limite estabelecido. O ajuste condicional no valor extremo detectado será feito conforme:

Se $Z_{th} > Limite_{th}$ então $Z_{th} = Z_{max_{th}} + \left(\frac{Z_{th} - Z_{max_{th}}}{Z_{max_{th}}} \right) \cdot FD \cdot \sigma_{th}$, assumindo um valor entre $[Z_{max_{th}}, Limite_{th}]$.

4. O valor default do fator de multiplicação do desvio padrão será definido em alinhamento com o ONS.

O ajuste condicional do valor da vazão é ativado por meio da leitura de uma flag no arquivo dadger.RVx ou no gevazp.dat, dependendo do estudo a ser realizado. O fator também é especificado nesses arquivos de entrada.

Por fim, a próxima seção se concentra em avaliar a quantidade de valores ajustados no caso avaliado de acordo com o limite de vazão imposto.

5 FREQUÊNCIA DE AJUSTE

Ao adotar a estratégia proposta, é preciso quantificar a frequência de aplicação do ajuste condicional.

Para ilustrar esse questionamento, considerou-se uma variação de FD entre os valores 0 a 5, 7 e 10, ou seja, o valor máximo de vazão estaria limitado ao valor máximo histórico mais o FD multiplicado pelo desvio padrão. Os resultados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Estatísticas de frequência de valores ajustados. Usina Crítica se refere à usina que sofreu a maior quantidade de ajustes.

CRITÉRIO DE ANÁLISE	0	1	2	3	4	5	7	10
Valores Ajustados	3985	1008	231	96	55	36	18	9
Valores Ajustados (%)	1,24	0,31	0,07	0,03	0,02	0,01	0,006	0,003
Valores Ajustados – Usina Crítica	1514	379	28	12	6	4	2	2
Valores Ajustados – Usina Crítica (%)	75,7	18,95	1,4	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1

Aqui destaca-se o caso da usina de Santo Antônio que teve 75% dos valores de vazão ajustados ao ser usado FD igual a 0 e 18,95% ao ser usado FD igual a 1. A elevada quantidade de valores ajustados se deve a uma TH bastante alta para o caso testado, de 3 vezes a MLT.

Figura 5.1 ilustra as diferenças causadas na distribuição de valores gerados em comparação com os valores históricos.

Com esse resultado, destaca-se a importância de não serem usados valores muito restritivos de limite, já que isso pode eliminar valores representativos dependendo das circunstâncias estabelecidas.

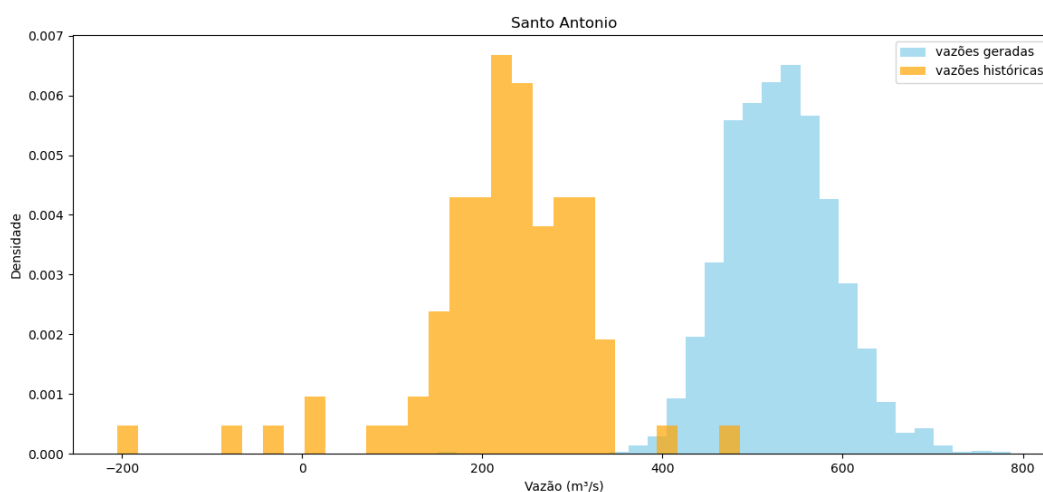


Figura 5.1- Histograma dos valores de vazão históricos e cenários de vazão gerados para o mês de dezembro de 2025.

6 CONCLUSÕES

Neste relatório foram estudadas as causas dos valores extremos de afluência gerados pelo GEVAZP para as usinas sujeitas a uma tendência hidrológica (TH) muito baixa. Primeiramente, foram analisados os ruídos normais independentes, esses mesmos ruídos após correlação espacial, após transformação lognormal e por fim, os valores de vazão incrementais gerados.

Pela análise feita, destaque-se que os ruídos normais independentes não contribuem significativamente com a geração de cenários extremos, sendo baixa a correlação entre os valores dos cenários de vazão e ruídos normais independentes. Além disso, pela análise da variação da TH e pelo modelo matemático de geração de cenários de vazões, observa-se que não existe variação do valor dos ruídos normais com correlação espacial por conta da variação da TH, sendo que a magnitude dos ruídos normais independentes e correlacionados espacialmente são parecidas e respeitam a distribuição normal.

Por fim, nota-se que ao alterar a TH ocorre uma alteração significativa nos valores dos ruídos lognormais. Pelo equacionamento da transformação lognormal, sabe-se que a transformação sofre influência da TH, sendo que, ao se aplicar uma TH mais baixa, ocorre um achatamento da distribuição e alongamento da cauda da distribuição de ruídos, podendo resultar em cenários extremos de vazão não representativos.

Portanto, por meio desse relatório é proposta uma estratégia de ajuste condicional no valor de vazão de forma a eliminar os valores extremos de vazão não representativos gerados quando o modelo observa uma TH muito baixa.

7 REFERÊNCIAS

- [1] M. Veiga Ferraz Pereira, G. Couto de Oliveira, J. Kelman e C. C. G. Costa, “Stochastic Streamflow Model for Hydroelectric Systems,” *Water Resources Research*, pp. 379-390, 03 1997.
- [2] F. Treistman, M. E. P. Maceira, J. M. Damázio e C. B. Cruz, “Periodic Time Series Model with Annual Component Applied to Operation Planning of Hydrothermal Systems,” em *2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, Liege, Belgium, 2020.
- [3] R. J. Chaberneau, “Comparison of the Two- and Three-Parameter Log Normal Distributions Used in Streamflow Synthesis,” *Water Resources Research*, pp. 149-150, 02 1978.