

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

HENRIQUE DEGRAF

ESTACIONARIEDADE ASSOCIADA À CURVA DE REGULARIZAÇÃO DE  
RESERVATÓRIOS: UMA CONTRIBUIÇÃO HÍDRICA E ENERGÉTICA

CURITIBA

2021

HENRIQUE DEGRAF

ESTACIONARIEDADE ASSOCIADA À CURVA DE REGULARIZAÇÃO DE  
RESERVATÓRIOS: UMA CONTRIBUIÇÃO HÍDRICA E ENERGÉTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Henrique Marco Detzel

CURITIBA

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

---

D321e            Degraf, Henrique

Estacionariedade associada à curva de regularização de reservatórios:  
uma contribuição hídrica e energética [recurso eletrônico]/ Henrique  
Degraf - Curitiba, 2021.

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, do Setor de Tecnologia  
da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a  
obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos.  
Orientador: Prof. Dr. Daniel Henrique Marco Detzel

1. Reservatórios. 2. Hidrologia. I. Detzel, Daniel Henrique Marco. II.  
Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 589.4

---

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **HENRIQUE DEGRAF** intitulada: **Estacionariedade Associada à Curva de Regularização de Reservatórios: uma contribuição hídrica e energética**, sob orientação do Prof. Dr. DANIEL HENRIQUE MARCO DETZEL, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Fevereiro de 2021.

Assinatura Eletrônica  
08/03/2021 14:13:31.0  
DANIEL HENRIQUE MARCO DETZEL  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
08/03/2021 14:23:47.0  
CLAUDIO MARCHAND KRÜGER  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE POSITIVO)

Assinatura Eletrônica  
16/03/2021 15:57:36.0  
ANGELA REGINA LIVINO DE CARVALHO  
Avaliador Externo (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA)

Assinatura Eletrônica  
08/03/2021 15:01:12.0  
MARCELO RODRIGUES BESSA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

*" Continue a nadar"*

## **AGRADECIMENTOS**

Meus agradecimentos vão especialmente a Deus, por todos os dias conseguir me levantar, realizar todas as minhas atividades e por ter pessoas incríveis ao meu lado. Falando nelas, gostaria de dedicar esta dissertação a Cleide, ao Guto e ao Silas, por serem as melhores pessoas, que, com orgulho posso chamar de Mãe, Irmão e Pai, respectivamente.

Um agradecimento especial ao meu parceiro de mestrado João Marcos Carvalho, por todas as discussões úteis - e até as nem tão úteis assim - que tivemos desde a graduação e por ser um grande amigo.

Agradecimentos também ao meu orientador e amigo Daniel Henrique Marco Detzel e aos Professores Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes e Marcelo Rodrigues Bessa. Um abraço especial ao Luiz Renato pela imensa ajuda na elaboração dos mapas.

Ao Lactec e COPEL, pelo apoio financeiro concedido por meio do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL tendo como proponente a COPEL GeT, através do Projeto PD 6491-03/07/2013, "Projeto LYNX - Otimização em larga escala aplicada ao despacho hidrotérmico brasileiro: modelos hierárquicos de operação e planejamento em médio e curto prazos com integração de energia potência".

*"Mas a filosofia da sobrevivência do mais forte,  
Com certeza está errada...com certeza."  
(Nobuhiro Watsuki, Rouroni Kenshin XVII)*

## RESUMO

A curva de regularização é uma ferramenta importante para verificar qual a vazão garantida que um reservatório pode atender com um determinado volume útil. Entretanto, em muitos casos, as séries de vazões afluentes utilizadas para dimensionar os reservatórios em operação não apresentam as mesmas características estatísticas, como média e desvio padrão por exemplo, ao longo do tempo, o que configura um aparente comportamento não estacionário destas séries de vazões, que pode decorrer tanto da influência da ação antrópica no meio quanto de mudanças climática. Este comportamento pode implicar na diminuição da capacidade de regularização dos reservatórios, que, por conseguinte, contribui para a redução da segurança hídrica e energética. Nesta dissertação, são avaliadas curvas de regularização de diversos reservatórios brasileiros, analisando as vazões e as demandas para as quais os reservatórios foram dimensionados. As curvas são refeitas utilizando os dados mais recentes das séries e determina-se o quanto da atual vazão média de longo termo os reservatórios existentes são capazes de regularizar, bem como qual seria seu volume para atender à demanda original de projeto. A partir dos reservatórios analisados, observa-se que estes estão perdendo capacidade de regularização relativa devido a não estacionariedade, independentemente se suas vazões apresentam tendência de aumento ou de diminuição. Realizou-se, além disso, uma análise estocástica por meio do método de Monte Carlo associado ao máximo deficit acumulado para associar o volume dos reservatórios a uma determinada probabilidade de falha; dessa forma, é possível comparar o risco dos reservatórios quando foram dimensionados com seu risco atual, após a atualização das séries hidrológicas. Verifica-se que houve um aumento no risco de não atendimento à demanda dos reservatórios quando comparados o período em que foram dimensionados e o período atual, caso estes regularizem a vazão para a qual foram dimensionados, além de ter sido observada uma mudança no período crítico da série de vazões do rio São Francisco.

**Palavras-chaves:** Reservatórios. Curva de regularização. Índice de regularização. Não estacionariedade.

## ABSTRACT

The storage-yield curve is an important tool to verify which outflow the reservoir can supply with a certain volume. However, in many cases, the streamflow series used to design the reservoirs in the past do not necessarily have the same statistical parameters as the current streamflow series because of anthropic actions in the watersheds. Those differences can imply reservoirs losing storage capacity, which can also contribute to the reduction of energy and hydric security. This study evaluates the storage-yield curves of different Brazilian reservoirs, analyzing the streamflow and the demands for which the reservoirs were originally planned. The curves are remade using updated data; it is determined how much of the long-term streamflow the existent reservoirs can regulate and also what volume is necessary to supply the current demand. Based on the selected reservoirs, it can be observed that those reservoirs may be losing their regulation capacity due to nonstationarity, regardless of whether the streamflows have a decreasing or increasing trend. Lastly, a stochastic analysis was made using the Monte Carlo method associated with the maximum accumulated deficit to relate the calculated reservoir's volume to a certain risk. With that, it is possible to compare the reservoir's planned risk with their current risk, after the update of the hydrological series data. The results show that there was an increase in the reservoir's operational risk when comparing both periods, the current one and the one in which those reservoirs were designed, if they regulate their original streamflow demand. Besides, this study indicates that the São Francisco river streamflow series critical period has changed over the years.

**Key-words:** Storage-yield curve. Nonstationary. Reservoir. Reservoir Yield .

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – PARTICIPAÇÃO DA ENERGIA RENOVÁVEL NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA, MUNDIAL E DA OCDE . . . . .	22
FIGURA 2 – PARTICIPAÇÃO DAS FONTES NA GERAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA . . . . .	22
FIGURA 3 – SIN - HORIZONTE DE 2024 . . . . .	23
FIGURA 4 – DISPOSIÇÃO DAS UHE'S E USINAS À FIO DE ÁGUA NO BRASIL	24
FIGURA 5 – CURVA DE MASSA X ASP . . . . .	28
FIGURA 6 – MÉTODO DE MONTE CARLO: ESQUEMA . . . . .	30
FIGURA 7 – CARGA VERSUS GRAU DE REGULARIZAÇÃO . . . . .	31
FIGURA 8 – ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE PORTO VELHO - VAZÕES MÉDIAS ANUAIS . . . . .	38
FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DA ESCOLHA DO MODELO . . . . .	45
FIGURA 10 – MODELO LINEAR ESTACIONÁRIO . . . . .	45
FIGURA 11 – MODELO AR(1) . . . . .	48
FIGURA 12 – MODELO MA(1) . . . . .	49
FIGURA 13 – MODELO ARMA(1,1) . . . . .	50
FIGURA 14 – MAPA SUBSISTEMAS BRASILEIROS . . . . .	52
FIGURA 15 – LOCALIZAÇÃO USINAS HIDRELÉTRICAS . . . . .	54
FIGURA 16 – ESTATÍSTICA DE MANN-KENDALL PARA USINAS HIDRELÉTRICAS BRASILEIRAS . . . . .	64
FIGURA 17 – PONTO DE QUEBRA DO TESTE DE PETTITT PARA USINAS HIDRELÉTRICAS BRASILEIRAS . . . . .	65
FIGURA 18 – CURVA DE REGULARIZAÇÃO ENA - SUBSISTEMA SUL . . . . .	67
FIGURA 19 – CURVA DE REGULARIZAÇÃO ENA - SUBSISTEMA SUDESTE	67
FIGURA 20 – CURVA DE REGULARIZAÇÃO ENA - SUBSISTEMA NORDESTE	68
FIGURA 21 – CURVA DE REGULARIZAÇÃO ENA - SUBSISTEMA NORTE . .	68
FIGURA 22 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO DE FOZ DO AREIA . . . . .	69
FIGURA 23 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO DE ILHA SOLTEIRA . . . . .	70
FIGURA 24 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO DE ITAPARICA . . . . .	70
FIGURA 25 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO DE SOBRADINHO . . . . .	71
FIGURA 26 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO DE TUCURUÍ . . . . .	71
FIGURA 27 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO COM TEMPO DE RECORRÊNCIA - FOZ DO AREIA . . . . .	75

FIGURA 28 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO COM TEMPO DE RECORRÊNCIA - ILHA SOLTEIRA . . . . .	76
FIGURA 29 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO COM TEMPO DE RECORRÊNCIA - ITAPARICA . . . . .	76
FIGURA 30 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO COM TEMPO DE RECORRÊNCIA - SOBRADINHO . . . . .	77
FIGURA 31 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO COM TEMPO DE RECORRÊNCIA - TUCURUÍ . . . . .	78
FIGURA 32 – ENA RIO SÃO FRANCISCO . . . . .	80

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DADOS FICTÍCIOS DE VAZÃO AFLUENTE E DEMANDA . . . . .	27
TABELA 2 – ESTADOS VERSUS TEMPO : PROCESSO ESTOCÁSTICO . . . . .	42
TABELA 3 – USINAS SELECIONADAS . . . . .	53
TABELA 4 – RESULTADOS DOS TESTES ESTATÍSTICOS PARA OS SUBSIS- TEMAS . . . . .	62
TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DOS TESTES DE PETTITT E MANN-KENDALL . . . . .	63
TABELA 6 – RESULTADOS MODELOS ESTOCÁSTICOS - SÉRIES ENA . . . . .	66
TABELA 7 – VALIDAÇÃO DOS DADOS - ENA . . . . .	66
TABELA 8 – REGULARIZAÇÃO E VOLUME DAS USINAS . . . . .	72
TABELA 9 – RESULTADOS MODELOS ESTOCÁSTICOS - SÉRIES ATÉ A DATA DE OPERAÇÃO . . . . .	73
TABELA 10 – RESULTADOS MODELOS ESTOCÁSTICOS - SÉRIES COMPLETAS . . . . .	73
TABELA 11 – VALIDAÇÃO DOS DADOS - SÉRIES ATÉ A DATA DE OPERAÇÃO . . . . .	74
TABELA 12 – VALIDAÇÃO DOS DADOS - SÉRIES COMPLETAS . . . . .	74
TABELA 13 – COMPARAÇÃO RISCOS - OPERAÇÃO CURVA DE REGULARI- ZAÇÃO . . . . .	78
TABELA 14 – COMPARAÇÃO VAZÕES MÉDIAS DE LONGO TERMO - OPERA- ÇÃO E ATUALIZADA . . . . .	79

## LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

**AICC** Critério de Informação de Akaike Corrigido

**ANEEL** Agência Nacional de Energia Elétrica

**AR** Modelo Autoregressivo

**ARIMA** Modelo Autoregressivo Integrado de Médias Móveis

**ASP** Análise Sequencial de Picos

**BFT** Bomba funcionando como Turbina

**BHA** Behaviour Analysis Model

**BIC** Critério de Informação Bayesiano

**ENA** Energia Natural Afluente

**EPE** Empresa de Pesquisa Energética

**FAC** Função de Autocorrelação

**FACP** Função de Autocorrelação Parcial

**FACV** Função de Autocovariância

**FAP** Função Acumulada de Probabilidades

**FDE** Função de Densidade Espectral

**FDP** Função Densidade de Probabilidades

**FMP** Função Massa de Probabilidades

**GEV** Generalized Extreme Value

**GLN** Gás Natural Liquefeito

**MA** modelo de médias móveis

**OCDE** Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

**OIEE** Oferta Interna de Energia Elétrica

**ONS** Operador Nacional do Sistema

**PEN** Plano Energético Nacional

**PIB** Produto Interno Bruto

**RLS** Regressão Linear Simples

**SIG** Sistema de Informação Geográfica

**SIN** Sistema Interligado Nacional

**UHE** Usina Hidrelétrica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>RESERVATÓRIOS</b>	<b>21</b>
2.1	IMPORTÂNCIA	21
2.2	MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO	26
2.2.1	Método de Rippl	26
2.2.2	Método de Monte Carlo	28
2.3	REGULARIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS	30
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>34</b>
3.1	VARIÁVEIS ALEATÓRIAS	34
3.1.1	Normalidade das variáveis aleatórias	35
3.2	ESTACIONARIEDADE	37
3.2.1	Identificação da Estacionariedade	39
3.3	MODELOS ESTOCÁSTICOS APLICADOS EM HIDROLOGIA	40
3.3.1	Modelos de séries temporais e processo estocástico	41
3.3.2	Processo Estocástico Estacionário	44
3.3.3	Modelo Box e Jenkins	44
3.4	RESUMO DA SEÇÃO	51
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>52</b>
4.1	TESTES DE HIPÓTESE	54
4.1.1	Pre-whitening	54
4.1.2	Teste de Mann-Kendall	55
4.1.3	Teste de Pettitt	56
4.2	CORREÇÃO DA NÃO ESTACIONARIEDADE	57
4.3	ANÁLISE DA CURVA DE REGULARIZAÇÃO	57
4.4	CÁLCULO DO DEFICIT ACUMULADO	58
4.5	DETERMINAÇÃO DO PERÍODO CRÍTICO	58
4.6	GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS	60
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>62</b>
5.1	NÃO ESTACIONARIEDADE	62
5.2	CURVA DE REGULARIZAÇÃO: ENERGIA NATURAL AFLUENTE	65
5.3	CURVAS DE REGULARIZAÇÃO: SÉRIES DE VAZÕES ORIGINAIS	69
5.4	CURVAS DE REGULARIZAÇÃO: SÉRIES SINTÉTICAS	72

5.5	MUDANÇA NO PERÍODO CRÍTICO . . . . .	79
6	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>81</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Reservatórios de usinas hidrelétricas com capacidade de regularização são essenciais para a mitigação de efeitos oriundos de mudanças climáticas e para a segurança energética do sistema elétrico. Tanto em períodos de baixa disponibilidade hídrica quanto de alta, a presença de um reservatório com capacidade de regularização auxilia na manutenção das atividades fundamentais para a vida humana e na prevenção contra eventos extremos, como cheias. Contudo, é importante ressaltar que a capacidade de regularização de reservatórios não é fixa, podendo variar de acordo com a oferta hídrica do momento. Considerando que essa oferta pode estar se alterando por conta da não estacionariedade em séries de vazões, a confiabilidade de sistemas hídricos baseados em grandes reservatórios pode estar sendo afetada. Isso, somado à expansão do sistema elétrico brasileiro a partir de usinas a fio de água, pode se tornar um problema de dimensões consideráveis em meio ao crescimento da demanda hídrica e energética.

Dentre as funções principais de um reservatório estão o uso consuntivo e a geração de energia. O Brasil, nesse último aspecto mencionado, destaca-se por possuir uma matriz elétrica majoritariamente renovável, sendo a fonte hídrica a com maior participação na Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) com cerca de 63,5% (ANEEL, 2020). Isso foi possível graças ao potencial hídrico que o país possui associado a locais propícios para a instalação de grandes obras hidráulicas. No entanto, há uma relutância com relação à construção de reservatórios, pautada principalmente nos impactos socioambientais associados a esse tipo de obra, como por exemplo: desapropriação de terras, alagamento de áreas de proteção ambiental, alteração na fauna e flora.

BRISCOE (2011) alerta que esse tipo de relutância acaba por ser imposta por países ricos e já desenvolvidos, que forçam países mais pobres e dependentes de ajuda a seguir outra forma de desenvolvimento diferente da que garantiu a esses países ricos a posição privilegiada que ocupam. Em países como Austrália e Estados Unidos, que possuem muito do seu potencial hídrico explorado, faz sentido a ideia de diminuir a construção de reservatórios, visto que nos rios Murray e Colorado, por exemplo, há barragens com capacidade de armazenar cerca de 1.000 dias de vazão afluente. Diferentemente dessas barragens, as localizadas no rio Indo – importante para a economia do Paquistão – possuem capacidade de armazenar apenas 30 dias de vazão, o que deixa os países banhados por esse rio (China, Índia e o próprio Paquistão) mais suscetíveis a secas e enchentes. Entretanto, o que preocupa é que muitas vezes não são feitos os estudos de impactos ambientais para verificar se a construção do reservatório e sua implementação são viáveis ou não, simplesmente

opta-se por não construir. GOMIDE (2012) reforça que isso se deve muito à pressão de países já desenvolvidos – com uma matriz energética já consolidada – que induzem países emergentes a procurar outras formas de se desenvolver, sem a construção de reservatórios. Isso, segundo Gomide, contribuiu para uma “ideologização” do processo de construção de obras hidráulicas, fazendo com que houvesse ao longo do tempo uma tendência mundial de não construção de reservatórios.

Essa tendência pode ser observada no Brasil, analisando-se o retrospecto recente de construção de usinas hidrelétricas (UHE) no país. Entre 2004 e 2015 foram licitadas vinte e três usinas, sendo que apenas quatro possuíam reservatório com capacidade de regularização. Dentre essas, duas delas, UHE Mauá e UHE São Roque, receberam restrições com relação à cota, 642,5 para 635 m e 780 para 760 m, respectivamente, o que representou uma diminuição no volume do reservatório (CARVALHO, 2015). BERTONE et al. (2019), também, mostraram que a partir dos anos 2000, houve uma redução considerável na construção de usinas com capacidade de regularização. Isso pode ser constatado pelo fato de que mesmo com a implantação de 73 usinas para geração hidrelétrica, houve um aumento na capacidade total de armazenamento de água do sistema em apenas 8%, não acompanhando o crescimento de 58% da capacidade instalada em MW no mesmo período.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) realizou um estudo (EPE, 2015) para a identificação e classificação de potenciais reservatórios de regularização no Sistema Interligado Nacional (SIN) analisando 71 aproveitamentos (com potência superior a 30 MW) com capacidade de regularização mensal e contribuição de 50.700 MWmed de energia armazenável (aproximadamente 18% da capacidade total de armazenamento do SIN). Dentre esses projetos, 16 apresentaram um grau de complexidade socioambiental menor do que o dos demais (não apresentaram interferências em terras indígenas e quilombolas, Unidades de Conservação e proteção integral, ou equivalente) e totalizaram um potencial de 54% da energia total armazenada de todos os 71 aproveitamentos. Esses aproveitamentos analisados pela EPE foram todos aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nas etapas de inventário hidroelétrico, estudo de viabilidade técnica e econômica, e projeto básico. Isso significa que há projetos com estudos aprovados, alguns há mais de 20 anos, que são plenamente possíveis de serem implementados; entretanto, estão em espera (EPE, 2015).

Além da tendência de não construção, no Brasil, há uma outra problemática envolvendo os reservatórios, mais precisamente suas curvas de regularização. A curva de regularização é uma ferramenta que permite a associação de uma vazão demandada com o volume que um reservatório deve possuir para atender a essa demanda. Seu dimensionamento é baseado no índice de regularização (relação entre a vazão regularizada e a vazão média de longo termo) e no máximo déficit acumulado

da série de vazões. Algo relevante de se mencionar é que, muitas das séries de vazões utilizadas para dimensionar os reservatórios possuem comportamento não estacionário, o que faz com que os parâmetros estatísticos destas séries mudem ao longo do tempo, alterando por consequência, as capacidades de regularização desses reservatórios. Logo, hoje é possível que os reservatórios estejam atendendo à vazão demandada com um risco operacional maior do que aquele para o qual foram dimensionados. Nesse sentido, torna-se pertinente uma avaliação do volume atual dos reservatórios e uma análise acerca de suas curvas de regularização original e atualizada.

O objetivo geral desta dissertação é avaliar a influência da não estacionariedade das séries de vazões na curva de regularização e verificar se houve, ou não, perda na capacidade relativa de regularização dos reservatórios ao longo dos anos, indicando o volume atual necessário para atender a demanda original do reservatório. Essa análise é feita por meio da comparação das curvas de regularização originais (até a época em que os reservatórios foram dimensionados) e atualizadas dos reservatórios.

Os objetivos específicos estão associados às ferramentas que serão utilizadas para alcançar o objetivo principal. São esses: (1) aplicação de testes estatísticos de Pettitt e Mann Kendall, a fim de verificar se há ou não alguma tendência nas séries de vazões dos reservatórios brasileiros e se essas tendências possuem um padrão de ocorrência, e (2) geração de séries sintéticas, com o objetivo de calcular, por meio da comparação dos tempos de recorrência associados a cada uma das séries geradas, se o risco associado à operação dos reservatórios sofreu alguma alteração.

Esta dissertação parte da premissa de que vários rios brasileiros apresentam um comportamento não estacionário. Isso influencia diretamente na operação dos reservatórios; logo, na disponibilidade hídrica e na geração energética. Além disso, a mudança no comportamento dos rios afeta também a segurança energética, pois há um impacto na curva de regularização do reservatório, e, por conseguinte, em seu volume.

A estrutura da dissertação é composta por 6 itens. O item 1 contém a introdução, a justificativa e o objetivo do trabalho. O item 2 explica a importância dos reservatórios, apresentando os métodos utilizados para seu dimensionamento e como a combinação desses modelos e métodos pode ser útil para elaboração da curva de regularização. O item 3 mostra a fundamentação teórica, abordando o conceito de séries temporais, dando ênfase à vazão como a principal variável aleatória de interesse; mostra também como é realizada a identificação do comportamento estacionário – ou não estacionário – das séries por meio de testes de hipótese e da análise da autocorrelação. Além disso, o item 3 também apresenta os modelos estocásticos utilizados para reprodução das séries temporais. O item 4 apresenta os materiais e métodos utilizados para o estudo da não estacionariedade e para o desenvolvimento das curvas de regularização,

principal objeto de estudo da dissertação. No item 5, são mostrados os resultados desses estudos, por meio de gráficos e tabelas. O item 6 apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados e, por fim, aborda os possíveis estudos futuros para explorar ainda mais o tema desta dissertação.

## 2 RESERVATÓRIOS

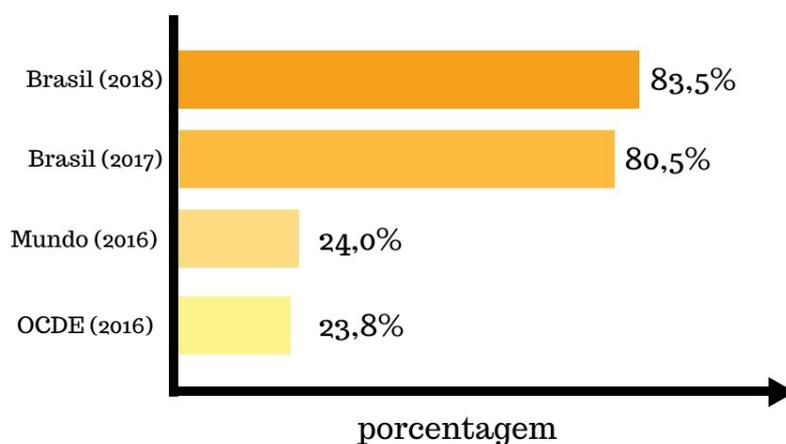
Nesta seção são abordadas as questões referentes ao estudo dos reservatórios; os métodos utilizados para seu dimensionamento, abrangendo desde a forma determinística (método de Rippl) até a estocástica (método de Monte Carlo associado ao máximo deficit acumulado). Além disso, também são explicados mais a fundo o panorama da regularização brasileira e quais são as ferramentas matemáticas que podem ser utilizadas para estudá-lo.

### 2.1 IMPORTÂNCIA

Os reservatórios desempenham um papel importante para o desenvolvimento de qualquer sociedade, principalmente pelos usos múltiplos que estes possuem. Em primeiro lugar, estão a capacidade de armazenamento de água e, logo, o abastecimento populacional. Em seguida estão a geração energética de forma renovável, segurança em relação a alterações climáticas, desenvolvimento local por meio do ganho social – atividades turísticas e recreativas que podem ser realizadas no reservatório. Um ponto que favorece a construção dos reservatórios no Brasil é que cerca de 90% dos equipamentos e serviços utilizados em sua construção possuem tecnologia nacional (CARVALHO, 2015).

Conforme mencionado anteriormente, a matriz elétrica brasileira é predominantemente renovável, dado que a participação da geração hídrica é majoritária, devido ao extenso potencial hídrico do país. A figura 1 mostra que o país está bem acima da média mundial e da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) quando se compara a participação das fontes renováveis (EPE, 2019).

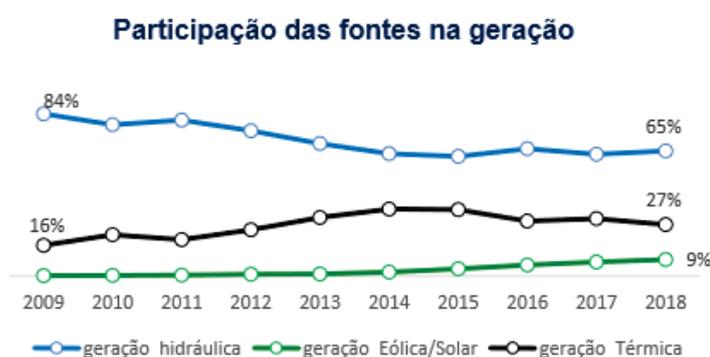
FIGURA 1 – PARTICIPAÇÃO DA ENERGIA RENOVÁVEL NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA, MUNDIAL E DA OCDE



FONTE: Adaptado de EPE (2019)

A geração por meio da fonte hídrica aumentou de 2017 para 2018, de 407,3 TWh para 423,9 TWh (a geração própria foi de 370,9 TWh para 388,9 TWh). Mesmo com o avanço do PIB em 1% houve uma diminuição na oferta interna de energia total e no consumo energético, cerca de 1,7% e 1% respectivamente. A figura 2 mostra a participação das fontes na geração de energia elétrica no país desde 2009 (EPE, 2019).

FIGURA 2 – PARTICIPAÇÃO DAS FONTES NA GERAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA

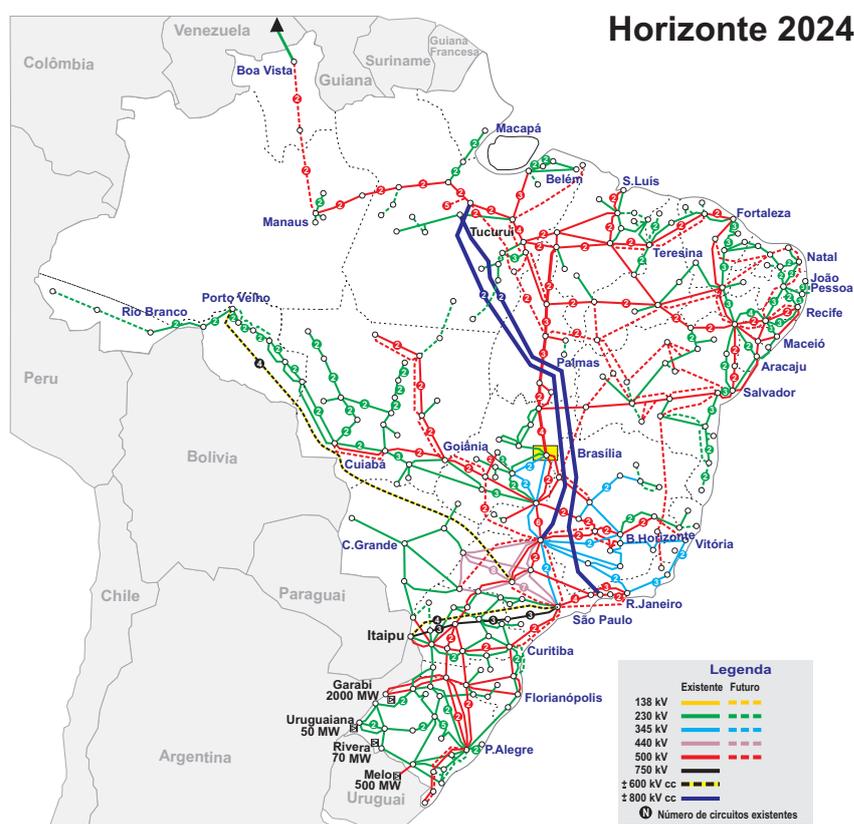


FONTE:EPE (2019)

Os grandes reservatórios brasileiros foram construídos com o objetivo de gerar energia (CARVALHO, 2015). O objetivo era aproveitar o vasto potencial hídrico no país a partir de usinas nas bacias dos rios Iguazu, Paraná, São Francisco e Tocantins e possuir uma matriz elétrica não dependente das oscilações no preço do petróleo. Essa

decisão de construir usinas hidrelétricas com grandes reservatórios foi corroborada pelo estudo da *Canambra* (CANAMBRA, 1969), iniciado em 1963, cujo conteúdo contemplou diversas informações sobre potenciais hídricos, verificando a viabilidade de alguns, inclusive. Carvalho (2015) comenta que essa configuração, utilizando a fonte hídrica como a base da geração elétrica, foi possível graças às redes de transmissão que possibilitaram a interconexão entre as usinas de forma que sempre houvesse uma “regularização virtual” no sistema. Dessa forma foi possível conceber o SIN, um sistema interligado hidrotérmico, que hoje conta com 165 usinas para a geração hídrica, com predominância das usinas a fio de água (88 no total), e 4 usinas com bombeamento (ONS, 2020). A figura 3 mostra a configuração do SIN esperada para o horizonte de 2024.

FIGURA 3 – SIN - HORIZONTE DE 2024



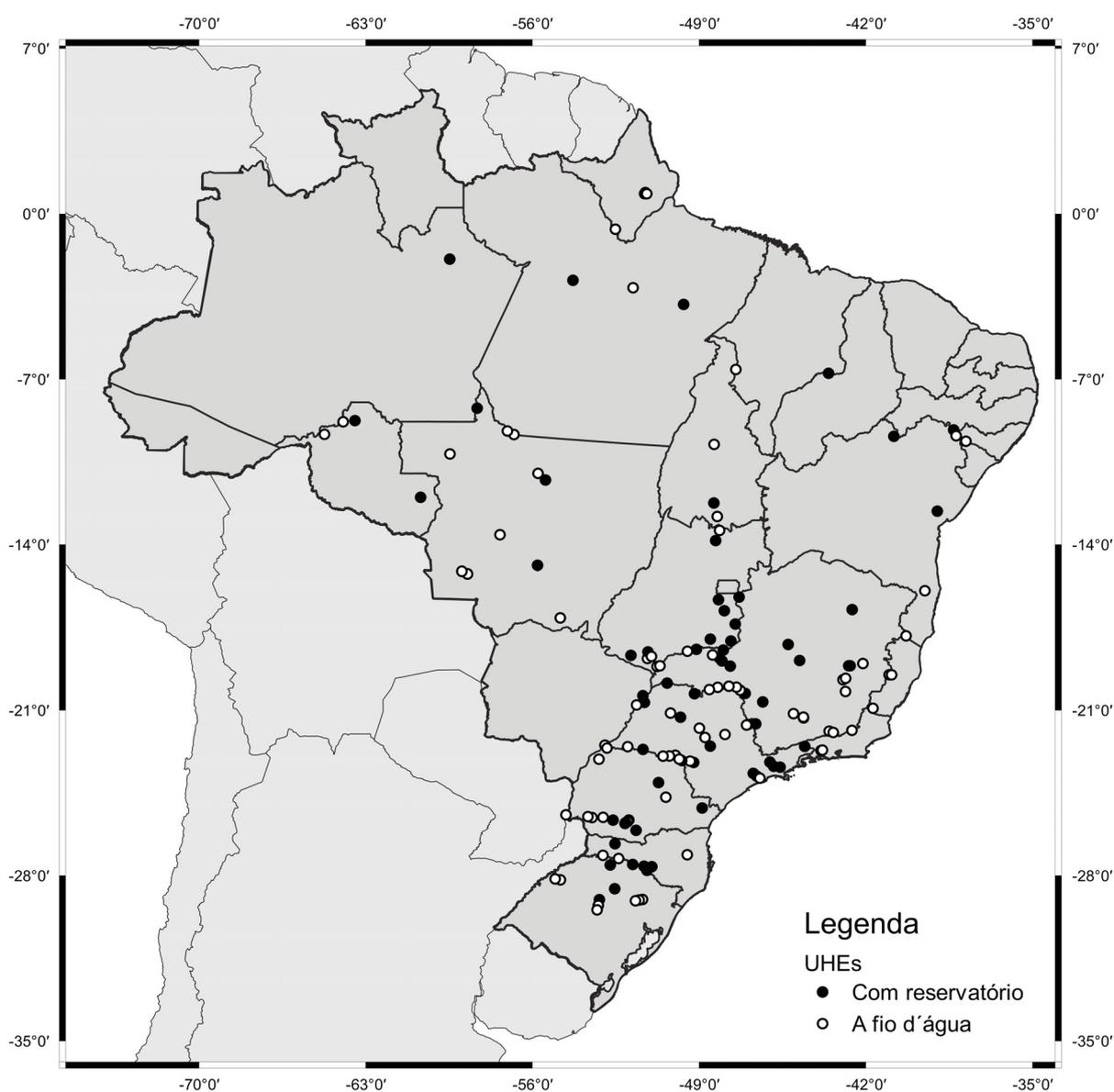
FONTE: ONS (2020)

A partir do mapa com a disposição das UHE's e usinas a fio de água no Brasil, conforme mostra a figura 4, é possível observar que há uma maior concentração das usinas com reservatório nas regiões sul e sudeste do país – principais polos consumidores de energia.

A presença dos reservatórios com capacidade de regularização permite uma

acumulação de energia – por meio de energia potencial – ao sistema e, dessa forma, um controle maior na gestão da oferta. Países como Alemanha, Canadá e Japão se utilizam dessa particularidade da geração hídrica nas Usinas Hidrelétricas Reversíveis, ou *pumped storages*, para aproveitar essa energia que fica latente no sistema por meio de Bombas Funcionando como Turbinas (BFT's). Nesses países, há uma diferenciação na precificação horária da energia, o que permite que o turbinamento num horário de alto consumo e um bombeamento da água para o reservatório num horário de baixo consumo seja economicamente viável. Num cenário no qual há uma grande dificuldade de construção de usinas, especialmente as com reservatório, as *pumped storages* surgem como uma alternativa para o aumento da segurança energética, armazenando a energia proveniente de outras fontes alternativas intermitentes quando o sistema elétrico não puder absorvê-las (DEGRAF; CARVALHO; SANTOS, 2018).

FIGURA 4 – DISPOSIÇÃO DAS UHE'S E USINAS À FIO DE ÁGUA NO BRASIL



Além da função de segurança energética, os reservatórios são fundamentais para a contenção de cheias e, também, para a redução da vulnerabilidade dos recursos hídricos devido a mudanças climáticas; em particular o aumento na temperatura global. Devido a essa elevação nas temperaturas, há um encurtamento do inverno e um prolongamento do verão, o que antecipa o mês com menor disponibilidade de água e posterga o com a maior; há, assim, uma diminuição considerável na disponibilidade de água (EHSANI et al., 2017).

A usina de Três Gargantas, por exemplo, tem como sua principal função a contenção de cheias. Seu nível de operação foi reduzido de 175 m para 145 m para, dessa forma, conseguir armazenar cerca de 22,1 bilhões de m<sup>3</sup> - considerando o nível d'água até o máximo *Maximorum* de 181 m. Sua função secundária é a geração de energia, visto que a usina possui o maior potencial instalado do mundo com 22,4 GW, tornando a matriz elétrica chinesa um pouco mais renovável, pois sua fonte predominante de geração é a usina termelétrica à base de carvão – 68% da matriz, com 4.485 THW de um total de 6.602 TWh (CARVALHO, 2015; ITAIPU, 2019; IEA, 2019).

EHSANI et al. (2017) concluíram que a importância dos reservatórios tende a aumentar no futuro e que o aumento do número e tamanho das barragens possa vir a ser necessário para diminuir o risco associado à operação dos reservatórios devido às mudanças climáticas. Para isso, utilizaram um modelo de redes neurais que simula a operação diária de reservatórios para estimar as implicações dessas mudanças nos barramentos da região nordeste dos Estados Unidos, simulando cenários com diferentes variações de temperatura para os próximos 100 anos. Além dos cenários climáticos construídos, foram também criados cenários de expansão de reservatórios. O cenário climático mais crítico, no qual há um aumento de temperatura global superior a 4°C, segundo EHSANI et al. (2017), só pode ser mitigado completamente caso haja um aumento na quantidade de reservatórios com grande capacidade (igual a 4 km<sup>3</sup>) de forma a totalizar um volume de 143 km<sup>3</sup>. Entretanto, cenários de previsão com longos horizontes de tempo devem ser observados com cautela, pois há grande incerteza associada a tais previsões. Portanto, a construção de grandes reservatórios pode não ser a única forma de mitigar os efeitos nocivos dos cenários modelados.

As desvantagens da construção de reservatórios são relacionadas ao grande impacto ambiental no local de construção do reservatório, devido ao alagamento da área. Os barramentos, como o próprio nome sugere, dificultam a passagem de espécies aquáticas, atrapalhando, por exemplo, a piracema. Com a diminuição da vazão do rio, há uma tendência de aumento de sedimentos no reservatório, bem como da temperatura do rio, o que pode favorecer a eutrofização. Agora, do aspecto legal, um ponto bastante crítico é a desapropriação das terras para a instalação da usina, principalmente quando

se trata de terras indígenas, quilombolas ou unidades de conservação (CARVALHO, 2015).

Os impactos ambientais são inerentes a qualquer obra de engenharia. Mesmo as demais formas de geração renovável como a eólica, solar e biomassa afetam o meio ambiente - ainda que de forma mais branda que a hidráulica. Entretanto, a geração hídrica, dentre as renováveis é a que consegue melhor proporcionar, de uma forma geral, uma geração não intermitente e barata (entre R\$ 157/ MWh e R\$ 216/ MWh nos últimos leilões de energia nova), apesar de os preços médios de venda do MWh da geração eólica nos últimos leilões ter ficado entre R\$ 187/ MWh e R\$ 208/ MWh, valores bem próximos aos da geração hídrica (CCEE, 2020). Além disso, há os usos múltiplos do reservatório, sendo uma das vantagens primordiais a capacidade de armazenamento de água e, portanto, de energia também.

## 2.2 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

Os métodos mais utilizados para o dimensionamento de reservatórios são o método de Rippl, por meio da Análise Sequencial de Picos (ASP), e a utilização do método de Monte Carlo associado ao método de Rippl, no qual é possível ainda relacionar tempos de recorrência para os volumes calculados.

### 2.2.1 Método de Rippl

O método de RIPPL (1883), ou método histórico, é uma das ferramentas utilizadas para calcular o volume de reservatórios. Esse é um método empírico e gráfico que consiste no cálculo do máximo deficit acumulado de uma série de vazões conhecida. Esse máximo deficit representa o volume que o reservatório deve possuir para atender a estimativas de demanda para períodos igualmente espaçados no tempo – podendo ser mês a mês (regularização intranual) ou ano a ano (regularização plurianual), por exemplo – sem esvaziar. A tabela 1 mostra um exemplo fictício para ilustrar a aplicação do método. A partir dos dados contidos na tabela, as afluências de cada mês (coluna 2), são subtraídas das respectivas demandas (coluna 4) e, em seguida, acumulam-se esses valores ao longo do tempo (coluna 6). Plotam-se as vazões acumuladas (coluna 3) em função do tempo, obtendo assim a “curva de massa”, figura 5. Plota-se também duas retas com a inclinação igual ao valor da demanda (coluna 4), uma tangente ao maior ponto de inflexão da curva de massa e a outra ao menor. A distância vertical entre as retas tangentes, para qualquer período, representa o volume necessário (após ser multiplicado pelo intervalo de tempo correspondente ao período analisado) para o reservatório atender à demanda existente, ou em outras palavras, o máximo deficit acumulado. Caso o reservatório consiga atender a esse período mais crítico, conseguirá

também atender aos demais. Na maioria dos casos adota-se que o reservatório está cheio no início do cálculo.

TABELA 1 – DADOS FICTÍCIOS DE VAZÃO AFLUENTE E DEMANDA

Mês	Vazão afluente(m <sup>3</sup> /s)	Vazão acumulada(m <sup>3</sup> /s)	Demanda (m <sup>3</sup> /s)	Deficit (m <sup>3</sup> /s)	Deficit acumulado (m <sup>3</sup> /s)
jan/19	3	3	4	-1	-1
fev/19	5	8	4	1	0
mar/19	6	14	4	2	2
abr/19	2	16	4	-2	0
mai/19	1	17	4	-3	-3
jun/19	2	19	4	-2	-5
jul/19	7	26	4	3	-2
ago/19	3	29	4	-1	-3
set/19	2	31	4	-2	-5
out/19	3	34	4	-1	-6
nov/19	6	40	4	2	-4
dez/19	8	48	4	4	0
jan/20	1	49	4	-3	-3

A ASP é um método similar ao de Rippl e corresponde a forma automatizada de calcular o máximo deficit acumulado desejado (VOGEL; STEDINGER, 1987), pois esse valor é calculado por meio da equação 2.1. Um diferencial do ASP é que o método não necessita que a demanda seja constante (LOUCKS; BEEK, 2017).

$$D_t = \max \begin{cases} 0 \\ D_{t-1} - Z_t + \sigma \hat{\mu} \end{cases} \quad (2.1)$$

Sendo:

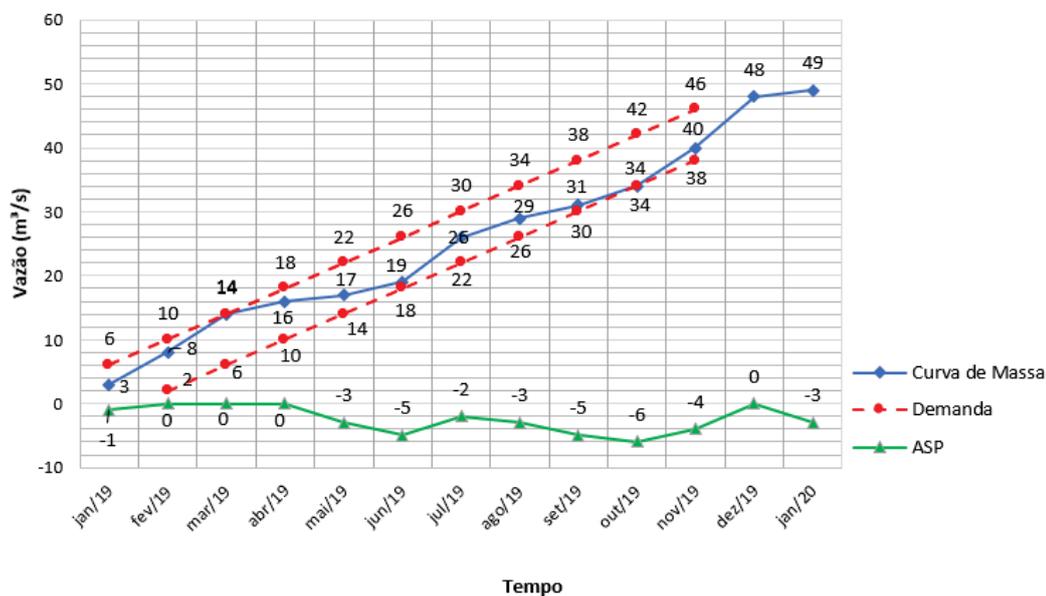
$\hat{\mu}$  – vazão média de longo termo

$D_{t-1}$  – deficit no tempo  $t - 1$

$Z_t$  – vazão afluente no tempo  $t$

$\sigma$  – índice de regularização

FIGURA 5 – CURVA DE MASSA X ASP



FONTE: o autor(2020)

Na Análise Sequencial de Picos vale ressaltar que a “curva de massa” é censurada, ou seja, há um limite caracterizado pelo volume máximo do reservatório ( $D_t = 0$ ). Caso o resultado do deficit seja negativo, significa que armazenamento ultrapassou o volume máximo do reservatório, logo esse volume excedente não interessa no cálculo do máximo deficit acumulado, pois essa vazão é vertida pelo reservatório.

### 2.2.2 Método de Monte Carlo

Posto que se quer dimensionar um reservatório, deve-se analisar a série histórica de vazões do rio para que se obtenha, a partir do método de Rippl, da Análise Sequencial de Picos, ou qualquer outro, o volume desse reservatório. Entretanto, a série de vazões utilizada para realizar esse dimensionamento é apenas uma das inúmeras realizações do processo estocástico atrelado às vazões, e cada uma dessas realizações é equiprovável. Uma série sintética é diferente da série observada, porém procura conservar as mesmas características da série original, principalmente a média e o desvio padrão. A partir da geração de diversas dessas séries é possível obter “ $N$ ” deficits e, dessa forma, “ $N$ ” volumes de reservatório;  $n$  seria o enésimo deficit analisado. A probabilidade de sucesso  $\alpha$  é dada pela equação 2.2 (NEIRA, 2005).

$$\alpha = \frac{n}{N} \quad (2.2)$$

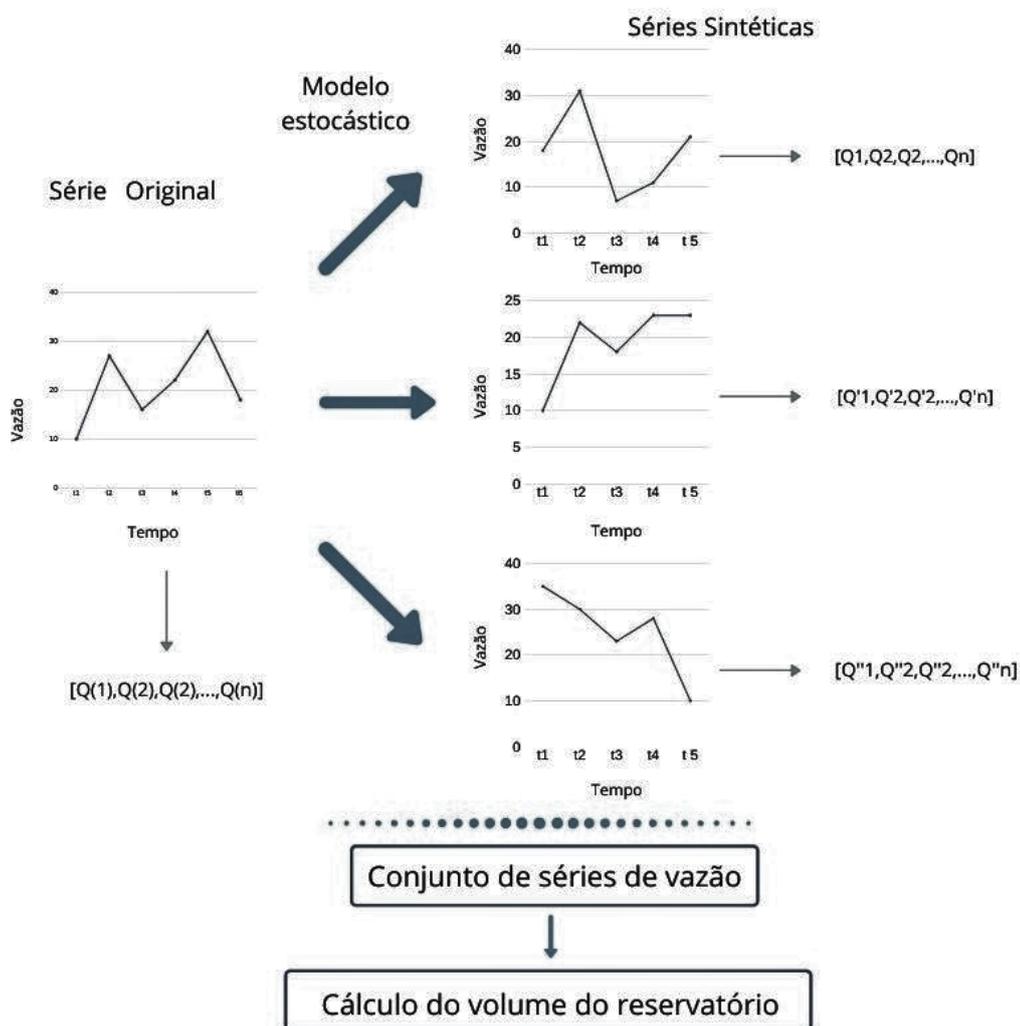
São geradas “ $N$ ” séries sintéticas com “ $M$ ” anos; considera-se que há dependência temporal e que há uma distribuição de probabilidades marginal. A partir disso,

obtém-se “ $N$ ” valores de deficit com probabilidade  $\frac{1}{N}$  de ocorrência. A figura 6 mostra um esquema para a utilização do Método de Monte Carlo.

Para a utilização do método de Monte Carlo, as séries sintéticas são ferramentas fundamentais. De acordo com NEIRA (2005), dois pontos são essenciais na geração dessas séries: a distribuição de probabilidades marginal das vazões afluentes juntamente com a estimativa de parâmetros, e a correlação temporal da série de vazões utilizada. A partir dos dados da série histórica são escolhidas a função densidade de probabilidades (FDP) que é utilizada e o método para estimar os parâmetros, que pode ser o método dos Momentos, o método da Máxima Verossimilhança ou o método dos Momentos L.

É importante salientar que antes da geração das séries sintéticas devem-se realizar testes estatísticos para verificar se a distribuição normal é um bom ajuste para a série analisada. Esses testes podem ser os de Anderson Darling, Kolmogorov-Smirnov, Shapiro Wilk, conforme mostram as equações 3.5, 3.6, 3.3, 3.4 e 3.7. Caso haja a rejeição da hipótese nula de que a normal é uma boa distribuição, deve-se realizar uma transformação na série, como a logarítmica por exemplo, de forma que, após uma nova aplicação dos testes de hipótese, a hipótese nula não seja rejeitada.

FIGURA 6 – MÉTODO DE MONTE CARLO: ESQUEMA



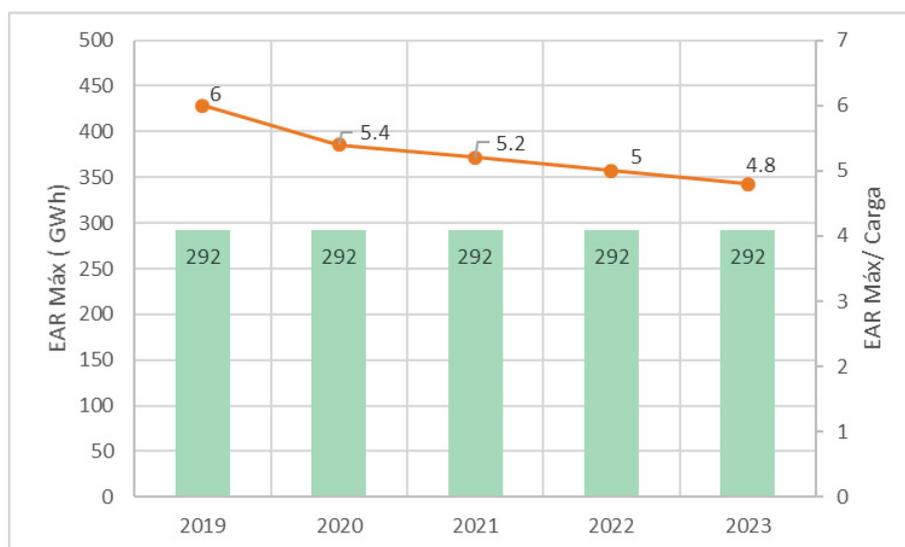
### 2.3 REGULARIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

A capacidade de regularização brasileira energética está diminuindo por duas possíveis razões principais: expansão da geração hidrelétrica com baixa ou nula capacidade de regularização plurianual – somente intranual – e pela não estacionariedade das séries de vazões. De acordo com Plano Energético Nacional (PEN) de 2019 elaborado por ONS (ONS, 2019), o grau de regularização<sup>1</sup> tende a diminuir cada vez mais. Em 2019 esse valor foi de aproximadamente 6,5 meses; já em 2023, a previsão é que esse valor diminua para 4,8 meses, conforme mostra a figura 7, que relaciona a Energia Máxima Armazenada (EAR<sub>máx</sub>) com a demanda de energia (carga). Mesmo com uma possível inflexibilidade na geração das usinas a fio de água, o grau de regularização, em 2023, pode chegar a 8 meses somente – considerando a opção pelo armazenamento ao invés da geração, o que mostra que há uma perda de capacidade da regularização

<sup>1</sup> O grau de regularização é referente ao tempo de estoque de energia no SIN.

em relação ao aumento de carga. Caso a matriz elétrica brasileira continue com uma expansão hidrelétrica com baixa ou nenhuma capacidade de regularização plurianual, a participação das termelétricas crescerá na matriz, principalmente as flexíveis com menor custo de operação e com menores incertezas com relação aos combustíveis como o gás natural, (GLN) e o carvão (ONS, 2019).

FIGURA 7 – CARGA VERSUS GRAU DE REGULARIZAÇÃO



FONTE: Adaptado de ONS (2019)

Uma outra forma de verificar se houve ou não a diminuição na capacidade de regularização é por meio da curva de regularização. Essa curva de regularização pode ser obtida por qualquer método de dimensionamento de reservatórios e fornece o máximo deficit acumulado do período analisado como sendo o volume do reservatório. A função da curva é fornecer o volume do reservatório a ser dimensionado dada uma demanda, que no máximo pode ser igual à vazão média de longo termo (NEIRA, 2005).

O índice de regularização, representado pela equação 2.3, é uma ferramenta importante para identificar o quanto da vazão média de longo termo o reservatório é capaz de regularizar. Devido ao fato de o sistema elétrico ter apresentado uma expansão hídrica por usinas a fio de água, a capacidade de regularização do sistema como um todo diminuiu e isso pode ser preocupante em regiões com a sazonalidade bem demarcada ou quando houver longos períodos de seca. Um agravante considerável a essa possível perda de capacidade de regularização é a não estacionariedade das séries de vazões.

$$\delta = \frac{Q}{Q_{mlt}} \quad (2.3)$$

Sendo:

$Q$  – vazão demandada

$Q_{mlt}$  – vazão média de longo termo

$\delta$  – índice de regularização

A regularização é uma parte chave para a gestão dos recursos hídricos. NEIRA (2005), em sua dissertação, desenvolveu curvas de regularização para reservatórios cujo estado inicial é diferente do volume máximo e estabeleceu o risco associado para cada um dos estados iniciais escolhidos – 20, 40, 60, 80% do volume máximo – dada uma demanda constante. NEIRA (2005) utilizou o método de Monte Carlo para a geração de séries sintéticas associado ao método de Rippl. Além disso, para conseguir mensurar o risco associado à curva, utilizou a Teoria Estocástica de Reservatórios (GOMIDE, 1986), ajustando uma distribuição Normal de probabilidades aos deficits acumulados. Dessa forma, haja vista que há um risco constante de não atendimento da demanda hídrica e energética, a ideia trabalhada foi de manter o risco de esvaziamento do reservatório abaixo de um limite pré-fixado.

Além do método de Monte Carlo associado ao método de Rippl, KURIA e VOGEL (2015b) buscaram utilizar um método analítico empírico para analisar as variabilidades na capacidade de regularização de um reservatório dada uma determinada confiabilidade, visto que o Método de Monte Carlo é computacionalmente bastante intenso devido às milhares de séries sintéticas geradas. Foram analisados 729 rios no mundo todo, contendo 25 anos de dados de vazões mensais. Esse estudo foi um aprimoramento do estudo de MCMAHON e ADELOYE (2005) e a equação analítica utilizada foi desenvolvida por KURIA e VOGEL (2015a). Os resultados foram comparados com os obtidos por Monte Carlo a fim de validar o método; as análises indicaram uma grande proximidade entre ambos os resultados. A equação 2.4 representa o cálculo da regularização por meio de uma forma analítica.

$$Y = 0.631\mu^{1.135}\sigma^{-0.342}\gamma^{0.203}S^{0.203}Z_r^{-0.306} \quad (2.4)$$

Sendo:

$\mu$  – média aritmética

$\sigma$  – desvio padrão

$\gamma$  – coeficiente de assimetria

$Z_r$  – variável normal padrão para o nível de confiança  $r$

$Y$  – índice de regularização

$S$  – Capacidade de armazenamento

PETHERAM, GALLANT e READ (2017) utilizam um programa que é capaz de

calcular a melhor localização para uma usina, melhor posição para um barramento, custos e o cálculo da capacidade de regularização, chamado *DamSite*. O cálculo da regularização é feito de forma preliminar a partir da análise de pixels usando Sistema de Informação Geográfica (SIG); após isso, é utilizado o método de Behaviour Analysis Model (BHA) para uma estimativa mais robusta, utilizando *grids* temporais de séries diárias de precipitação, evaporação e *runoff*. Na análise preliminar o valor da capacidade de regularização foi calculado com base na aproximação de Gould-Dincer (MCMAHON; ADELOYE, 2005), que abrange vazões com distribuição Normal, Log-Normal e Gama. Há distinções nos valores de armazenamento intranual e plurianual. Escolhe-se o maior desses valores. Na análise robusta: o BHA basicamente modela o balanço hídrico dos reservatórios, considerando entradas e saídas de vazão e evaporação.

O próximo item trata da fundamentação teórica desta dissertação, abordando de forma mais detalhada os conceitos de estacionariedade e os modelos matemáticos tratados nesse item.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta fundamentação teórica são abordados os aspectos que embasam a dissertação. A seção inicia-se explicando o que é uma variável aleatória e como podem ser calculadas suas probabilidades de ocorrência. Na sequência, é abordado o conceito de estacionariedade e qual a sua influência no estudo das vazões. Em seguida, são mostrados os modelos estocásticos que podem ser aplicados às séries de vazões com o intuito de modelá-las. O objetivo dessa seção é fornecer um arcabouço para o melhor entendimento dos conceitos e possibilitar uma visualização do que será realizado nos itens seguintes.

#### 3.1 VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

Suponha que haja diversos lançamentos de uma moeda. O espaço amostral desse experimento é dado por todas as combinações possíveis de ocorrer, nesse caso, esse espaço é dado pela combinação entre dois resultados: ou da moeda ser cara ou ser coroa. Assim, por exemplo, escolhe-se como objeto de estudo o número de vezes que o lançamento for “cara”. Esse número representa a variável aleatória do experimento realizado. A variável aleatória é uma função que relaciona as ocorrências de determinado experimento a um valor numérico. Esta variável pode ser discreta, quando seus valores assumem números inteiros, ou contínuas, quando assumem qualquer valor real (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

É possível também associar os valores das variáveis aleatórias a sua probabilidade de ocorrência. No caso das variáveis discretas, essa relação  $p_X(x)$  é dada pela Função Massa de Probabilidade (FMP). Essa função representa a probabilidade de que a variável aleatória  $X$  em estudo assumira o valor suposto  $x$ . Caso o objetivo do estudo seja descobrir a probabilidade de  $X$  ser menor ou igual a  $x$  (equação 3.1), utiliza-se a Função Acumulada de Probabilidades (FAP) (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

$$P(x) = P(X \leq x) = \sum_{x_i \leq x} p_X(x_i) \quad (3.1)$$

A FAP deve sempre ser maior ou igual a zero e seu somatório (incluindo todos os argumentos  $x$ ) deve ser igual a 1.

As variáveis contínuas, por sua vez, são probabilisticamente determinadas pela FDP. Entretanto, essa função, cuja notação é  $f_X(x)$ , não representa a probabilidade de  $X$  ser igual a  $x$ , mas sim a intensidade com que  $P(X \leq x)$  é alterada na vizinhança do

argumento. Essa probabilidade está contida dentro dos limites  $x_0$  e  $x_1$ . Logo,  $P(X = x) = 0$ , pois equivale à área de uma reta (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

A FAP de uma variável aleatória contínua é representada por  $F_X(x)$  e, da mesma forma que no caso discreto, fornece a probabilidade de não superação do argumento  $x$  (equação 3.2).

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) dx \quad (3.2)$$

Neste trabalho, a principal variável aleatória analisada é a vazão de rios, ou, de forma mais precisa, as séries de vazões que compõem a série histórica de vazões afluentes ao reservatório em estudo.

### 3.1.1 Normalidade das variáveis aleatórias

A premissa de que as variáveis aleatórias são normalmente distribuídas é um dos requisitos para a aplicação de alguns testes estatísticos em hidrologia e para a validação de modelos estocásticos Box e Jenkins (subitem 3.3.3) e de seus resíduos, por exemplo. Entretanto, é comum que as curvas das FDP's das séries de vazões sejam assimétricas e que essas séries sejam limitadas, fisicamente, por vazões iguais a zero (SALAS et al., 1980).

Para a verificação da normalidade são aplicados testes estatísticos, como, por exemplo, os de Anderson-Darling, equações 3.5 e 3.6, Kolmogorov-Smirnov, 3.3 e 3.4, e Shapiro-Wilk, equação 3.7.

$$A^2 = n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|F_N(x) - F_X(x)|}{|F_X(x)(1 - F_X(x))|} dF_X(x) \quad (3.3)$$

$$F_N(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < x_{(1)} \\ \frac{k}{n}, & \text{se } x_{(k)} \leq x \leq x_{(k+1)} \\ 1, & \text{se } x \geq x_{(n)} \end{cases} \quad (3.4)$$

Sendo:

$A$  - estatística do teste

$n$  - número de valores na amostra

$k$  - contador

$F_N(x)$  - função de distribuição acumulada empírica

$F_X(x)$  - função de distribuição acumulada teórica

Caso  $A^2$  exceda os valores críticos tabelados para a estatística do teste para determinados níveis de confiança e graus de liberdade, rejeita-se a hipótese nula de que a distribuição normal é um bom ajuste para a amostra.

$$F_N(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{[\infty, x]}(X_i) \quad (3.5)$$

$$D_n = \sup_x |F_N(x) - F_X(x)| \quad (3.6)$$

Sendo:

$I_{[\infty, x]}(X_i)$  = função indicadora, sendo igual a 1 quando  $X_i \leq x$  e 0 caso o contrário.

$D_n$  – estatística do teste

$n$  – número de observações

$X_i$  – observação independente e identicamente distribuída

$F_X(x)$  – função de distribuição acumulada teórica

$F_N(x)$  – função de distribuição acumulada empírica

A estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov é comparada com o valor crítico tabelado de acordo com o nível de significância escolhido e com os graus de liberdade. Caso o valor calculado seja inferior ao valor tabelado, não rejeita-se a hipótese nula.

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{(i)} - \bar{x})^2} \quad (3.7)$$

Sendo:

$a_i$  – coeficiente tabelado

$x_{(i)}$  – variável aleatória

$\bar{x}$  – média das variáveis aleatórias

O valor de  $W$  é comparado com os valores críticos da estatística do teste para determinado nível de confiança e graus de liberdade. Rejeita-se a hipótese nula caso o  $W$  calculado seja inferior ao valor tabelado.

Ressalta-se que GOMIDE (1986) faz um alerta para a incompatibilidade da hipótese de normalidade para as variáveis aleatórias – no caso desta dissertação, vazões anuais. Apesar do teorema do limite central garantir que a soma de um número grande de variáveis aleatórias independentes e igualmente distribuídas possui uma distribuição normal, no caso das vazões anuais (365 vazões diárias) essa hipótese é

questionável, pois as vazões diárias não são independentes entre si. Mesmo com esse porém, a distribuição normal continua sendo frequentemente utilizada.

Conforme mencionado no início do item, muitos testes de hipótese utilizados para identificar uma possível tendência na série necessitam que esta possua normalidade e independência em seus termos. Para isso pode-se realizar a transformação logarítmica de modo a normalizar a série, por exemplo, ajustando uma distribuição log-normal de 2 parâmetros (SALAS et al., 1980), antes de tentar aplicar algum teste de hipótese. Há também a opção de se realizar a normalização por meio da transformação Box-Cox, representada na equação 3.8 (MORETTIN; TOLOI, 2004).

$$Z_t^\lambda = \begin{cases} \frac{Z_t^\lambda}{\lambda}, & \text{se } \lambda \neq 0 \\ \log Z_t, & \text{se } \lambda = 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

Sendo:

$Z_t^\lambda$  – série transformada

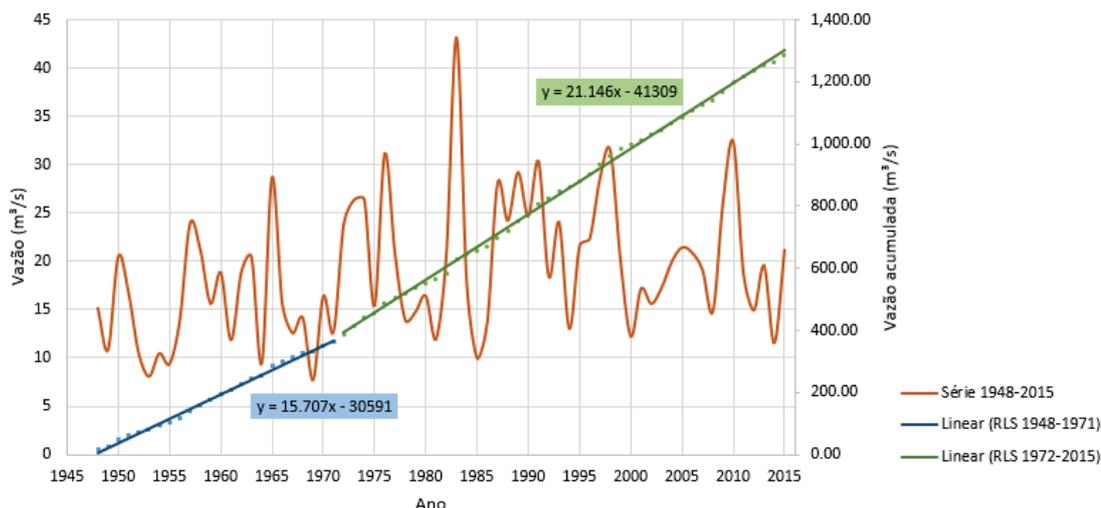
$Z_t$  – série original

$\lambda$  – parâmetro de transformação

### 3.2 ESTACIONARIEDADE

Uma série dita estacionária preserva as mesmas características estatísticas independentemente do tempo. Entretanto, a maior parte dos fenômenos observados, principalmente ao analisar séries temporais, como as séries de vazões, por exemplo, apresenta algum tipo de comportamento não estacionário, que pode se manifestar de forma cíclica, sazonal ou por meio de uma tendência (MORETTIN; TOLOI, 2004), sendo esta a forma que será abordada mais detalhadamente neste trabalho. A figura 8 mostra um caso de não estacionariedade na estação fluviométrica de Porto Velho no rio Itapetinga, em São Paulo. Na figura 8, é possível observar que a partir de 1971 houve uma mudança na tendência da série de vazões, o que fica mais evidente com a diferença nos valores dos coeficientes angulares das regressões lineares simples (RLS) das vazões acumuladas ao longo do tempo.

FIGURA 8 – ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE PORTO VELHO - VAZÕES MÉDIAS ANUAIS



YESTE et al. (2018) mostram que houve redução significativa nas vazões mensais do rio Guadalquivir (Espanha) – cerca de 60% – nos últimos 50 anos devido ao comportamento não estacionário do rio. Além disso, utilizam séries sintéticas das séries de vazões para simular e analisar se estas também apresentariam tendências, o que se provou verdadeiro. As causas dessa variação não foram as ações antrópicas e nem a diminuição da precipitação na bacia, mas sim a mudança na distribuição intranual dessas precipitações, que passaram a ocorrer mais no período do verão, no qual há também uma maior evaporação, e menos no inverno. Essa alteração no período de ocorrência das chuvas foi o suficiente para essa redução significativa nas vazões mensais ao longo do tempo.

Há uma confusão comum entre as definições de estacionariedade e homogeneidade. Conforme mencionado anteriormente, uma série é considerada estacionária quando seus parâmetros estatísticos se mantêm inalterados ao longo do tempo. Para uma amostra ser considerada homogênea, todos os seus elementos devem ser oriundos de uma única e idêntica população. Uma amostra homogênea deve ser idêntica ao longo do tempo e em seu mecanismo de formação. Numa série de vazões máximas, por exemplo, as vazões registradas podem decorrer de precipitações comuns ou de fenômenos naturais como o *El Niño* ou a contribuição da água do degelo. Essa diferença no mecanismo causador das vazões máximas faz com que haja duas amostras a serem analisadas: uma sob influência da precipitação regular e outra sob influência de um fenômeno natural extraordinário específico. Nesse exemplo, a amostra é caracterizada como heterogênea (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

MILLY et al. (2008) comentam que os sistemas de gerenciamento dos recursos hídricos foram desenvolvidos segundo a hipótese da estacionariedade. Isso significa que qualquer variável aleatória (vazões médias anuais, por exemplo) possui uma

FDP invariável no tempo. Os erros na estimação dos parâmetros são reduzidos com observações adicionais e melhoria nos instrumentos de medição.

Com o intuito de melhorar os sistemas de gerenciamento de recursos hídricos existentes, foram desenvolvidos modelos não estacionários; entretanto, há uma dificuldade na utilização desses modelos para a análise das séries de vazões. O problema não é a falta de tecnologia para realizar as análises não estacionárias, mas a baixa confiabilidade nos dados utilizados como *input* no modelo. SERINALDI (2017) sugere que, pelo princípio da Parcimônia, a utilização de modelos estacionários associados a uma análise exploratória de dados gera resultados semelhantes aos de modelos não estacionários complexos (modelos *Generalized Extreme Value*, *GEV*, com variações lineares e não lineares dos parâmetros no tempo).

A transformação de uma série não estacionária para uma estacionária é necessária para a aplicação de modelos estocásticos estacionários. Uma dessas transformações – e a mais comum – é a subtração sucessiva das variáveis aleatórias, conforme mostra a equação 3.9 (MORETTIN; TOLOI, 2004).

$$\Delta Z(t) = Z(t) - Z(t - 1) \quad (3.9)$$

Pode-se repetir o procedimento indefinidamente por  $n$  vezes, conforme mostra a equação 3.10.

$$\Delta^n Z(t) = \Delta[\Delta^{n-1} Z(t)] \quad (3.10)$$

Sendo:

$Z(t)$  – série de vazão no tempo  $t$

$Z(t - 1)$  – série de vazão no tempo  $t - 1$

Para verificar se a série se tornou ou não estacionária podem ser realizados testes de hipótese a fim de verificar tendências, ou analisar a função de autocorrelação da série (FAC); caso o decaimento seja rápido e a autocorrelação se mantenha próxima de zero, conclui-se que a série é estacionária.

### 3.2.1 Identificação da Estacionariedade

A não estacionariedade nas séries de vazões é tipicamente associada a três fatores: erros sistemáticos, mudanças climáticas e/ou ações antrópicas (SALAS et al., 1980). A análise do comportamento estacionário ou não estacionário pode ser realizada no domínio temporal, no domínio das frequências ou em ambos. No primeiro domínio, são realizadas análises por meio de regressão linear ou de testes de hipótese, buscando-se detectar algum tipo de tendência linear ou quebra na série analisada.

A análise no domínio temporal é calcada, principalmente, no fato de que as séries de vazões são dadas em função do tempo, e uma das ferramentas utilizadas para essa análise é o teste de hipótese. Os testes de hipótese utilizados para detecção de tendências assumem como hipótese nula que a série é estacionária, ou seja, não apresenta tendências ao longo do tempo. A estatística fornecida por esses testes é comparada a valores teóricos obtidos das distribuições de probabilidades dos próprios testes, com base num nível  $\alpha$  de significância. Esse nível de significância determina a região na distribuição de probabilidades na qual, caso o valor da estatística esteja dentro, não será rejeitada a hipótese nula. Os valores mais comuns para  $\alpha$  são 1%, 5% e 10%. Os testes também podem ser realizados de forma uni ou bilateral; a diferença entre ambos consiste na independência do sentido da tendência no teste bilateral. Dentre os testes de hipótese mais utilizados há os paramétricos (T-student, F-Snedecor) e não-paramétricos (Wilcoxon, Pettitt e Mann Kendall).

No segundo domínio, a variável tempo deixa de ser importante, visto que a contribuição de cada dado à série é o mais relevante. Nessa análise há uma desagregação da série em funções harmônicas compostas por senos e cossenos. Ainda no domínio das frequências, há também a análise por meio da Função Densidade Espectral (FDE), composta pela transformada de Fourier aplicada a FAC da série e da transformada *wavelet*, que é dada pela convolução de uma série  $Z_t$  com uma função  $\psi(t)$ , a *wavelet-mãe* (DETZEL, 2015).

Há, entretanto, críticas principalmente à representação das tendências de forma determinística, equacionadas quase sempre de forma linear. Isso gera um conflito de conceitos, pois há uma inconsistência no fato de modelar estocasticamente uma série cuja variável aleatória é equacionada de forma determinística. Essa inconsistência se deve ao fato da modelagem estocástica trabalhar com probabilidades de ocorrência de um determinado fenômeno, enquanto na modelagem determinística há uma relação matematicamente descrita que reproduz exatamente as influências das variáveis de interesse no fenômeno em questão – essas distinções são abordadas de forma mais completa no item 3.3 (KOUTSOYIANNIS, 2006; BOX; JENKINS; REINSEL, 2008).

Nos subitens a seguir são apresentados os detalhes referentes ao primeiro domínio citado.

### 3.3 MODELOS ESTOCÁSTICOS APLICADOS EM HIDROLOGIA

A modelagem possui como objetivo tentar abstrair a essência do real problema analisado, assumindo hipoteticamente que, a partir do modelo criado, os resultados e, posteriormente, conclusões, são válidos para a situação real modelada. Por exemplo: supõe-se que existe uma indústria e que nela são produzidos dois produtos, A e B. O custo de produção desses produtos é diferente; para produzir A, gasta-se X, e para

B, gasta-se Y. As horas dedicadas assim como o número de funcionários necessários para as produções de ambos também são diferentes. O objetivo, ou a função objetivo, dessa indústria é aumentar, ou maximizar, o lucro. Logo, para resolver esse “problema”, o modelo deve ser desenhado de tal forma que sejam escolhidos aqueles recursos que impactam de forma mais significativa na função objetivo, nesse caso a maximização do lucro. Dessa forma, o modelo é capaz de fornecer resultados que sejam satisfatórios para a situação existente. Vale mencionar que em muitos casos encontra-se não apenas uma “solução ótima”, mas sim um conjunto de “soluções ótimas” (HILLIER, 2001). Os modelos podem ser totalmente orientados a dados, físicos, ou uma combinação de ambos; dentre os modelos orientados a dados, pode-se destacar os modelos matemáticos. (CHAPRA, 1997).

Dentre os modelos matemáticos mais aplicados em hidrologia estão os modelos determinísticos e estocásticos. O modelo determinístico busca explicar, por meio de equações matemáticas, a relação entre a variável de interesse e os fatores influentes no fenômeno estudado. O modelo estocástico, por sua vez, busca expressar essa relação em termos probabilísticos, pois nem sempre os fatores influentes possuem valores exatos conhecidos. Devido a isso, os fenômenos puramente determinísticos são mais raros de serem observados, visto a dificuldade de se obter de forma exata os fatores influentes. Por meio de análises probabilísticas é possível entender o comportamento de grande parte dos fenômenos naturais, com destaque para os ligados à hidrologia (HIPPEL; MCLEOD, 1994; BOX; JENKINS; REINSEL, 2008; DETZEL, 2015).

### 3.3.1 Modelos de séries temporais e processo estocástico

Séries temporais são conjuntos de observações realizadas de forma ordenada em intervalos de tempo. Exemplos de séries temporais: precipitação diária, vazões mensais ou até os índices da bolsa de valores de São Paulo (IBOVESPA). Essas séries são essenciais para se entender desde o comportamento da própria série, investigando possíveis sazonalidades ou ciclos, até a realização de previsões de valores observados. Considerando  $Q_t$  como sendo uma vazão num tempo  $t$ , dado em meses por exemplo, e supondo que haja duas séries de vazões com o mesmo intervalo de tempo, mas em anos distintos, as séries temporais são o comportamento observado de cada uma das vazões ao longo dos anos e o processo estocástico é o conjunto de todos os possíveis comportamentos que poderiam ser observados (MORETTIN; TOLOI, 2004).

O processo estocástico  $Z$  é representado por uma família de funções dada por  $Z = Z(t), t \in T$ , sendo  $Z(t)$  uma variável aleatória e  $t \in T$  (MORETTIN; TOLOI, 2004). Caso  $T \equiv 1, 2, 3, \dots, t$ , o processo é considerado discreto e é representado pela notação  $Z_t$ ; caso  $T \equiv R$ , o processo é considerado contínuo e representado pela notação  $Z(t)$ . Dentro do processo estocástico também pode ser considerada uma outra variável  $\omega$

que representa um espaço de probabilidades ( $\omega \in \Omega$ ) no qual a variável aleatória  $Z(t)$  é definida. Geralmente, essa dependência do processo em relação à variável  $\omega$  é ocultada, pois o valor desse argumento é fixado. Há quatro possíveis representações do processo estocástico, que variam de acordo com  $\omega$  e  $t$ : variação de  $t$  e  $\omega$  (família de funções temporais); variação de  $t$ , apenas (função temporal única); variação de  $\omega$ , apenas (variável aleatória) e  $t$  e  $\omega$  fixos (um número)(DETZEL, 2015).

Dentro da análise estocástica, há quatro modelos principais, que associam tempo aos estados dos fatores analisados. A tabela 2 mostra isso.

TABELA 2 – ESTADOS VERSUS TEMPO : PROCESSO ESTOCÁSTICO

		Estados	
		Discreto	Contínuo
Tempo	Discreto	Cadeias de Markov	Séries Temporais
	Contínuo	Processos Temporais	Equações Diferenciais Estocásticas

FONTE: Adaptado de KOUTSOYIANNIS (2006)

O estudo desta dissertação aborda a análise de séries temporais com uma única função temporal, ou seja,  $t$  variável e  $\omega$  fixo. Para que se especifique devidamente um processo estocástico  $Z = Z(t), t \in T$ , sendo  $t_1, t_2, \dots, t_n$  elementos quaisquer de  $T$ , deve-se conhecer todas as suas distribuições finito-dimensionais, sendo  $n \geq 1$ . Esse conjunto de distribuições é representado pela equação 3.11.

$$F_{z_1, \dots, z_n}(Z_1, \dots, Z_n; t_1, \dots, t_n) = P[Z(t_1) \leq z_1, \dots, Z(t_n) \leq z_n] \quad (3.11)$$

Quando  $n = 1$ , deve-se conhecer a distribuição unidimensional da variável aleatória; em  $n = 2$ , deve-se conhecer a distribuição bidimensional, e assim, sequencialmente até infinito (MORETTIN; TOLOI, 2004). As funções de distribuição de probabilidades devem obedecer a duas condições: a de simetria e a de compatibilidade.

A condição de simetria estabelece que para quaisquer permutações dos índices do processo estocástico, a FAP é a mesma, conforme mostra a equação 3.12:

$$F(z_{j_1}, \dots, z_{j_n}; t_{j_1}, \dots, t_{j_n}) = F(z_1, \dots, z_n; t_1, \dots, t_n) \quad (3.12)$$

A condição de compatibilidade mostra que mesmo com um número maior de amostras, a distribuição de probabilidades se mantém – considerando  $n > m$ .

$$F(z_1, \dots, z_m, +\infty; t_1, \dots, t_m, t_{m+1}, \dots, t_n) = F(z_1, \dots, z_n; t_1, \dots, t_n) \quad (3.13)$$

Para cada  $t \in T$ , há uma FAP para a variável aleatória  $Z(t)$ , que não necessariamente é a mesma para cada instante de tempo. Utiliza-se os momentos de baixa ordem – de primeira, representado pela equação 3.14, e o de segunda, representado pela equação 3.15 – para obtenção dos parâmetros relevantes para a determinação do comportamento da FAP.

$$\mu_t = E[z_t] = \int_{-\infty}^{\infty} z f_z(z; t) dz, t \in T \quad (3.14)$$

$$\sigma_{z_t}^2 = E[(z_t - \mu_t)^2] = VAR[Z_t] = \int_{-\infty}^{\infty} (z - \mu) f_z(z; t) dz, t \in T \quad (3.15)$$

Sendo:

$E[Z_t]$  = momento central de primeira ordem em relação à origem

$VAR[Z_t]$  = momento central de segunda ordem

$f_z(z : t)$  = FDP correspondente a equação 3.11

A autocovariância, ou função de autocovariância (FACV), do processo é dada pela equação 3.16:

$$\gamma(t_1, t_2) = COV[Z_{t_1}, Z_{t_2}] = E[Z_{t_1}, Z_{t_2}] - E[Z_{t_1}]E[Z_{t_2}], t_1, t_2 \in T \quad (3.16)$$

No caso particular de  $t_1 = t_2 = t$  obtém-se a equação 3.17. Para cada  $t$  temos uma variável aleatória  $Z_t$ , cuja média é  $\mu$  e variância é  $\sigma^2$ . Vale ressaltar que a função  $\mu_t$  é a união de todas as médias para todo  $t \in T$  (MORETTIN; TOLOI, 2004).

$$\gamma(t, t) = VAR[Z_t, Z_t] = E[Z_t^2] - E^2[Z_t] \quad (3.17)$$

Devido à impossibilidade de se conhecer todas as funções de distribuição de todas as realizações, utiliza-se a distribuição de probabilidades marginais e seus momentos estatísticos amostrais. Os estimadores que representam esses momentos estatísticos são dados pela média ( $\hat{\mu}$ ) e pela variância ( $\hat{\sigma}_z^2$ ) e também pela covariância ( $\hat{\gamma}$ ), obtidas pelas equações 3.18, 3.19, 3.20. As variáveis  $n$  e  $k$  representam, respectivamente o número de elementos da série analisada e o *lag*, ou defasagem, temporal entre os elementos (DETZEL, 2015).

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Z_t \quad (3.18)$$

$$\sigma_z^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Z_t - \hat{\mu})^2 \quad (3.19)$$

$$\hat{\gamma}_k = E[Z_t Z_{t+k}] - E[Z_t]E[Z_{t+k}] \quad (3.20)$$

Para a escolha do modelo estocástico, a FAC e a FACP (Função de Autocorrelação Parcial) são fundamentais. A primeira é uma relação entre a covariância da série  $Z(t + \tau)$  e sua variância, conforme mostra a equação 3.21. A segunda, por sua vez, é a relação entre os determinantes da matriz de autocorrelações da série com a última coluna composta pelo vetor de autocorrelações e a própria matriz de autocorrelações, conforme mostra a equação 3.22 (MORETTIN; TOLOI, 2004).

$$\rho = \frac{\gamma_\tau}{\gamma_0} \quad (3.21)$$

$$\phi_{kk} = \frac{|\mathbf{P}^*_k|}{|P_k|} \quad (3.22)$$

### 3.3.2 Processo Estocástico Estacionário

Um processo estocástico é dito estacionário se, dado um  $\tau \in T$ , as características de  $Z_t$  são as mesmas de  $Z_{t+\tau}$ , ou seja, a escolha da origem dos tempos não interessa. Há dois tipos de estacionariedade: a fraca (ampla, ou de segunda ordem) e a estrita (ou forte). A primeira ocorre quando são obedecidas as seguintes condições:

1.  $E[Z(t)] = \mu(t) = \mu$ , para todo  $t \in T$
2.  $E[Z^2(t)] < \infty$ , para  $t \in T$
3.  $\gamma(t_1, t_2) = COV[Z(t_1), Z(t_2)]$  é uma função de  $|t_1 - t_2|$

Já a segunda ocorre quando todas as distribuições finito-dimensionais são invariáveis para quaisquer valores de  $t_1, t_2, \dots, t_n$  pertencentes a  $T$ . Logo,  $\mu(t) = \mu$  e a variância  $V(t) = \sigma^2$  (MORETTIN; TOLOI, 2004).

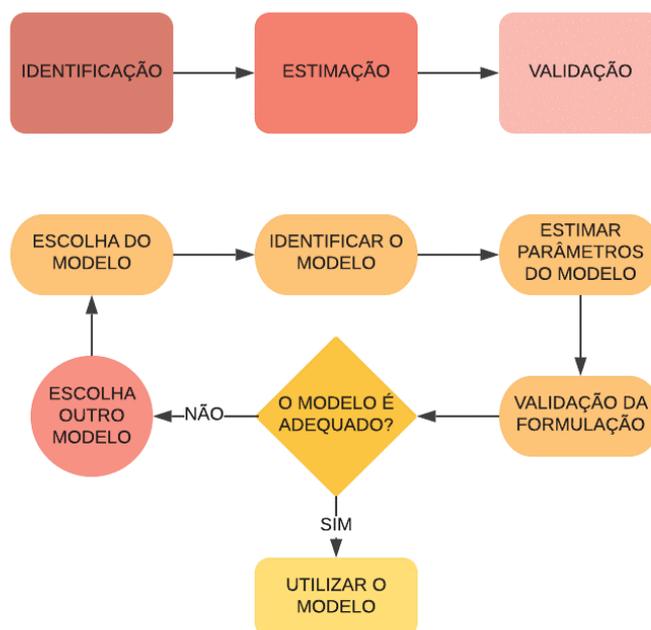
### 3.3.3 Modelo Box e Jenkins

Os modelos de séries temporais são divididos em duas partes basicamente: paramétricos e não-paramétricos. A principal diferença entre ambos é que o primeiro possui um número finito de parâmetros enquanto o outro não. Nesta dissertação, serão abordados apenas modelos paramétricos. Dentre esses, os mais comuns são os modelos autorregressivos integrados de médias móveis, ou simplesmente ARIMA. Esses modelos permitem também o uso de porções somente autorregressivas (AR) ou de médias móveis (MA) (MORETTIN; TOLOI, 2004).

Box e Jenkins e Reinsel (2008) apresentam duas categorias de modelos: os modelos lineares estacionários – ARMA(p,q) – e os modelos lineares não estacionários

– ARIMA (p, q, r). Nesta dissertação são abordados os modelos estacionários de forma mais detalhada. A figura 9 mostra um fluxograma para a escolha do modelo.

FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DA ESCOLHA DO MODELO



FONTE: Adaptado de BOX, JENKINS e REINSEL (2008)

Nos modelos lineares estacionários, o processo linear generalizado pode ser descrito como o resultado de uma soma ponderada dos valores do ruído branco  $a_t$  (uma sequência de variáveis aleatórias i.i.d) ao longo do tempo por um filtro linear  $\psi$ , conforme mostra a figura 10.

FIGURA 10 – MODELO LINEAR ESTACIONÁRIO



FONTE: Adaptado de MORETTIN e TOLOI (2004)

A definição formal é mostrada pela equação 3.23.

$$Z_t = \mu + a_t + \psi_1 a_{t-1} + \psi_2 a_{t-2} + \dots = \mu + \psi(B)a_t \quad (3.23)$$

Sendo  $B$  operador translação para o passado definido por:

$$BZ_t = Z_{t-1} \quad (3.24)$$

Sendo que:

$$\psi(B) = 1 + \psi_1 B + \psi_2 B^2 + \dots \quad (3.25)$$

Logo  $\psi(B)$  é uma função de transferência e  $\mu$  a média da série. Para simplificar as notações considera-se que:

$$\tilde{Z}_t = Z_t - \mu \quad (3.26)$$

Um das condições necessárias para que o processo  $Z_t$  seja estacionário é a que  $\sum_{k=0}^{\infty} |\psi_k| < \infty$ , ou seja, o filtro linear deve ser somável. A partir da definição formal tem-se:

$$E(Z_t) = \mu + E\left(a_t + \sum_{j=1}^{\infty} \psi_j a_{t-j}\right) \quad (3.27)$$

Como  $E(a_t) = 0$ , caso  $\sum_{j=1}^{\infty} \psi_j a_{t-j}$  convirja, o  $E(Z_t) = \mu$ . Alternativamente,  $\tilde{Z}_t$  pode ser escrito pela equação 3.28.

$$\tilde{Z}_t = \pi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \pi_2 \tilde{Z}_{t-2} + \dots + a_t = \sum_{j=1}^{\infty} \pi_j \tilde{Z}_{t-j} + a_t \quad (3.28)$$

e

$$\left(1 - \sum_{j=1}^{\infty} \pi_j B^j\right) \tilde{Z}_t = a_t \quad (3.29)$$

ou da seguinte forma:

$$\pi(B) \tilde{Z}_t = a_t \quad (3.30)$$

e

$$\pi(B) = 1 - \pi_1 B - \pi_2 B^2 - \dots \quad (3.31)$$

e

$$\pi(B) \psi(B) a_t = a_t \quad (3.32)$$

e

$$\pi(B) = \psi^{-1}(B) \quad (3.33)$$

a) Modelo AR

O modelo AR de ordem  $p$  possui como principais componentes a própria série analisada e sua autocorrelação e também a série de resíduos. Quando  $\pi_j = 0$  e  $j > p$ , obtêm-se AR( $p$ ), que é representado pela equação 3.34, na qual o  $\pi_j$  da equação 3.28 foi renomeado para  $\phi_j$ .

$$\tilde{Z}_t = \phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \phi_2 \tilde{Z}_{t-2} + \dots + \phi_p \tilde{Z}_{t-p} + a_t \quad (3.34)$$

A equação 3.35 é a representação do modelo AR( $p$ ) com o operador  $B$ , trocando-se  $\pi$  por  $\phi$  da equação 3.30:

$$\phi(B)\tilde{Z}_t = a_t \quad (3.35)$$

No caso particular AR(1):

$$\tilde{Z}_t = \phi \tilde{Z}_{t-1} + a_t \quad (3.36)$$

Sendo:

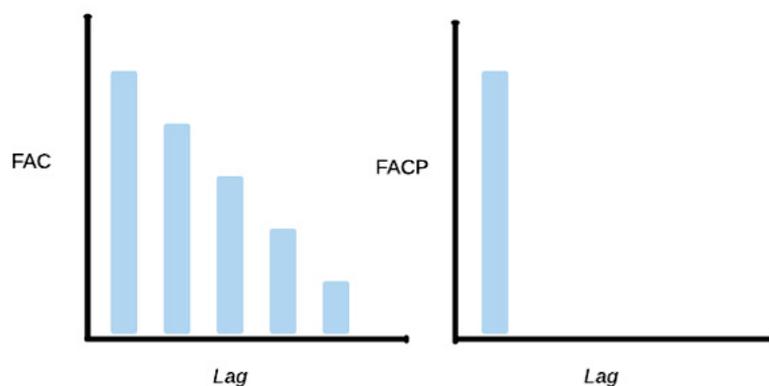
$$\tilde{Z}_t = a_t - \phi a_{t-1} + \phi^2 a_{t-2} + \dots = \sum_{j=0}^{\infty} \phi^j a_{t-j} \quad (3.37)$$

Logo:

$$\tilde{Z}_t = \psi(B)a_t = (1 + \phi B + \phi^2 B^2 + \dots)a_t \quad (3.38)$$

A condição para o modelo ser estacionário é que as raízes de  $\pi(B) = 0$  estejam fora do círculo unitário. A figura 11 mostra o comportamento da FAC e da FACP para um modelo AR(1).

FIGURA 11 – MODELO AR(1)



FONTE: Adaptado de BOX, JENKINS e REINSEL (2008)

#### b) Modelo MA

O modelo de médias móveis é útil para verificar o comportamento da série temporal e identificação de possíveis tendências. Nesse modelo, os parâmetros relevantes são a série de resíduos e sua correlação, e  $\mu$  é o valor esperado do processo estocástico. O modelo é formalmente descrito pela equação 3.39.

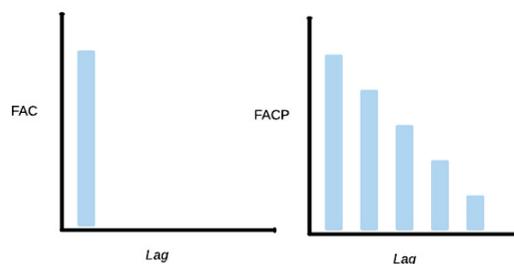
$$Z_t = \mu + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (3.39)$$

Considerando que:

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q \quad (3.40)$$

O  $\theta(B)$  é o operador de médias móveis de ordem  $q$  do modelo MA. Não há restrições quanto a condição de estacionariedade nesse modelo; a única condição necessária é a de invertibilidade, que é obedecida quando as raízes de  $\psi(B) = 0$  estão fora do círculo unitário. A figura 12 mostra o comportamento da FAC e da FACP de um modelo MA(1).

FIGURA 12 – MODELO MA(1)



FONTE: Adaptado de BOX, JENKINS e REINSEL (2008)

### c) Modelo ARMA

A combinação de um modelo de médias móveis com um autorregressivo existe com objetivo de possuir um modelo com um número não tão grande de parâmetros (princípio da parcimônia) e não perder uma das características importantes do modelo AR, a autocorrelação. É possível observar que esse modelo é composto por valores defasados das componentes dos modelos autorregressivo e de médias móveis. A definição formal do processo é dada pela equação 3.41 (MORETTIN; TOLOI, 2004).

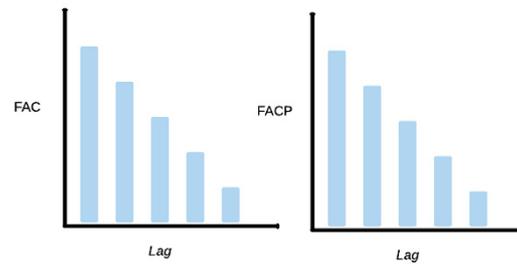
$$\tilde{Z}_t = \phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \phi_2 \tilde{Z}_{t-2} + \dots + \phi_p \tilde{Z}_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (3.41)$$

Ou

$$\phi(B)\tilde{Z}_t = \theta(B)a_t \quad (3.42)$$

Na equação 3.42 o  $\phi(B)$  representa o operador autorregressivo e o  $\theta(B)$  o operador de médias móveis. Acerca da invertibilidade e da estacionariedade do processo, as premissas são similares às dos modelos AR(p) e MA(q). O processo é invertível e estacionário se as raízes de  $\phi(B) = 0$  e  $\theta(B)$  estiverem fora do círculo unitário. O comportamento da FAC e da FACP de um modelo ARMA(1,1) são descritos na figura 13.

FIGURA 13 – MODELO ARMA(1,1)



FONTE: Adaptado de BOX, JENKINS e REINSEL (2008)

A escolha dos modelos pode se basear também nos valores do AICC, Critério de Informação de Akaike Corrigido (SALAS et al., 1980), e BIC, Critério de Informação Bayesiano (SCHWARTZ, 1978), dos modelos. Aqueles que apresentarem os menores valores para esses dois critérios é considerado o melhor ajuste.

Após a escolha do modelo estocástico utilizado para modelar a série temporal, deve-se realizar uma análise dos resíduos, verificando sua normalidade, homoscedasticidade e independência. A série é considerada homoscedástica quando sua variância é constante e independente quando os valores observados na amostra não dependem do valor que os precedeu. Para isso, são utilizados respectivamente os testes de Anderson-Darling e/ou Kolmogorov-Smirnov e/ou Shapiro-Wilk, Levene (BROWN; FORSYTHE, 1974), equação 3.43, e Portmanteau (LI; MCLEOD, 1981), equação 3.44, por exemplo.

$$W_0 = \frac{\sum_{i=1}^g (a_i - \bar{a})^2 / (g - 1)}{\sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{n_i} (a_{ij} - \bar{a}_i)^2 / \sum_{i=1}^g (n_i - 1)} \quad (3.43)$$

Sendo:

$g$  – o número de grupos

$n_i$  – o número de elementos em cada grupo

$\bar{a}$  – média de  $a$

$\bar{a}_i$  – média do grupo  $i$

$a_{ji} - |Z_{ij} - \tilde{Z}_i|$  sendo  $\tilde{Z}_i$  a mediana do grupo  $i$

$W_0$  – estatística do teste

$Z_{ij}$  – valor medido da variável para o  $j$ -ésimo caso do  $i$ -ésimo grupo

Para o teste de Levene, há rejeição da hipótese nula caso o valor  $W_0$  seja superior a  $F_{\alpha, (g-1), n-g}$ , sendo  $F$  a distribuição Fisher-Snedecor para um determinado

nível de significância.

$$Q = n \sum_{k=1}^K p_k^2(\hat{a}) + \frac{K(K+1)}{2n} \quad (3.44)$$

Sendo:

$p_k$  – autocorrelação da série de resíduos  $a$

$n$  – tamanho da amostra

$K$  – número máximo de *lags* sem exceder  $n/4$

$Q$  – estatística do teste

Para o teste de Portmanteau, há rejeição da hipótese nula caso o valor  $Q$  seja superior à  $\chi_{1-\alpha, h}^2$  (distribuição qui-quadrado, sendo  $h$  o número de *lags* testados).

### 3.4 RESUMO DA SEÇÃO

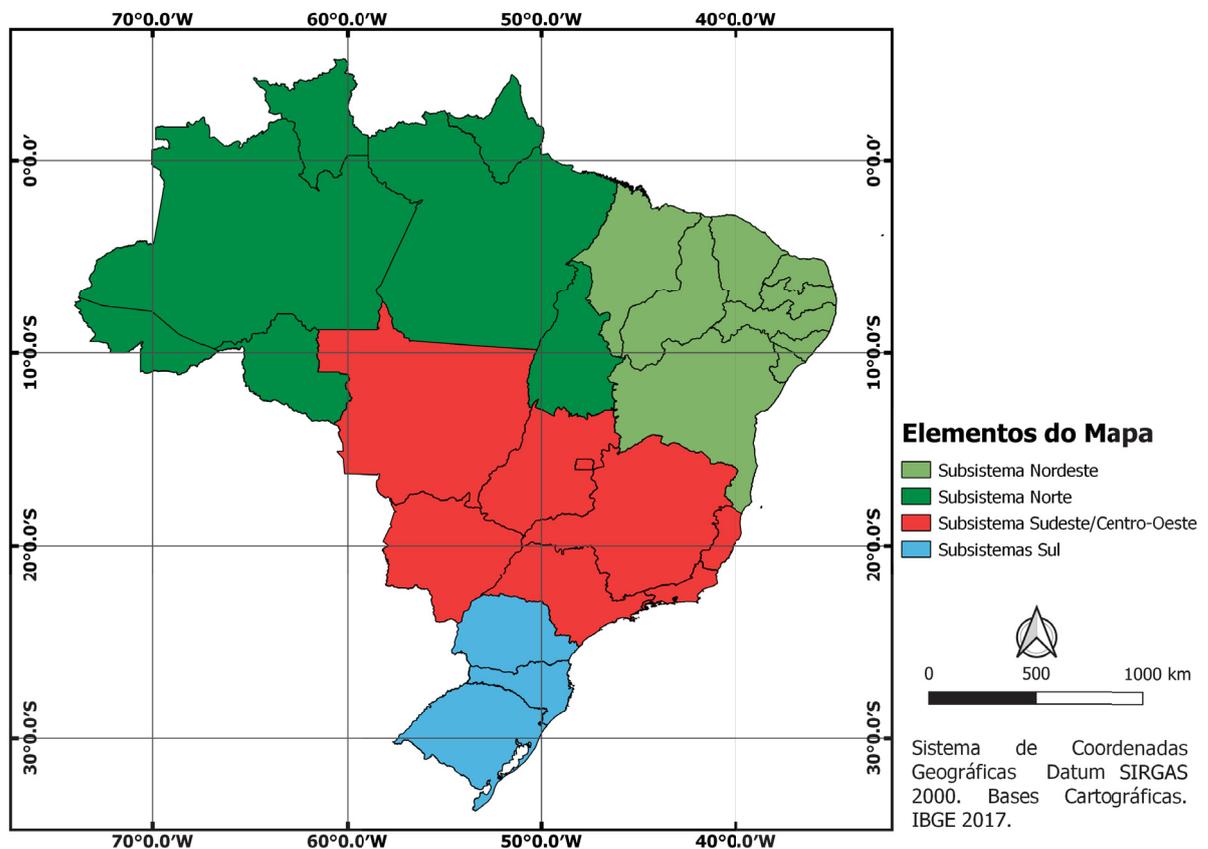
Esta seção apresenta a fundamentação teórica da dissertação, abrangendo conteúdos relevantes para facilitar o entendimento dos modelos Box e Jenkins, que são utilizados neste estudo. Além disso, explica os requisitos fundamentais para a aplicação desses modelos, desde a condição de normalidade até a existência, ou não, de comportamento não estacionário nas séries de vazões, mostrando formas de identificar ambas.

Essas condições citadas acima são essenciais para interpretar os resultados das curvas de regularização, explicadas na seção 2. Graças ao arcabouço teórico aqui apresentado, foi possível fazer uma análise mais precisa e clara da influência da não estacionariedade nas séries de vazões de reservatórios brasileiros.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta dissertação são, inicialmente, analisados os quatro subsistemas pertencentes ao SIN, subsistemas Sul, Sudeste/Centro-oeste, Norte e Nordeste, por meio da Energia Natural Afluente (ENA) de cada um; dessa forma, é possível visualizar, de uma forma mais ampla, como estão suas capacidades de regularização. A definição do conceito de ENA é apresentada no item 4.5. A figura 14 mostra um mapa com a localização de cada subsistema.

FIGURA 14 – MAPA SUBSISTEMAS BRASILEIROS



Para analisar mais detalhadamente cada subsistema, são selecionados reservatórios em diferentes regiões do Brasil. Em seguida, são levantadas as informações pertinentes à vazão para a qual cada reservatório foi dimensionado e se houve alguma mudança em seu índice de regularização desde a época em que foi construído até hoje. Além disso, é verificado se houve ou não alteração no período crítico da série de vazões. Atualmente, utiliza-se o período crítico de junho de 1949 a novembro de 1956 (ONS, 2008), mas não necessariamente esse período se verifica para as diferentes localidades no Brasil. Isso acarreta problemas consideráveis para o Nordeste, por

exemplo, que apresenta uma tendência de decréscimo nas séries de vazões pelo provável comportamento não estacionário dessas (DETZEL; MARTINI et al., 2019). Com a diminuição nas vazões médias de longo termo, os reservatórios na região nordeste deveriam apresentar um aumento em seus índices de regularização, entretanto, o que ocorreu foi o contrário. Uma das possíveis causas disso é a mudança do período crítico, visto que o período de 6 anos (2011 a 2017) aparenta ser o novo período crítico do Nordeste (ONS, 2019).

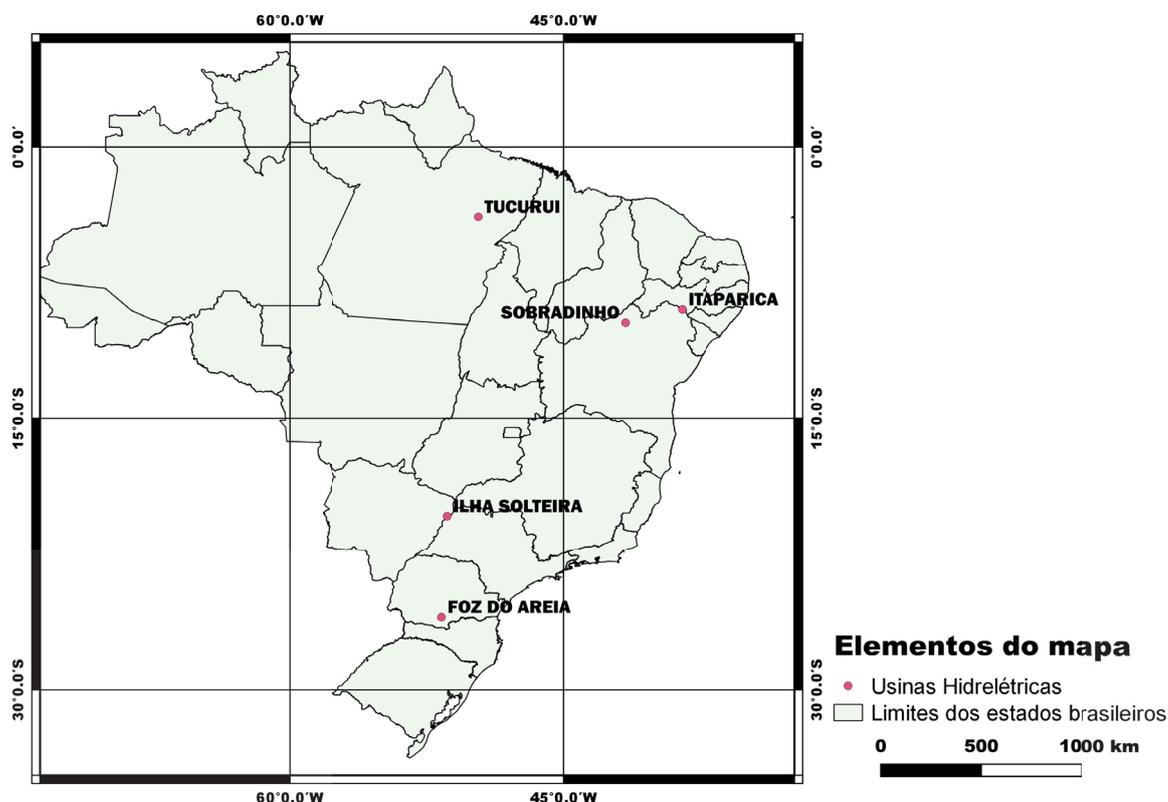
São utilizadas as seguintes usinas hidrelétricas com capacidade de regularização como estudo de caso: Foz do Areia (Gov. Bento Munhoz), na cabeceira do rio Iguaçu, Paraná; Sobradinho, no rio São Francisco, Bahia; Ilha Solteira, no Rio Paraná, São Paulo; Tucuruí, no rio Tocantins, Pará, e Itaparica (Luiz Gonzaga), no rio São Francisco, em Pernambuco. Dessa forma foi possível abranger, ainda que de forma simplificada, os subsistemas Nordeste, Norte, Sudeste/Centro-Oeste e Sul, que compõem o SIN.

As características principais de cada uma delas está apresentada na tabela 3 e a localização das usinas está apresentada na figura 15.

TABELA 3 – USINAS SELECIONADAS

Usinas	Rio	Operação	Operadora	Potência Instalada	Volume útil do Reservatório
<b>Foz do Areia</b>	Iguaçu	1981	COPEL	1676 MW	3805 hm <sup>3</sup>
<b>Ilha Solteira</b>	Paraná	1973	CESP	3444 MW	12828 hm <sup>3</sup>
<b>Itaparica</b>	São Francisco	1988	CHESF	1480 MW	7234 hm <sup>3</sup>
<b>Sobradinho</b>	São Francisco	1979	CHESF	1050 MW	28669 hm <sup>3</sup>
<b>Tucuruí</b>	Tocantins	1984	ELETRONORTE	8730 MW	11293 hm <sup>3</sup>

FIGURA 15 – LOCALIZAÇÃO USINAS HIDRELÉTRICAS



#### 4.1 TESTES DE HIPÓTESE

Foram aplicados os testes de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) e Pettitt (PETTITT, 1979), com um nível de significância de  $\alpha = 5\%$ . Entretanto, antes da aplicação desses testes foi aplicado um teste de significância da autocorrelação, a fim de verificar se a autocorrelação é pequena a ponto de não influenciar na identificação (ou não) de uma tendência. A hipótese nula a ser testada é de que as séries de vazões são estacionárias e que quaisquer oscilações nos parâmetros estatísticos são flutuações naturais da amostra. MARTINI FILHO (2019) aplicou esses testes para reservatórios de usinas hidrelétricas também; porém somente para as usinas localizadas no Rio Iguaçu. Caso haja uma autocorrelação significativa na série analisada, deve-se aplicar o procedimento de *pre-whitening* para posterior aplicação dos testes de hipótese.

##### 4.1.1 Pre-whitening

A técnica do *pre-whitening* tem o objetivo de eliminar a persistência dentro dos dados de uma amostra. Supõe-se que para uma determinada série cuja autocorrelação

$\rho$  é inferior a 0,1 seja esperado um risco de 5% de rejeição da hipótese nula, quando esta na realidade é verdadeira. Após aplicar um teste estatístico de Mann Kendall, por exemplo, verifica-se que não há nenhuma tendência, ou seja, dentro de um conjunto com 1.000 séries espera-se que 50 destas rejeitem a hipótese nula. Contudo, na medida que se aumenta a correlação entre os dados, o percentual de rejeição também aumenta. Com o *pre-whitening*, diminui-se o percentual de rejeição até o valor esperado (5%), mesmo com o aumento da autocorrelação (STORCH; NAVARRA, 1999). O teste aplicado previamente na série para verificar se a autocorrelação é significativa está expresso na equação 4.1; a equação 4.2, por sua vez, mostra o processo de *pre-whitening*.

$$t_0 = \frac{\rho\sqrt{n-2}}{1-\rho^2} \quad (4.1)$$

Sendo:

$t_0$  – estatística do teste que deve ser maior que  $t_{\alpha/2,(n-2)}$  (obtido da distribuição t-Student com significância igual a  $\alpha$ )

$n$  – tamanho da amostra

$\rho$  – autocorrelação da série com *lag* igual a 1

$$X_t = Z_t - \rho X_{t-1} \quad (4.2)$$

Sendo:

$X_t$  – série após *pre-whitening*

$Z_t$  – série original

É importante salientar que a dependência temporal pode aumentar a chance de identificar uma tendência quando, na realidade, ela não existe. Isso ocorre devido à presença da persistência que tende a produzir valores similares de um tempo “ $t$ ” para o tempo “ $t + 1$ ” fazendo com que haja uma sequência desses valores abaixo, ou acima, da média, que podem ser considerados uma suposta tendência de aumento ou decréscimo na série finita observada (FLEMING; WEBER, 2012).

#### 4.1.2 Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall é um teste não paramétrico realizado sobre a amostra completa. Esse teste pressupõe a independência entre os elementos da amostra e a equiprobabilidade de ocorrência desses elementos. Consiste na fixação de um valor da amostra (uma vazão anual, por exemplo) e sua posterior comparação com os demais valores da amostra (as vazões anuais restantes). Caso esse valor fixado seja maior,

atribui-se o valor “1” para o “sinal”; caso seja menor atribui-se “-1” para o “sinal” e caso seja igual a zero, o “sinal” também é zero. Após isso, calcula-se a variância da estatística do teste e compara-se com a variável normal padrão ( $Z_{\alpha/2}$ ) para um nível de significância  $\alpha$ . Rejeita-se a hipótese nula caso a estatística do teste seja maior que  $Z_{\alpha/2}$ . Para o cálculo desse teste de hipótese são utilizadas as equações 4.3, 4.4, 4.5, 4.6.

$$MK = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}[z_j - z_i] \quad (4.3)$$

$$\text{sgn}[z_j - z_i] = \begin{cases} 1, & \text{se } \text{sgn}[z_j - z_i] > 0 \\ 0, & \text{se } \text{sgn}[z_j - z_i] = 0 \\ -1, & \text{se } \text{sgn}[z_j - z_i] < 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\text{VAR}[MK] = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4.5)$$

$$z = \begin{cases} \frac{MK-1}{\sqrt{\text{VAR}[MK]}}, & \text{se } MK > 0 \\ 0, & \text{se } MK = 0 \\ \frac{MK-1}{\sqrt{\text{VAR}[MK]}}, & \text{se } MK < 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

A estatística do teste é dada pela equação 4.6.

#### 4.1.3 Teste de Pettitt

O teste de Pettitt é realizado de modo a encontrar, ou não, um ponto de quebra que indique a partir de qual momento a amostra passa a apresentar um comportamento distinto – no caso um ponto de mudança. O cálculo de sua estatística se assemelha ao de Mann-Kendall, conforme pode ser verificado nas equações 4.7 e 4.8.

$$PT(\tau) = \sum_{i=1}^{\tau} \sum_{j=\tau+1}^n \text{sgn}[z_j - z_i] \quad (4.7)$$

$$\text{sgn}[z_j - z_i] = \begin{cases} 1, & \text{se } \text{sgn}[z_j - z_i] > 0 \\ 0, & \text{se } \text{sgn}[z_j - z_i] = 0 \\ -1, & \text{se } \text{sgn}[z_j - z_i] < 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

$$PT = \max |PT(\tau)|, 1 \leq \tau \leq n \quad (4.9)$$

A estatística do teste é dada pela equação 4.9.

Já o nível de significância da estatística do teste de Pettitt é aproximadamente fornecido pela equação 4.10. Caso o valor de  $\alpha_o$  seja superior ao nível de confiança  $\alpha$  estabelecido previamente, não há rejeição da hipótese nula.

$$\alpha_o = \exp\left(\frac{-6PT^2}{n^3 + n^2}\right) \quad (4.10)$$

## 4.2 CORREÇÃO DA NÃO ESTACIONARIEDADE

O comportamento não estacionário das séries hidrológicas pode levar à utilização de modelos mais complexos, que demandam mais cálculos e utilizam mais parâmetros, como um modelo ARIMA, por exemplo (DETZEL; BESSA et al., 2011). MINE et al. (2009) propuseram um método simples, porém robusto, para a correção do comportamento não estacionário das séries; após essa correção, modelos mais parcimoniosos como um AR, ou ARMA, podem ser aplicados às séries. A correção consiste no cumprimento dos seguintes processos:

- a) acumulam-se vazões da série hidrológica em função do tempo;
- b) ajusta-se uma RLS para a série acumulada até o ponto identificado como o ponto de quebra da série e outra para a série subsequente.
- c) Obtêm-se os coeficientes angulares das respectivas séries ( $c_1$  para a série antes da quebra e  $c_2$  para a após a quebra, por exemplo), e multiplica-se a série acumulada anterior à quebra pela razão dos coeficientes angulares ( $c_1/c_2$ ).

Dessa forma, a série é corrigida e, após a verificação da estacionariedade por meio de testes estatísticos, pode-se aplicar modelos estocásticos estacionários a fim de reproduzir o comportamento da série.

Entretanto, deve-se tomar cuidado especial com a geração de séries sintéticas após a correção da tendência. DETZEL e MINE (2015) alertam para a alteração que o coeficiente de assimetria pode sofrer devido à modelagem da série corrigida por meio de um modelo estocástico estacionário. Nesse estudo foi utilizado o estimador paramétrico de Sen (SEN, 1968). Os resultados obtidos mostraram que os coeficientes de assimetria de todas as estações foram subestimados; os deficits, por outro lado, foram superestimados. Por esse motivo, foi escolhido o método de curvas acumuladas, descrito no começo desta seção.

## 4.3 ANÁLISE DA CURVA DE REGULARIZAÇÃO

Para a análise dos subsistemas, são elaboradas curvas de regularização utilizando a energia natural afluyente, uma para cada subsistema, e compara-se as curvas originais com as curvas geradas a partir de séries sintéticas, conforme é

explicado no item 4.6. A partir dessa comparação é possível observar qual o risco de falha associado às curvas originais e, assim, analisar a segurança de cada subsistema em atender a diferentes demandas energéticas.

Na análise das curvas de regularização dos reservatórios que são estudados, é identificado o índice de regularização para o qual o reservatório foi dimensionado, – com a série de vazões restrita até a data de operação do reservatório – e compara-se com seu atual índice de regularização – com a série de vazões atualizada, como se o reservatório fosse ser construído hoje. Em todas as usinas realiza-se o cálculo de três curvas de regularização diferentes: uma referente à curva original do reservatório (até o início da operação); outra à curva com a série histórica completa e outra com a curva a partir do ponto de quebra identificado no teste de Pettitt (mesmo que a hipótese nula não seja rejeitada). Na sequência, assim como na análise da regularização dos subsistemas, são geradas séries sintéticas para as séries de vazões de cada reservatório e curvas de regularização a partir dessas séries. Dessa forma, é possível, a partir da comparação das curvas, calcular o risco de falha de cada reservatório.

#### 4.4 CÁLCULO DO DEFICIT ACUMULADO

Em cada ponto da curva de regularização é necessário calcular o volume do reservatório e a ENA armazenada, no caso dos subsistemas. Para isso, é utilizado o método da Análise Sequencial de Picos (VOGEL; STEDINGER, 1987) com a curva de massa censurada, ou seja, com o limite inferior (reservatório cheio) sendo zero, conforme mostra a equação 2.1. São calculados os máximos deficits para diferentes índices de regularização – variando de 0 a 100% – e construídas, assim, as três curvas para cada reservatório. No caso dos subsistemas o procedimento é o mesmo, porém o máximo deficit acumulado é dado em MW médio e não em m<sup>3</sup>.

#### 4.5 DETERMINAÇÃO DO PERÍODO CRÍTICO

O período crítico é o período mais seco observado dentro de todo registro de vazões, sendo utilizado para o cálculo da energia firme das UHE's e PCH's (DETZEL; MARTINI et al., 2019). Uma das formas de calcular o período crítico é por meio do tradicional Método da Energia Natural Afluente (FILL, 1980). O princípio desse método é a substituição de um sistema gerador com várias usinas interligadas por um sistema com uma única usina equivalente, transformando todas as afluições em unidades de energia, o MW médio, por exemplo. O objetivo desse método é simular a operação do sistema elétrico brasileiro de forma mais simplificada (CANAMBRA, 1969). Nesta dissertação, o método não foi utilizado para calcular a ENA do sistema elétrico como um todo, mas sim de cada subsistema.

As vazões naturais e a capacidade de regularização são componentes fundamentais para a simulação de um sistema elétrico. As vazões e o volume útil do reservatório são passíveis de serem convertidos em unidades de energia, conforme mostram as equações 4.11 e 4.13. Para se obter a capacidade de armazenamento máximo, deve-se considerar também o armazenamento à jusante, responsável por formar um “reservatório de energia”, que é utilizado para regularizar a demanda de energia do sistema em análise (FILL, 1979; NEIRA, 2005).

$$EN A_t = \sum_{u=1}^U \frac{(gh_u \eta_u)}{1000} Q_{u,t} \quad (4.11)$$

Sendo:

$h_u$  – altura líquida da usina  $u$

$\eta_u$  – rendimento do conjunto turbina gerador da usina  $u$

$Q_{u,t}$  – vazão natural afluyente à usina  $u$  no tempo  $t$

$U$  – conjunto de usinas do sistema

$g$  – aceleração da gravidade

E o armazenamento máximo é dado pela equação 4.12

$$A_{max} = \sum_{r=1}^R \frac{V_r}{2628} \left( \sum_{u=1}^U \frac{gh_u \eta_u}{1000} \right) \quad (4.12)$$

ou pela equação 4.13:

$$A_{max} = \sum_{r=1}^R \frac{V_r}{2628} \left( \sum_{u=1}^U K_u \right) \quad (4.13)$$

Sendo:

$A_{max}$  – armazenamento máximo do sistema (em MW médio)

$V_r$  – volume útil do reservatório (em Hm<sup>3</sup>)

$K_u$  – produtividade da usina  $u$  (em MW/m<sup>3</sup>/s)

$R$  – número de reservatórios do sistema

O armazenamento ao longo do tempo é calculado pela equação 4.14, que é utilizada para o cálculo do período crítico também. Caso o armazenamento mínimo ainda não atinja zero, deve-se recalculá-lo por um processo iterativo variando a energia firme, calculada pela equação 4.15. Vale ressaltar que na primeira iteração a energia firme é igual a média da energia natural afluyente da série. Quando o

armazenamento mínimo atinge zero, o valor de “ $m$ ” representa o período crítico que é o período entre o máximo armazenamento possível até o valor mínimo (zero).

$$A_t = \min \left\{ \begin{array}{l} A_{max} \\ A_{t-1} + ENA_t + E_f \end{array} \right. \quad (4.14)$$

Sendo:

$A_t$  – armazenamento do sistema no tempo  $t$

$ENA_t$  – energia natural afluyente no tempo  $t$

$E_f$  – energia firme

$$E_f = E_f - \frac{A_{min}}{m} \quad (4.15)$$

A vazão utilizada deve ser a vazão natural do rio, ou seja, a vazão caso não houvesse ação antrópica na região, seja por barramentos à montante, seja pelo desvio da água para irrigação ou para consumo (NEIRA, 2005; PESSOA, 2013). Durante a simulação de operação do sistema, a energia natural no período  $t$  é comparada com a demanda por energia desse mesmo período e a partir daí toma-se a decisão de encher o reservatório ou deplecioná-lo. Além disso, outra simplificação do método é que as prioridades de armazenamento dos reservatórios, bem como as restrições operativas, são ignoradas, pois admite-se que o método é flexível o bastante para utilizar o armazenamento para a geração de energia (NEIRA, 2005).

No caso das usinas a fio de água, considera-se a altura líquida como à equivalente ao reservatório cheio. Além disso, a energia natural é truncada no valor máximo de geração da usina (DETZEL, 2015).

Apesar das simplificações propostas pelo método serem significativamente consideráveis, os resultados segundo FILL (1980) não apresentam diferenças superiores a 5% em relação às modelagens com usinas individualizadas.

#### 4.6 GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS

A fim de se obter o risco associado à operação dos subsistemas e dos reservatórios, são geradas 1.000 séries sintéticas de vazões anuais por meio do programa SAMs. Esse programa foi desenvolvido pela Colorado State University e pelo U.S. Bureau of Reclamation, em Denver; o programa tem como funções a modelagem hidrológica, análise estocástica e simulações envolvendo séries hidrológicas. Dessa forma é possível calcular o tempo de recorrência associado a cada curva de regularização de cada uma das séries. Vale ressaltar que as séries sintéticas não criam informações, apenas são outras possíveis realizações de um processo estocástico (GOMIDE, 1986).

São utilizados dois modelos estocásticos estacionários para a geração das séries sintéticas: o AR(1) e o ARMA(1,1). Além disso, os dados foram normalizados antes da aplicação do modelo. Esse processo de normalização consiste em utilizar a série de vazões subtraindo-se dela a média e dividindo-se esse valor pelo desvio padrão.

Posteriormente ao cálculo do máximo deficit acumulado de cada série e elaboração das curvas de regularização, adotou-se tempos de recorrência. A partir desses valores, é possível calcular a probabilidade de falha associada a cada um desses tempos de recorrência escolhidos, dado uma determinada vida útil do projeto (foi adotado 50 anos nesta dissertação), como mostra a equação 4.16 .

$$Risco = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^{50} \quad (4.16)$$

## 5 RESULTADOS

Este item apresenta os resultados desta dissertação, abordando os resultados dos testes estatísticos; as curvas de regularização das séries originais e das séries sintéticas, tanto para as séries de vazões de cada usina quanto para as séries de energia natural afluyente de cada subsistema; a validação dos modelos utilizados para a geração das séries sintéticas e uma avaliação do risco de operação dos reservatórios.

### 5.1 NÃO ESTACIONARIEDADE

Antes de avaliar as usinas individualmente, são analisados os quatro subsistemas a partir do cálculo da energia natural afluyente total de cada um. A partir dessa avaliação, é possível verificar antecipadamente se há ou não um possível comportamento não estacionário nos reservatórios. Utilizou-se, então, dados de vazão média anual fornecidos pelo ONS para o cálculo das ENAs, computando todas as usinas e reservatórios presentes nos subsistemas. No caso dos reservatórios, estes foram considerados como um acréscimo ao volume útil da usina subsequente para o cálculo do armazenamento máximo. Optou-se por recalculer o valor das ENAs, pois o ONS não fornece séries anuais de armazenamento máximo – que é utilizado para o cálculo do período crítico – de cada subsistema. Em seguida, foi verificada a necessidade de se realizar o procedimento de *pre-whitening* nas séries de energia natural afluyente. Devido ao fato de todas as séries apresentarem uma correlação significativa (considerando um nível de significância de 5%), esse procedimento foi realizado. Após isso, foram aplicados os testes de hipótese de Pettitt e Mann-Kendall em cada uma das energias naturais afluyentes, e comparou-se os p-valores obtidos com o nível de significância de 5%. O p-valor é a probabilidade com a qual o valor obtido por meio de um teste estatístico seja, no mínimo, tão contraditório à hipótese nula quanto o valor amostral calculado, quando a hipótese nula é assumida verdadeira (DEVORE, 2011). Os resultados estão presentes na tabela 4.

TABELA 4 – RESULTADOS DOS TESTES ESTATÍSTICOS PARA OS SUBSISTEMAS

Subsistema	Pre-whitening	Pettitt		Mann-Kendall	
		Ano de quebra	p-valor	Estatística	p-valor
<b>Sul</b>	Sim	1970	0,00	3,68	0,00
<b>Sudeste</b>	Sim	1970	0,68	0,945	0,97
<b>Nordeste</b>	Sim	1991	0,07	-2,00	0,04
<b>Norte</b>	Sim	1997	0,55	-1,17	0,23

Os subsistemas Sul e Nordeste rejeitaram a hipótese nula de que a série

apresenta um comportamento estacionário (a um nível de significância de 5%); no subsistema Sul houve a rejeição nos dois testes aplicados, enquanto no Nordeste houve apenas em um (Mann-Kendall). Isso indica que provavelmente houve uma alteração na capacidade de regularização relativa desses subsistemas ao longo do tempo. No caso do subsistema Sul houve uma tendência de aumento nas séries de energia natural afluente; já no Nordeste, a tendência foi de decrescimento, ambas tendências evidenciadas pelo sinal da estatística do teste de Mann-Kendall. Os subsistemas Norte e Sudeste, por sua vez, apresentam um comportamento estacionário em suas séries de energia natural afluente, o que não descarta, porém, a possibilidade de algumas usinas presentes em algum desses subsistemas apresentarem comportamento não estacionário.

Após a análise dos subsistemas, parte-se para outra análise, dessa vez de algumas das principais usinas que compõem cada subsistema, de forma a verificar individualmente o risco de não atendimento à demanda de cada uma. Após a aplicação dos testes de hipótese de Mann-Kendall e Pettitt, obtêm-se os seguintes resultados, apresentados na tabela 5. Estes resultados estatísticos são analisados com base no seu p-valor e comparados a um nível de significância de 5%.

TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DOS TESTES DE PETTITT E MANN-KENDALL

Reservatórios	Pre-whitening	Pettitt		Mann-Kendall	
		Ano de quebra	p-valor	Estatística	p-valor
Foz do Areia	Sim	1968	0,033	2,493	0,013
Ilha Solteira	Sim	1971	0,154	0,945	0,344
Itaparica	Sim	1992	0,049	-1,825	0,068
Sobradinho	Sim	1992	0,053	-1,811	0,070
Tucuruí	Sim	1976	0,407	-0,117	0,907

Nas regiões com tendência de crescimento na série de vazões, há um aumento na vazão média de longo termo e conseqüentemente uma diminuição no índice de regularização. Isso significa que: além da expansão do sistema elétrico ocorrer predominantemente por usinas a fio de água, a não estacionariedade das séries de vazões pode estar naturalmente mudando a capacidade de regularização dos reservatórios, alterando a curva de regularização para a qual foram dimensionados. Há duas situações possíveis dentro desse cenário. A primeira, mencionada no início do parágrafo, diz respeito à diminuição da capacidade de regularização do reservatório e, posteriormente, ao cálculo do volume necessário para que esse reservatório volte à sua condição original. A segunda implica no aumento da capacidade de regularização relativa do reservatório devido a uma diminuição na vazão de longo termo, calculando-se também qual seria essa nova capacidade. Acerca da presença do comportamento não estacionário nas séries de vazões, calculou-se os pontos de quebra identificados

pelo teste de Pettitt e a estatística de Mann-Kendall para os reservatórios selecionados, conforme mostram as figuras 16 e 17.

É possível observar na figura 16 que na região Sul do Brasil aparentemente apresenta um aumento nas vazões, enquanto na região Nordeste aparenta haver uma diminuição. Isso reforça o estudo de FILL (2017), que apontou a existência de um comportamento não estacionário no rio Iguaçu, Paraná, por meio de um estudo dos dados observados nas estações fluviométricas de União da Vitória e Salto Cataratas. É possível observar que no Estado do Paraná os pontos de quebra identificados pelo teste de Pettitt foram em sua maioria na década de 60. Na figura 17, é possível notar que na região Nordeste os pontos de quebra aparentam ser mais recentes, contemplando as décadas de 80 e 90. As razões dessa mudança podem estar associadas com fenômenos climatológicos como o *El Niño*, que ocorreu em 1982/1983 e em 1986, coincidindo com as datas apontadas como pontos de quebra.

FIGURA 16 – ESTATÍSTICA DE MANN-KENDALL PARA USINAS HIDRELÉTRICAS BRASILEIRAS

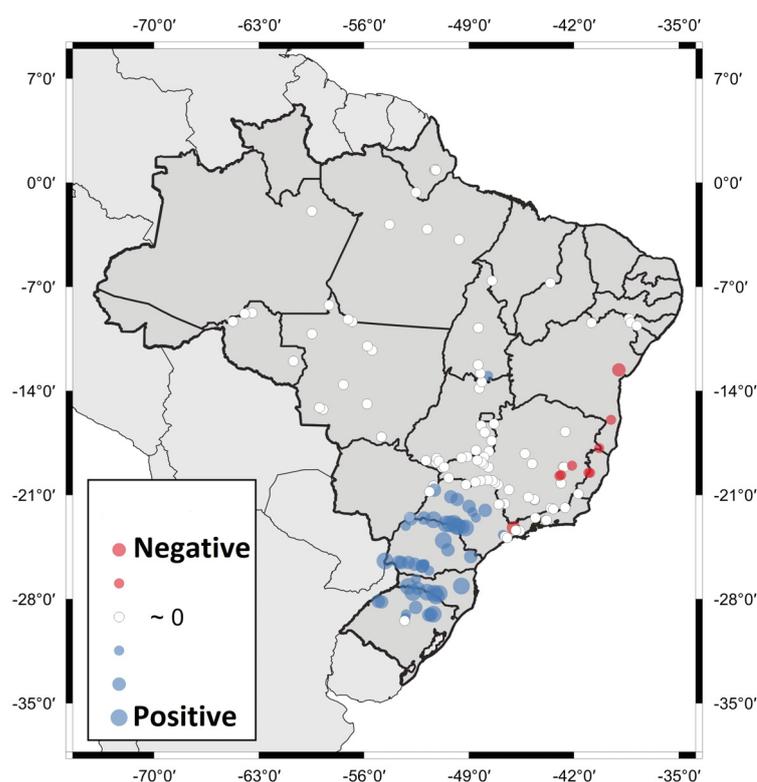
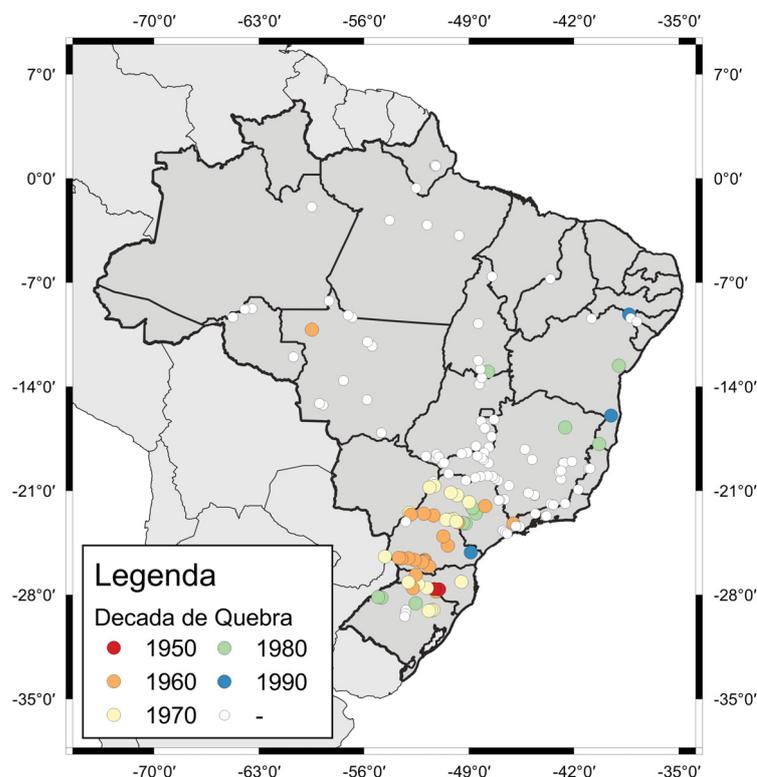


FIGURA 17 – PONTO DE QUEBRA DO TESTE DE PETTITT PARA USINAS HIDRELÉTRICAS BRASILEIRAS



## 5.2 CURVA DE REGULARIZAÇÃO: ENERGIA NATURAL AFLUENTE

De forma a avaliar de uma maneira geral o risco de operação de cada subsistema, foram geradas 1.000 séries sintéticas com 88 anos de duração e calculadas as curvas de regularização de cada uma das séries geradas. Para a escolha do modelo de geração de séries sintéticas, conforme mencionado no item 4.6, foram verificados os valores de AICC e BIC do modelo AR(1), comparando-os com os do modelo ARMA(1,1). Entretanto, antes da geração das séries sintéticas foram aplicados testes de normalidade (Anderson-Darling, Shapiro-Wilk e Komogorov-Smirnov) nas séries de energia natural afluente. Pelo fato de a ENA do subsistema Sul apresentar evidências significativas de comportamento não estacionário, haja vista que foi a única série que rejeitou a hipótese nula dos testes de testes de Pettitt e Mann-Kendall, esta foi corrigida seguindo o procedimento descrito no item 4.2. Uma vez que os valores de AICC e BIC dos modelos AR(1) e ARMA(1,1) são muito semelhantes, optou-se – considerando princípio da parcimônia – por utilizar o modelo AR(1). Aplicou-se, para uma validação inicial do modelo, os testes de homoscedasticidade (Levene), independência (Portman-teau) e normalidade (Kolmogorov-Smirnov) nas séries de resíduos oriundas do modelo escolhido. Os resultados dos testes estatísticos estão sintetizados na tabela 6.

TABELA 6 – RESULTADOS MODELOS ESTOCÁSTICOS - SÉRIES ENA

	Normalidade			Modelo				Resíduos		
	Testes			AICC	BIC	AICC	BIC	Testes		
	KS	AD	SW	AR(1,0)		ARMA(1,1)		KS	Portmanteau	Levene
<b>Sul</b>	0,481	0,907	0,797	1408	1409	1411	1413	0,479	0,576	0,494
<b>Sudeste</b>	0,476	0,377	0,183	-261	-261	-261	-259	0,478	0,762	0,475
<b>Nordeste</b>	0,467	0,117	0,072	1256	1257	1255	1258	0,456	0,276	0,07
<b>Norte</b>	0,478	0,637	0,724	1420	1420	1277	1280	0,472	0,925	0,469

Os resultados dos testes de normalidade das ENAs antes da aplicação do modelo AR(1), conforme apresentado na tabela 6, não rejeitaram a hipótese nula de normalidade. As séries de resíduos, também, não rejeitaram as hipóteses nulas de homoscedasticidade, independência e normalidade, o que corrobora para a validação inicial do modelo.

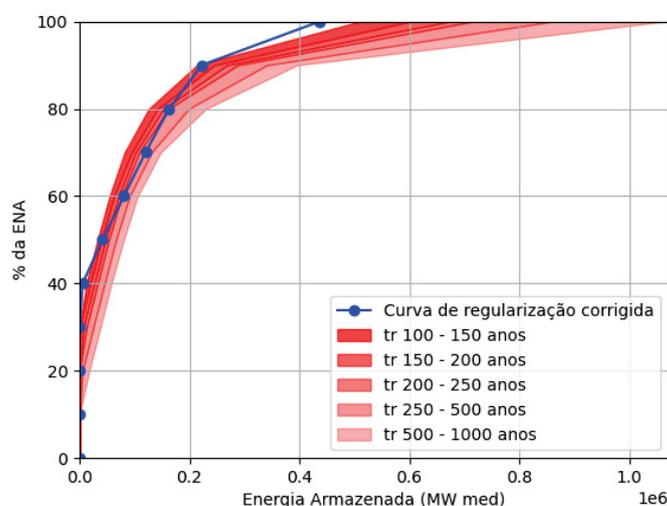
A Tabela 7 mostra a comparação entre as estatísticas dos dados modelados e dos dados amostrais, a fim de validar o modelo utilizado para a geração das séries sintéticas. Nessa tabela, é possível observar que os parâmetros são muito semelhantes quando comparados os valores obtidos pelas séries sintéticas com os da série original. O único parâmetro que apresenta distorções mais significativas é a assimetria, haja vista que esse não é um dos parâmetros de entrada do modelo estocástico utilizado, logo, as séries resultantes desse modelo não necessariamente reproduzirão a assimetria de maneira fidedigna ao valor da série original. Logo, com exceção da assimetria, todos os demais parâmetros são próximos dos valores amostrais, o que contribui para a validação final do modelo.

TABELA 7 – VALIDAÇÃO DOS DADOS - ENA

	Sul		Sudeste		Norte		Nordeste	
	Histórico	Geradas	Histórico	Geradas	Histórico	Geradas	Histórico	Geradas
<b>Média</b>	6214	6213	23300	23290	10260	10250,00	4835	4834
<b>Desvio Padrão</b>	1778	1763	3390	3355	1900	1884	854	838
<b>Assimetria</b>	-0,02	0,00	0,41	0,39	0,04	0,00	-0,61	0,00
<b>Coef. Variação</b>	0,28	0,28	0,14	0,14	0,18	0,18	0,17	0,17
<b>Min</b>	2303	1839	15530	16200	5121	5579	2055	2767
<b>Máx</b>	10290	10600	35140	32900	14640	14940	6953	6886

As séries sintéticas foram utilizadas para a criação de curvas de regularização e, posteriormente, para a associação dessas curvas a tempos de recorrência; neste caso foram selecionados os tempos de 100, 200, 250, 500 e 1.000 anos. Os tempos de recorrência são uma ferramenta útil para calcular a probabilidade de falha associada a reservatórios, vertedouros, obras de drenagem urbana etc. Nesse caso, foi utilizada a curva de regularização original do subsistema e verificou-se sua posição relativa às demais curvas. As figuras 18, 19, 20 e 21 mostram as curvas de cada subsistema.

FIGURA 18 – CURVA DE REGULARIZAÇÃO ENA - SUBSISTEMA SUL



A figura 18, mostra que a curva de regularização corrigida do subsistema sul fica muito próxima das curvas com tempos de recorrência de 100 e 150 anos a partir de uma regularização de 60% da energia natural afluyente. Isso indica que há uma baixa probabilidade de falha do subsistema como um todo em atender à demanda energética da região.

Com relação ao subsistema sudeste, conforme mostra a figura 19, a curva de regularização original ficou mais próxima da faixa entre 100 e 150 anos, indicando um maior risco de falha do sistema, nesse caso o não atendimento da demanda energética. Apesar disso, após a aplicação dos testes estatísticos de Pettitt e Mann-Kendall, conforme mostrado na tabela 4, não houve rejeição da hipótese nula de que a série apresenta comportamento estacionário.

FIGURA 19 – CURVA DE REGULARIZAÇÃO ENA - SUBSISTEMA SUDESTE

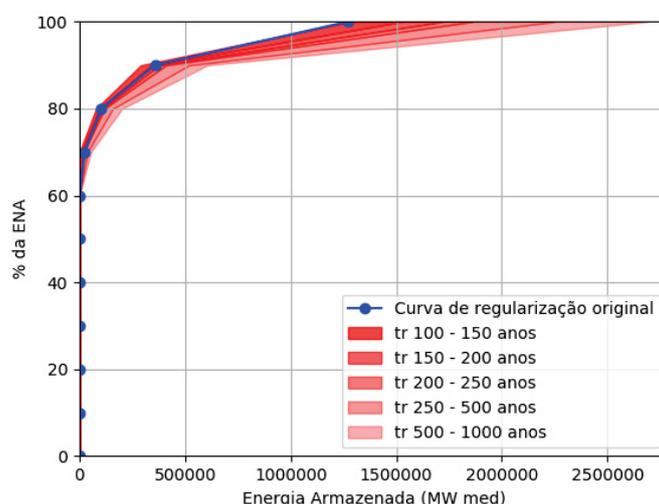
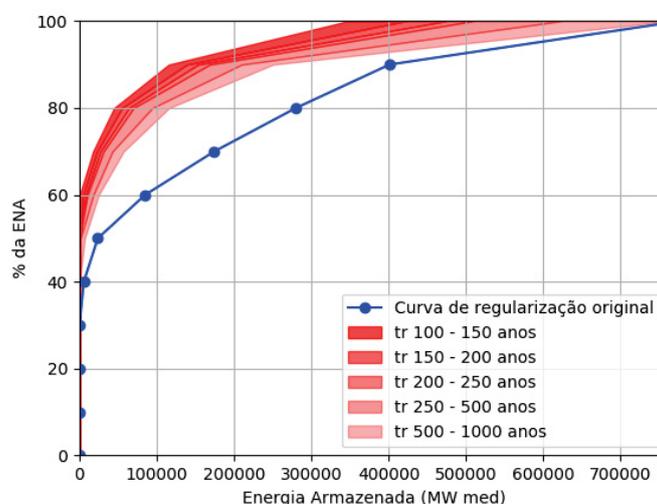
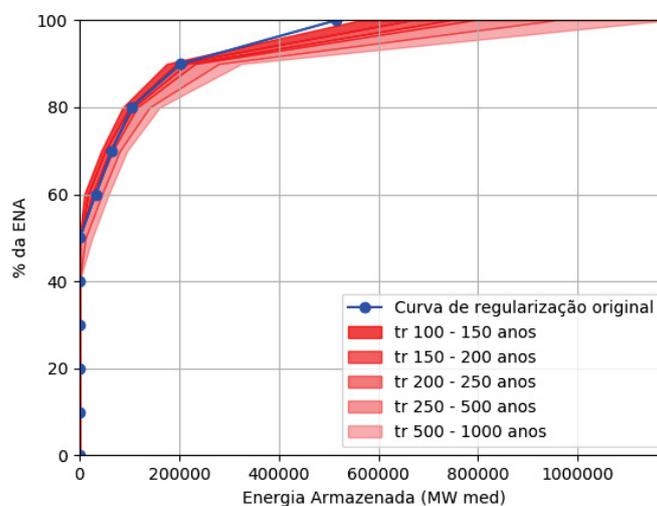


FIGURA 20 – CURVA DE REGULARIZAÇÃO ENA - SUBSISTEMA NORDESTE



No subsistema Nordeste, houve algo bastante peculiar, pois a curva de regularização original ficou atrelada a tempos de recorrência superiores a 1.000 anos, como apresenta a figura 20. Isso, teoricamente, mostra que o subsistema Nordeste possui uma alta probabilidade de êxito em atender à demanda energética da região, o que não necessariamente é verdadeiro. Isso também mostra provavelmente que há outro fator influenciando a série de energias naturais afluentes do Nordeste e que não foi reproduzido adequadamente pelas séries sintéticas. Tal comportamento das séries sintéticas pode comprometer a avaliação do risco de falha do subsistema.

FIGURA 21 – CURVA DE REGULARIZAÇÃO ENA - SUBSISTEMA NORTE



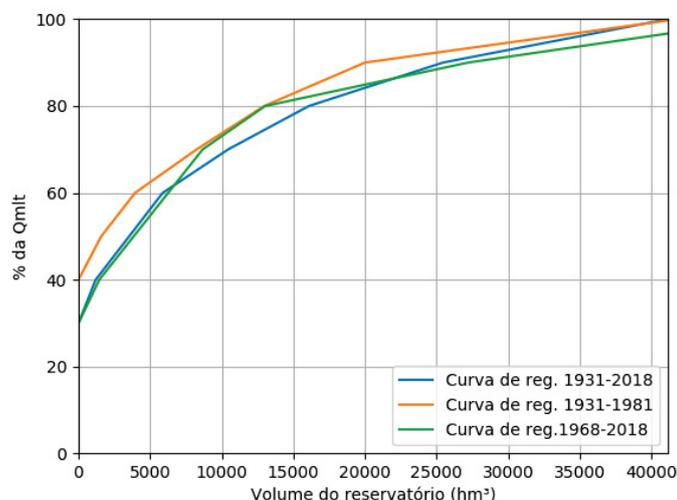
A curva de regularização do subsistema Norte (figura 21) fica entre as curvas com o tempo de recorrência de 100 anos e 150 anos; a partir da regularização de 90%,

no entanto, é possível observar que há um aumento no risco, haja vista que a curva original fica atrelada a tempos de recorrência menores do que 100 anos. Apesar disso, assim como no subsistema Sudeste, os p-valores dos testes de Pettitt e Mann-Kendall ficaram acima do nível de significância de 5% adotado, ou seja, não houve rejeição da hipótese nula de que a série apresenta comportamento estacionário.

### 5.3 CURVAS DE REGULARIZAÇÃO: SÉRIES DE VAZÕES ORIGINAIS

Conforme observado no item 5.1, é possível identificar que nem todas os reservatórios aparentam possuir um comportamento não estacionário, o que pode ser observado, também, a partir das curvas de regularização relativas às séries originais dos reservatórios escolhidos. O reservatório com maior evidência desse comportamento é o de Foz do Areia, cujas curvas apresentadas na figura 22 mostram que a hipótese inicial de que o sistema aparentemente está perdendo capacidade de regularização relativa com o tempo se confirma.

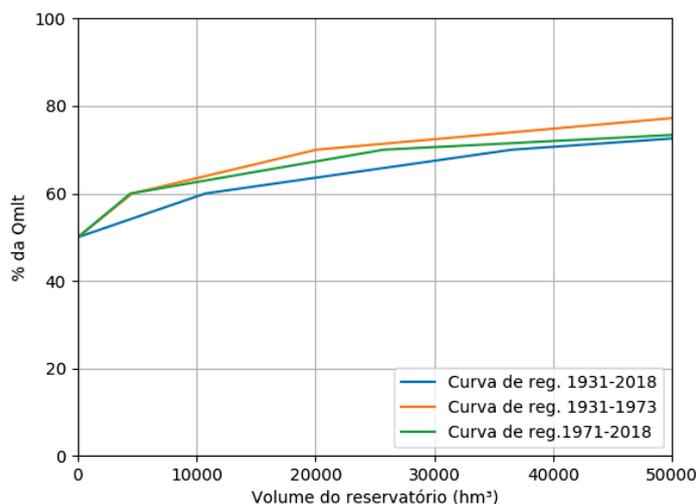
FIGURA 22 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO DE FOZ DO AREIA



A curva de regularização original (com a série restrita até a data de operação) ficou de fato acima da curva de regularização atualizada do reservatório. Isso é a confirmação de que há uma perda de capacidade de regularização relativa, pois, para um mesmo volume útil, a curva atualizada regulariza percentualmente menos vazão do que a original. Essa perda pode ser associada ao comportamento não estacionário da série de Foz do Areia, conforme evidenciado na tabela 5 e nas figuras 16 e 17. Além disso, a curva de regularização oriunda do ponto de quebra de Pettitt ficou muito próxima da curva atualizada, o que permite concluir que a série atualizada está muito mais próxima da série com tendência de crescimento do que da série utilizada para o

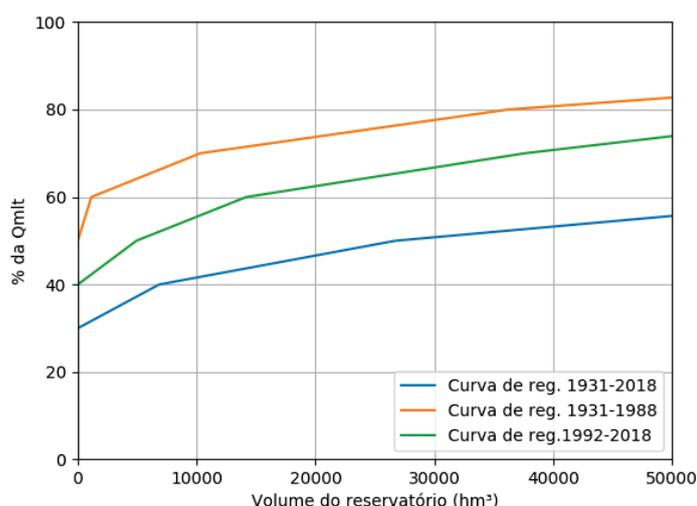
dimensionamento do reservatório. As curvas de regularização dos demais reservatórios estão presentes nas figuras 23, 24, 25 e 26.

FIGURA 23 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO DE ILHA SOLTEIRA



No reservatório de Ilha Solteira, figura 23, houve uma pequena diminuição na capacidade de regularização relativa quando comparadas as curvas. A série, no entanto, apresenta comportamento estacionário. Essa diminuição pode ser atribuída às oscilações estatísticas devido aos diferentes tamanhos amostrais das séries que originaram as curvas.

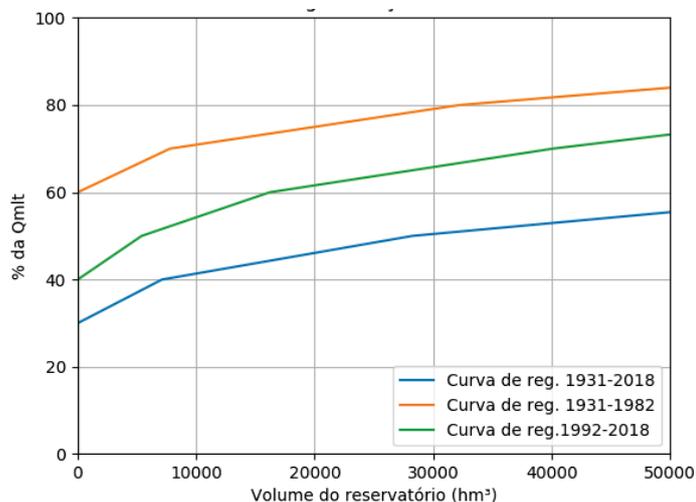
FIGURA 24 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO DE ITAPARICA



Em Itaparica, figura 24, entretanto, houve uma severa perda na capacidade de regularização relativa do reservatório, mesmo a série de vazões não apresentando evidências estatísticas significativas de que possui um comportamento não estacionário. Apesar de o teste de Pettitt ter rejeitado a hipótese nula, mesmo com um *p-valor* muito próximo de 5%, o teste de Mann-Kendall não a rejeitou; logo, o comportamento não

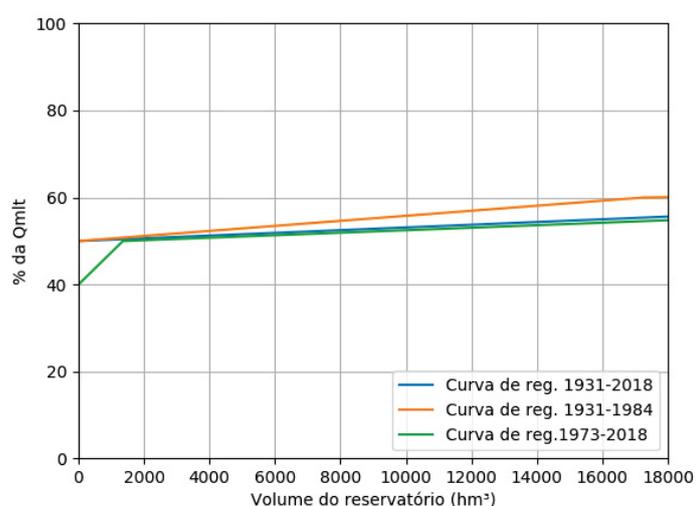
estacionário não é o suficiente explicar essa significativa perda relativa de capacidade de regularização.

FIGURA 25 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO DE SOBRADINHO



Sobradinho, figura 25, da mesma forma que Itaparica, visto que ambas estão localizadas no mesmo rio, também apresentou uma perda considerável em sua capacidade de regularização relativa, mesmo com a série de vazões possuindo comportamento estacionário. Isso apenas reforça que a não estacionariedade não é suficiente para avaliar a perda na capacidade de regularização de reservatórios.

FIGURA 26 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO DE TUCURUÍ



Em Tucuruí, figura 26, não houve uma perda significativa na capacidade de regularização relativa no reservatório, podendo inclusive ser atribuída a uma oscilação característica da série de vazões, haja vista que houve um aumento superior a trinta

anos de dados de vazão da curva original para a atualizada. A série apresenta um comportamento estacionário e bastante homogêneo.

A partir dos gráficos mostrados, foi possível extrair a capacidade de regularização inicial dos reservatórios, sua capacidade atual e qual seria o volume que o reservatório deveria possuir para corresponder à regularização original. A tabela 8 sintetiza essas informações.

TABELA 8 – REGULARIZAÇÃO E VOLUME DAS USINAS

<b>Reservatórios</b>	<b>Reg. original (%)</b>	<b>Reg. atualizada (%)</b>
<b>Foz do Areia</b>	60,50	53,00
<b>Ilha Solteira</b>	65,00	61,00
<b>Itaparica</b>	62,50	34,00
<b>Sobradinho</b>	78,00	50,00
<b>Tucuruí</b>	62,50	61,30

A tabela 8 mostra que para todas as usinas houve uma perda na capacidade de regularização relativa. Entretanto, para as usinas de Ilha Solteira e Tucuruí, essa perda foi praticamente irrelevante. Já para as usinas de Foz do Areia, Itaparica e Sobradinho, essa perda foi bastante acentuada. Em Sobradinho, por exemplo, a capacidade de regularização original era de 78% e a atual é de 50% aproximadamente. Essa perda de capacidade de regularização pode-se traduzir em um aumento no risco de operação desses reservatórios; o próximo item trata dessa verificação.

#### 5.4 CURVAS DE REGULARIZAÇÃO: SÉRIES SINTÉTICAS

O procedimento adotado para as séries de vazões foi o mesmo apresentado no item 5.2. Pelo fato de a série de vazões de Foz do Areia ser a única com evidências significativas de comportamento não estacionário, esta foi a única a ser corrigida seguindo o procedimento descrito no item 4.2. Foram realizados dois conjuntos de séries sintéticas: uma com as séries de vazões completas e outra com as séries restritas até o ano de operação de cada usina. Os resultados dos testes estatísticos, bem como as verificações dos modelos, utilizados estão sintetizados na tabela 9 para as séries até a data de operação, e na tabela 10 para as séries completas.

TABELA 9 – RESULTADOS MODELOS ESTOCÁSTICOS - SÉRIES ATÉ A DATA DE OPERAÇÃO

	Normalidade			Modelo				Resíduos		
	Testes			AICC	BIC	AICC	BIC	Testes		
	KS	AD	SW	AR(1,0)		ARMA(1,1)		KS	Portmanteau	Levene
<b>Foz do areia</b>	0,467	0,534	0,419	590	590	592	594	0,471	0,581	0,961
<b>Ilha Solteira</b>	0,472	0,919	0,907	641	641	644	645	0,465	0,782	0,096
<b>Itaparica</b>	0,447	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	-100	-100	-99	-97	0,241	0,506	0,700
<b>Sobradinho</b>	0,449	<b>0,001</b>	<b>0,000</b>	-85	-86	-84	-83	0,210	0,648	0,800
<b>Tucuruí</b>	0,444	<b>0,032</b>	<b>0,021</b>	-96	-96	-95	-93	0,193	0,839	0,793

Para as séries até a data de operação, tabela 9, os reservatórios de Itaparica, Sobradinho e Tucuruí rejeitaram a hipótese nula de normalidade para mais de um teste, logo, sofreram uma transformação logarítmica antes da aplicação dos modelos estocásticos. Após a transformação, as séries não rejeitaram mais essa hipótese nula. Pelo fato de os valores dos critérios AICC e BIC ficarem muito próximos para ambos os modelos, optou-se por escolher o modelo AR(1) pelo princípio da parcimônia. Os resíduos também não rejeitaram as hipóteses nulas de homoscedasticidade, independência e normalidade, todas considerando um nível de significância de 5%, o que auxilia na validação inicial do modelo.

TABELA 10 – RESULTADOS MODELOS ESTOCÁSTICOS - SÉRIES COMPLETAS

	Normalidade			Modelo				Resíduos		
	Testes			AICC	BIC	AICC	BIC	Testes		
	KS	AD	SW	AR(1,0)		ARMA(1,1)		KS	Portmanteau	Levene
<b>Foz do areia</b>	0,470	0,111	<b>0,004</b>	1063	1063	1065	1067	0,477	0,182	0,932
<b>Ilha Solteira</b>	0,471	0,119	<b>0,000</b>	1322	1322	1322	1325	0,476	0,899	0,902
<b>Itaparica</b>	0,448	<b>0,000</b>	<b>0,002</b>	1255	1255	1250	1252	0,220	0,532	0,223
<b>Sobradinho</b>	0,452	<b>0,000</b>	<b>0,003</b>	1248	1249	1245	1247	0,222	0,554	0,271
<b>Tucuruí</b>	0,467	0,119	<b>0,035</b>	1475	1475	1473	1475	0,467	0,709	0,749

Para as séries completas, tabela 10, os reservatórios que rejeitaram a hipótese nula de normalidade em mais de um teste estatístico, Itaparica e Sobradinho, sofreram uma transformação logarítmica antes da aplicação do modelo escolhido. Após a aplicação da transformação, as séries não rejeitaram a hipótese nula. Pelo fato de os valores dos critérios AICC e BIC ficarem muito próximos para ambos os modelos, optou-se por escolher o modelo AR(1) pelo princípio da parcimônia. Os resíduos das séries de todas as usinas não rejeitaram a hipótese nula dos testes de homoscedasticidade, independência e normalidade para um nível de significância de 5%, o que corrobora a validação inicial modelo.

Para as séries completas, foram geradas 1.000 séries sintéticas com 88 anos de duração; para as séries até a data de operação também foram geradas 1.000 séries sintéticas, porém com 60 anos de duração. A validação final do modelo foi feita a

partir da comparação das estatísticas das séries originais com as das séries sintéticas, conforme pode ser observado nas tabelas 11 e 12.

TABELA 11 – VALIDAÇÃO DOS DADOS - SÉRIES ATÉ A DATA DE OPERAÇÃO

	Foz do Areia		Ilha Solteira		Itaparica		Sobradinho		Tucuruí	
	Histórico	Geradas	Histórico	Geradas	Histórico	Geradas	Histórico	Geradas	Histórico	Geradas
<b>Média</b>	597	597	4926	4924	2902	2897	2752	2747	10990	10980
<b>Desvio Padrão</b>	190	188	1033	1019	817	773	756	695	2957	2880
<b>Assimetria</b>	0,22	-0,01	-0,03	-0,02	0,88	0,68	1,20	0,65	0,74	0,66
<b>Coef. Variação</b>	0,32	0,31	0,21	0,20	0,28	0,26	0,27	0,25	0,27	0,26
<b>Min.</b>	249	155	2803	2529	1710	1526	1721	1492	6070	5858
<b>Máx.</b>	1136	1035	7165	7285	5019	5157	4952	4769	18880	19350

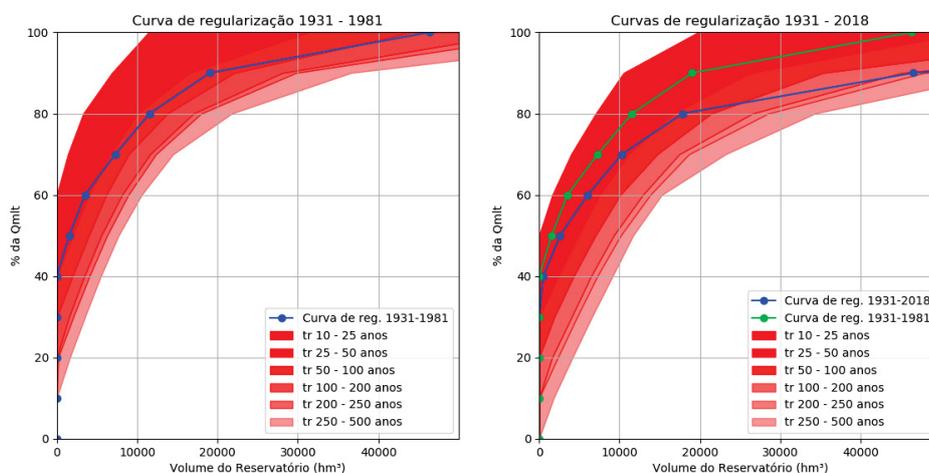
TABELA 12 – VALIDAÇÃO DOS DADOS - SÉRIES COMPLETAS

	Foz do Areia		Ilha Solteira		Itaparica		Sobradinho		Tucuruí	
	Histórico	Geradas	Histórico	Geradas	Histórico	Geradas	Histórico	Geradas	Histórico	Geradas
<b>Média</b>	742	742	5239	5238	2630	2629	2554	2553	10820	10810
<b>Desvio Padrão</b>	230	247	1185	1167	860	842	832	815	2676	2645
<b>Assimetria</b>	0,63	0,00	0,95	0,00	0,74	0,00	0,75	0,00	0,64	0,00
<b>Coef. Variação</b>	0,34	0,33	0,23	0,22	0,33	0,32	0,33	0,32	0,25	0,25
<b>Min.</b>	258	135	2803	2349	834	576	796	568	5474	4240
<b>Máx.</b>	1528	1358	10680	8113	5019	4690	4952	4544	18880	17380

Visto que os parâmetros estatísticos das séries sintéticas, tanto das séries completas quanto das séries até a data de operação, ficaram muito próximos aos das séries originais, verificou-se, então, a viabilidade de se utilizar essas séries geradas. A exceção foi o coeficiente de assimetria, da mesma forma mostrada na tabela 6 no item 5.2, haja vista que esse parâmetro estatístico não foi utilizado para o cálculo dos modelos; logo, é natural que os valores modelados desse parâmetro sejam diferentes dos valores calculados a partir das amostras.

A partir das séries sintéticas, foram geradas curvas de regularização e estas foram plotadas juntamente com as curvas de regularização oriundas das séries originais, tanto a curva até a data de operação de cada reservatório quanto a curva com dados atualizados. A plotagem das curvas de regularização das séries sintéticas juntamente com as das séries originais foi feita de forma a identificar qual é o tempo de recorrência – mostrado no item 4.6 – associado às curvas originais no decorrer do tempo, conforme pode ser observado nas figuras 27, 28, 29, 30 e 31. As manchas avermelhadas representam as curvas de regularização oriundas das séries sintéticas. Nos gráficos à direita, estão plotadas as curvas associadas ao conjunto de séries sintéticas das séries atualizadas; à esquerda, ao das séries limitadas até a data de operação de cada usina.

FIGURA 27 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO COM TEMPO DE RECORRÊNCIA - FOZ DO AREIA



Na figura 27, o gráfico à direita mostra as posições da curva de regularização da série completa (1931-2018) e da série até a data de operação (1931-1981) em relação às curvas das séries sintéticas com dados atualizados; o gráfico à esquerda mostra essa posição, porém, somente em relação às curvas com dados até o ano de operação inicial do reservatório. Quando comparadas ambas as figuras, verifica-se que há um deslocamento da curva de regularização original do reservatório de Foz do Areia. Devido ao aumento na vazão média de longo termo, a curva de regularização atualizada apresenta diminuição na capacidade de regularização relativa, o que é confirmado pela equação 2.3, haja vista que a  $Q_{mlt}$  é inversamente proporcional ao índice de regularização. No gráfico à direita, a curva atualizada se aproxima mais do tempo de recorrência de 50 anos, enquanto na figura à esquerda esse valor fica entre 50 e 100 anos. Isso mostra que hoje o reservatório opera numa faixa de risco maior do que quando foi dimensionado, pois houve uma perda de capacidade de regularização relativa nesse reservatório.

Em Ilha Solteira, pode-se observar na figura 28 que a curva atualizada (1931-2018) no gráfico à direita ficou numa faixa de risco similar à da curva original (1931-1973) no gráfico à esquerda, algo entre 100 e 200 anos de recorrência. Isso corrobora que o comportamento estacionário da série de vazões fez com que o reservatório operasse numa mesma faixa de risco ao longo do tempo. Caso seja analisada a curva de regularização original no gráfico à direita, nota-se que há um aumento no risco de operação, que pode ser atribuído a oscilações estatísticas naturais oriundas dos diferentes tamanhos das séries.

FIGURA 28 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO COM TEMPO DE RECORRÊNCIA - ILHA SOLTEIRA

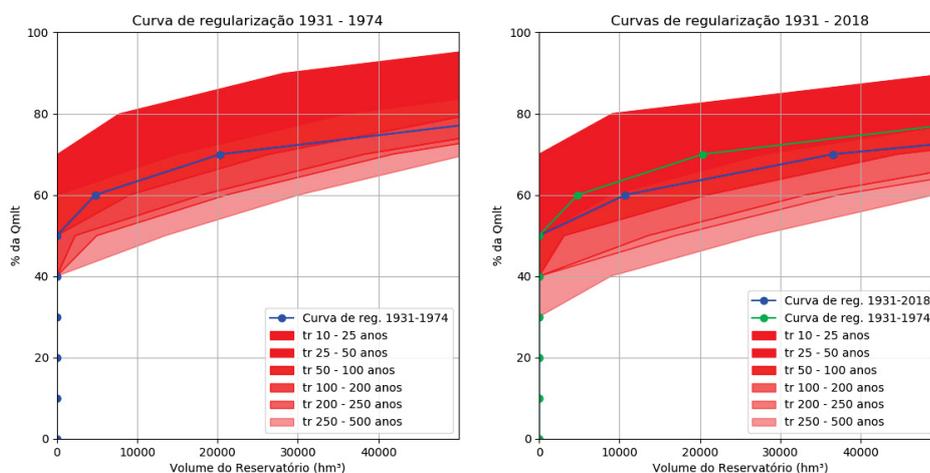
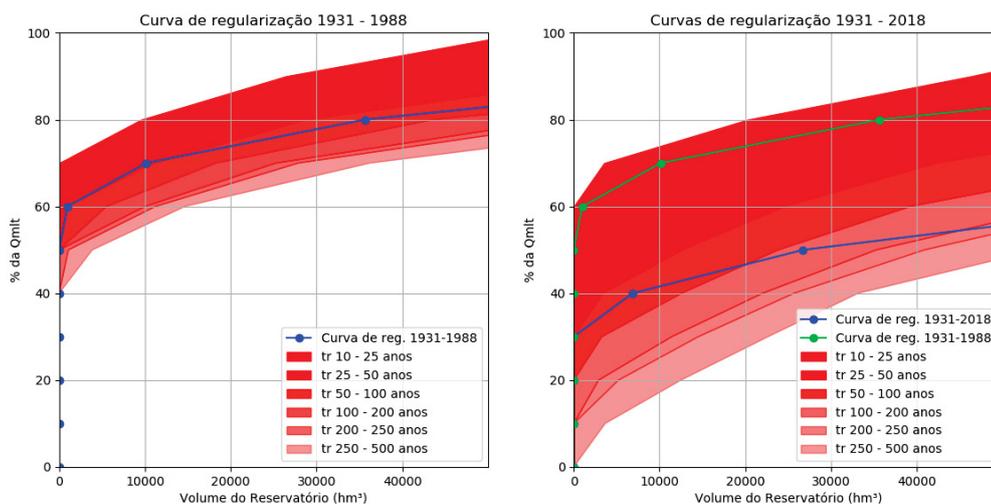


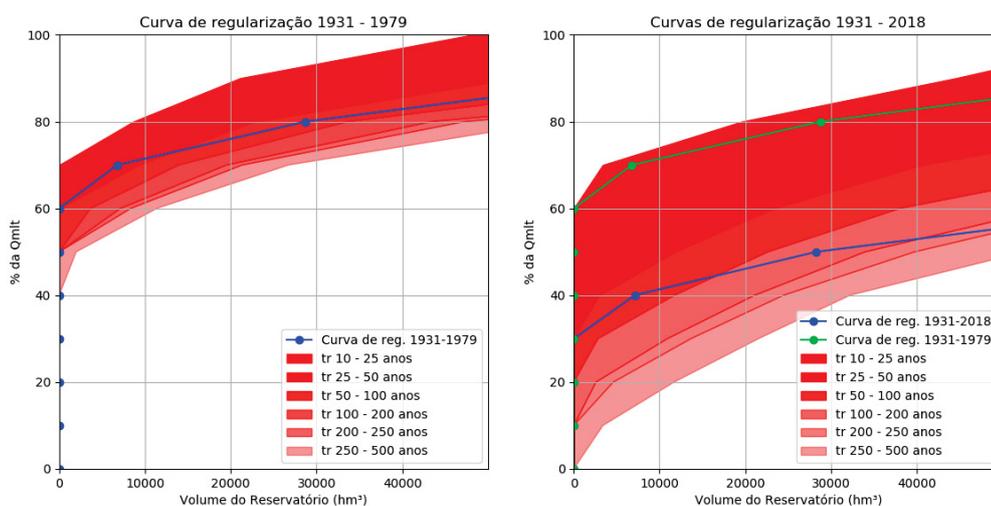
FIGURA 29 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO COM TEMPO DE RECORRÊNCIA - ITAPARICA



Em Itaparica, o reservatório, conforme mostra a figura 29, opera hoje numa faixa de risco bastante inferior à faixa para qual foi dimensionado, principalmente devido a perda na capacidade relativa de regularização ao longo do tempo. Isso é algo contraditório, pois, assim como comentado acerca da figura 24, esperava-se que a capacidade de regularização não apresentasse uma alteração tão expressiva, haja vista que a série possui um comportamento estacionário. Entretanto, se o reservatório fosse regularizar a vazão média de longo termo relativa à curva de regularização original (1931-1988), este operaria numa faixa de risco muito alta, próxima aos 25 anos de recorrência.

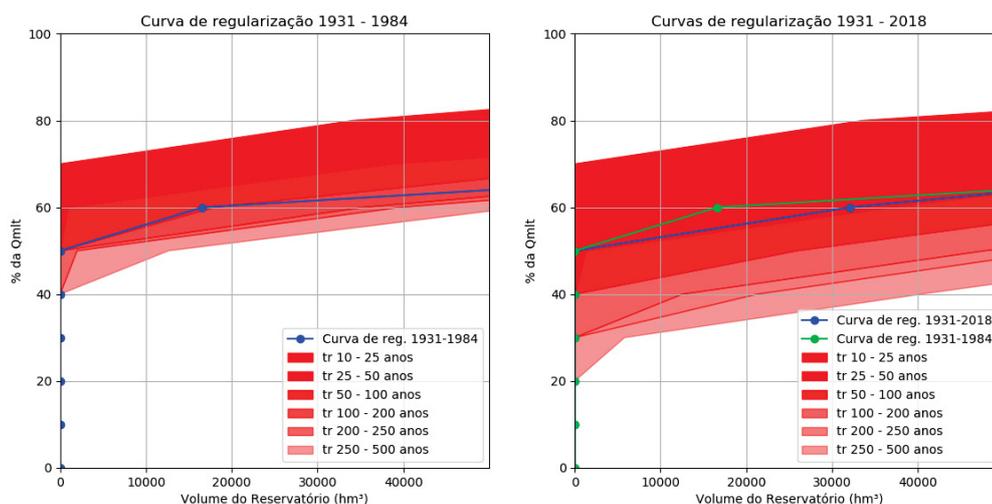
Assim como em Itaparica, em Sobradinho também apresentou as mesmas contradições quando comparadas as curvas original (1931-1979) e atualizada (1931-2018), haja vista que ambas estão localizadas no mesmo rio. Essas semelhanças podem ser observadas ao comparar a figura 30 com a figura 29. Isso mostra que há outro fator influenciando na perda de capacidade de regularização das usinas do rio São Francisco e que não foi contemplada pelas séries sintéticas.

FIGURA 30 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO COM TEMPO DE RECORRÊNCIA - SOBRA-DINHO



Em Tucuruí, a partir da análise da figura 31 e do comportamento estacionário da série de vazões, observa-se que não houve um aumento significativo no risco de operação do reservatório, haja vista a semelhança das curvas de regularização original (1931-1984) e atualizada (1931-2018). Quando comparadas as figuras da direita e da esquerda é possível observar que há um ligeiro aumento na faixa de risco de operação do reservatório, porém não é significativo.

FIGURA 31 – CURVAS DE REGULARIZAÇÃO COM TEMPO DE RECORRÊNCIA - TUCURUÍ



Vale ressaltar que a mancha avermelhada – figuras 27, 28, 29, 30, 31 – do tempo de recorrência das séries completas é mais larga, o que mostra uma maior incerteza na avaliação dos riscos de operação dos reservatórios.

A partir das figuras foi possível calcular estimativas do risco de operação dos reservatórios com base na equação 4.16 caso os reservatórios continuassem operando com o índice de regularização para o qual foram dimensionados. Essas estimativas estão compiladas na tabela 13.

TABELA 13 – COMPARAÇÃO RISCOS - OPERAÇÃO CURVA DE REGULARIZAÇÃO

Usinas Hidrelétricas	TR original em anos	TR atualizado em anos	Faixa de risco original	Faixa de risco atualizada
<b>Foz do Areia</b>	25 - 50	10 - 25	87 - 64 %	99 - 87 %
<b>Ilha Solteira</b>	50 - 100	25 - 50	64 - 39 %	87 - 64 %
<b>Itaparica</b>	25 - 50	10 - 25	87 - 64 %	99 - 87 %
<b>Sobradinho</b>	25 - 50	10 - 25	87 - 64 %	99 - 87 %
<b>Tucuruí</b>	50 - 100	25 - 50	64 - 39 %	87 - 64 %

Conforme pode ser observado na tabela 13, todos os reservatórios apresentaram um aumento no risco de operação, sobretudo Foz do Areia, Itaparica e Sobradinho – sendo que esses dois últimos possuem um comportamento estacionário – caso continuem operando com os mesmos índices de regularização para os quais foram dimensionados. Isso indica que além da influência da não estacionariedade, há outros fatores que impactam diretamente no risco operacional das usinas. Um desses fatores pode ser a mudança no período crítico das usinas, que é explorada no item 5.5.

A tabela 14 mostra as mudanças nas vazões médias de longo termo e as respectivas capacidades de regularização de cada usina, tanto a atualizada quanto a original.

TABELA 14 – COMPARAÇÃO VAZÕES MÉDIAS DE LONGO TERMO - OPERAÇÃO E ATUALIZADA

Usina	Q <sub>mlt</sub> operação (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>mlt</sub> atualizada (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Regularizada operação (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Regularizada atualizada (m <sup>3</sup> /s)
Foz do Areia	597	742	361	393
Ilha Solteira	4926	5239	3202	3196
Itaparica	2902	2630	1814	894
Sobradinho	2752	2554	2147	1277
Tucuruí	10990	10820	6869	6633

Com os dados observados na tabela 14 e na tabela 8, é possível notar que tanto para Itaparica quanto para Sobradinho, houve uma perda nas capacidades de regularização relativa (78% para 50% e 62% para 34%, respectivamente) e absoluta (1814 m<sup>3</sup>/s para 894 m<sup>3</sup>/s e 2147 m<sup>3</sup>/s para 1277 m<sup>3</sup>/s, respectivamente), ou seja, a redução não foi somente em termos percentuais, mas também na vazão demandada aos reservatórios. No caso de Foz do Areia por exemplo, essa perda na capacidade de regularização foi somente relativa, haja vista que houve um aumento na  $Q_{mlt}$ . Esse aumento na vazão média de longo termo significa que o reservatório consegue atender a vazão original com mais segurança, porém caso opere com o índice de regularização para o qual foi dimensionado, o volume necessário para atender a essa demanda (que aumentou devido à alteração na  $Q_{mlt}$ ) deveria ser maior, o que representa um aumento no risco de falha do reservatório.

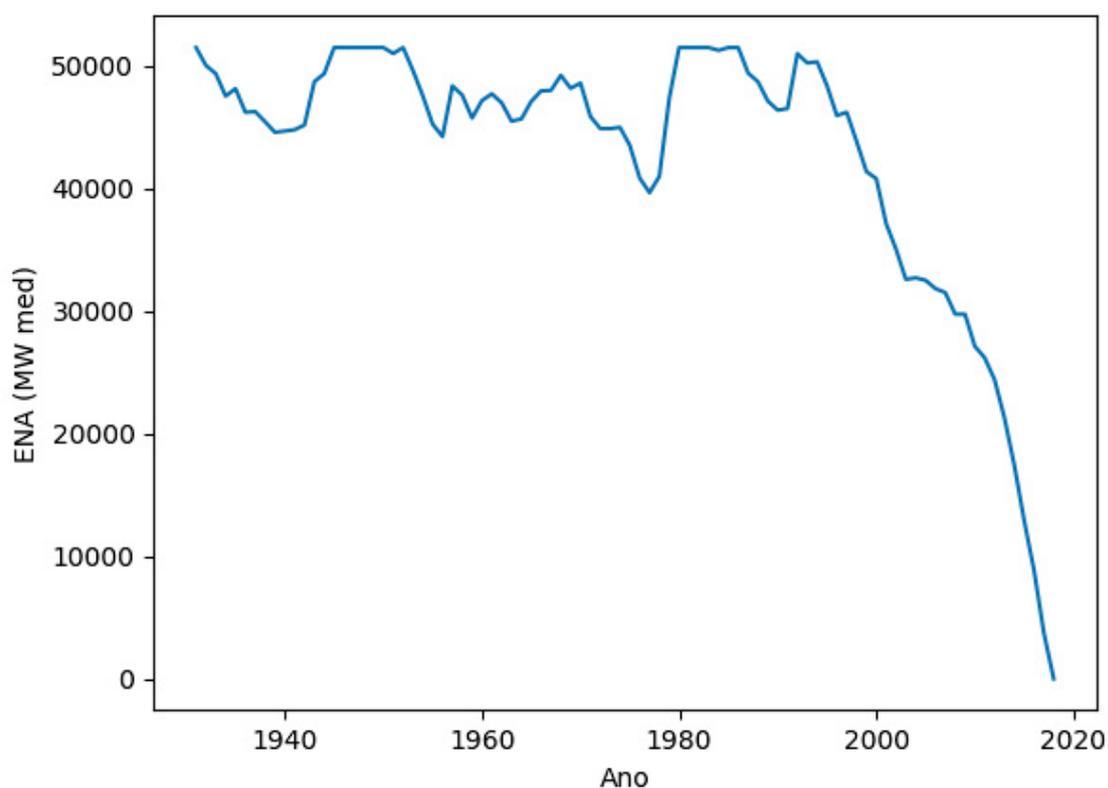
Nos casos de Sobradinho e Itaparica, o aumento no risco de operação desses reservatórios só fica evidenciado quando analisados os resultados mostrados na tabela 13. Caso sejam analisados os riscos associados à curva de regularização atualizada, pode-se observar que tanto para Sobradinho quanto para Itaparica, esse risco ficou abaixo do risco relativo à curva até a data de operação, justamente por conta da diminuição da  $Q_{mlt}$  desses dois reservatórios.

## 5.5 MUDANÇA NO PERÍODO CRÍTICO

Conforme observado a partir dos testes estatísticos e dos gráficos acerca da capacidade de regularização, nota-se que mesmo as usinas de Sobradinho e Itaparica apresentando comportamento estacionário, a capacidade de regularização de ambas diminuiu. Logo, realizou-se o cálculo da ENA somente do rio São Francisco, como mostra a figura 32, no qual as duas usinas estão localizadas, para verificar se houve alguma mudança em relação ao período crítico. Para esse cálculo foram usados os

dados das usinas de Itaparica, Moxotó, Paulo Afonso (IV), Sobradinho e Xingó, obtidos a partir da base de dados da ONS.

FIGURA 32 – ENA RIO SÃO FRANCISCO



Conforme pode ser observado na figura 32, o período crítico do rio São Francisco mudou. Essa confirmação vai de encontro ao estudo de DETZEL, MARTINI et al. (2019), no qual há uma análise acerca da mudança do período crítico na usina de Sobradinho. Além disso, conforme mencionado no capítulo 4, o relatório PEN (ONS, 2019) comenta acerca da mudança no período crítico do SIN como um todo, mencionando a crise hídrica no Nordeste, que perdura desde 2011.

## 6 CONCLUSÕES

Nas usinas analisadas, independentemente se a  $Q_{mlt}$  aumentou ou diminuiu, o índice de regularização relativo dos reservatórios reduziu ao longo dos anos. O comportamento não estacionário é um dos responsáveis pela perda de capacidade de regularização relativa, conforme pode ser observado na usina de Foz do Areia; contudo, não é o único. Os reservatórios de Itaparica e de Sobradinho apresentaram comportamento estacionário, e, ainda assim, estão regularizando bem menos vazão hoje do que na época em que foram dimensionados.

Uma das possíveis causas analisadas para esse comportamento peculiar dos reservatórios no rio São Francisco é a mudança no período crítico. De fato, houve uma mudança no período crítico do rio, que agora começa no final da década de 90 e perdura até 2018, por ser o último ano com dados de vazões disponíveis. São necessários mais anos de observação para verificar se esse período crítico chegou no seu fim ou ainda continuará. Cabe destacar que as séries sintéticas não foram capazes de reproduzir essa mudança no período crítico do rio São Francisco, o que indica uma limitação no método de avaliação de risco.

Vale ressaltar que essa perda de capacidade de regularização não necessariamente se traduziu em aumento no risco de falha desses reservatórios em atender à demanda original destes. Em Foz do Areia, por exemplo, após a análise das curvas de regularização geradas a partir das séries sintéticas foi possível observar que a curva atualizada está numa faixa de risco inferior ao da curva original, devido ao aumento da  $Q_{mlt}$ . No entanto, nos casos de Itaparica e Sobradinho, apesar do resultado da análise das curvas ser semelhante ao de Foz do Areia, a perda na capacidade de regularização não foi só relativa, mas também absoluta. Isso significa que é seguro afirmar que para esses dois reservatórios houve sim um aumento em seus riscos de operação.

Esses resultados requerem atenção, pois seus impactos são bastante consideráveis na forma que os reservatórios são operados. Uma das possíveis formas de mitigar esses efeitos é readequar os reservatórios para a atual  $Q_{mlt}$ . Entretanto, o redimensionamento de um reservatório é praticamente inviável dos pontos de vista ambiental e econômico. Uma das alternativas seria a mudança na forma de operação do reservatório para que o risco associado a sua operação continue o mesmo da época em que foi construído, o que requer mais estudos para verificar os impactos hídricos e energéticos existentes nessa mudança.

Os próximos estudos estão relacionados ao melhor entendimento do aumento do risco associado à operação dos reservatórios e subsistemas, haja vista que para

o subsistema Nordeste essa análise destoou do que foi observado nas usinas de Itaparica e Sobradinho, ambas localizadas nesse subsistema.

Como sugestão para estudos futuros estão:

(1) os estudos acerca do impacto da mudança do período crítico de outras localidades e não só do rio São Francisco.

(2) estudos energéticos que englobem novas formas de operação dos reservatórios já existentes, haja vista as dificuldades técnicas e socioambientais para o redimensionamento destas obras. O trabalho de KURIA e VOGEL (2015a) possui uma inovação nesse sentido, pois traz a regularização do reservatório associada a uma única equação.

(3) buscar outro método para analisar o risco, haja vista a limitação das séries sintéticas em reproduzir as mudanças no período crítico do rio São Francisco.

(4) adotar intervalos de confiança para as curvas de regularização, de modo a abranger um certo grau de incerteza para a curva devido às oscilações naturais das séries de vazões.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL. **SIGA ANEEL**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/siga>>. Acesso em: 2 abr. 2020. Citado 1 vez na página 17.
- BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C. **Time Series Analysis**. Nova Jersey, EUA: John Wiley Sons, 2008. 4ª edição. Citado 2 vezes nas páginas 40, 41, 45, 48–50.
- BRISCOE, J. Making reform happen in water policy: Reflections from a practitioner. In: OEDC CONFERENCE CENTRE. Citado 1 vez na página 17.
- BROWN, Morton B.; FORSYTHE, Alan B. Robust Tests for the Equality of Variances. **Journal of the American Statistical Association**, v. 69, n. 346, p. 364–367, jun. 1974. Citado 1 vez na página 50.
- CANAMBRA, ENGINEERING CONSULTANTS. **Power Study of South Brazil**. v. 17. Curitiba - PR: 1969. Citado 2 vezes nas páginas 23, 58.
- CARVALHO, A. R. L. de. **Reservatórios de regularização de usinas hidrelétricas: contribuição para uma matriz energética mais limpa**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Citado 6 vezes nas páginas 18, 21–23, 25, 26.
- CCEE. **Estudo sobre custo da energia de fontes renováveis – 2015 a 2019**. Câmara de Comercialização de energia Elétrica, 2020. Disponível em: <<https://encurtador.com.br/eAGT3>>. Acesso em: 6 dez. 2020. Citado 1 vez na página 26.
- CHAPRA, S. **Surface Water-Quality Modeling**. Illinois: Waveland Press, Inc, jan. 1997. v. 1, p. 844. Citado 1 vez na página 41.
- DEGRAF, H; CARVALHO, J.; SANTOS, L. S. **Geração de energia hídrica complementar, sistemas de abastecimento e usinas hidrelétricas reversíveis: uma contribuição visando à sustentabilidade**. 2018. Monografia (Trabalho Final de Curso) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR. Citado 1 vez na página 24.
- DETZEL, D. **Modelagem de séries hidrológicas: uma abordagem de múltiplas escalas temporais**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR. Citado 5 vezes nas páginas 40–43, 60.
- DETZEL, D.; BESSA, M. R. et al. **Estacionariedade das Afluências às Usinas Hidrelétricas Brasileiras**. **RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, RS, v. 16, n. 3, jul. 2011. Citado 1 vez na página 57.

DETZEL, D.; MARTINI, R. F. et al. Acerca do período crítico das usinas hidrelétricas brasileiras. **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, v. XXIII, nov. 2019. Citado 3 vezes nas páginas 53, 58, 80.

DETZEL, D.; MINE, M. Abatimento na assimetria de séries sintéticas de vazão como consequência da remoção de tendências. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Brasília - DF, nov. 2015. Citado 1 vez na página 57.

DEVORE, J. L. **Probability Statistics for Engineering and Sciences**. California, EUA: Cengage Learning, 2011. 8ª edição. Citado 1 vez na página 62.

BERTONE, A. C. et al. Accumulation and run-of-the-river hydropower plants: a study case of the brazilian hydroenergetic system. 38th IAHR World Congress, set. 2019. Citado 1 vez na página 18.

EHSANI, N. et al. Reservoir operations under climate change: Storage capacity options to mitigate risk. **Journal of Hydrology**, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169417305991>>. Citado 3 vez na página 25.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2019**. Rio de Janeiro, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 21, 22.

\_\_\_\_\_. **Estudos de planejamento da expansão da geração: Identificação e Classificação de Potenciais Reservatórios de Regularização no SIN**. Rio de Janeiro, 2015. Citado 2 vez na página 18.

FILL, H. D. Análise da série temporal das cheias do rio Iguacu. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Anais**, Florianópolis, SC, 2017. Citado 1 vez na página 64.

\_\_\_\_\_. Estudos Energéticos. *Water Resources Research*, v. 67, p. 27–60, 1979. Citado 1 vez na página 59.

\_\_\_\_\_. Método da energia natural como técnica de simulação em estudos energéticos. **Revista Técnica do Instituto de Engenharia do Paraná**, Curitiba - PR, v. 20, p. 38–44, 1980. Citado 2 vezes nas páginas 58, 60.

FLEMING, S. W.; WEBER, F. A. Detection of long-term change in hydroelectric reservoir inflows: Bridging theory and practise. **Journal of Hydrology**, v. 470-471, p. 36–54, 2012. Citado 1 vez na página 55.

GOMIDE, F. L. S. Sobre reservatórios e segurança hídrica. GMD : Organização industrial e Engenharia. 2012. Disponível em: <[http://enercons.com.br/restrito/site-abrapch/sobre\\_reservatorios\\_e\\_seguranca\\_hidrica.pdf](http://enercons.com.br/restrito/site-abrapch/sobre_reservatorios_e_seguranca_hidrica.pdf)>. Citado 1 vez na página 18.

- GOMIDE, F. L. S. **Teoria estocástica dos reservatórios aplicada ao planejamento energético de sistemas hidrelétricos**. 1986. Tese (Titular) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR. Citado 3 vezes nas páginas 32, 36, 60.
- HILLIER F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2001. 7ª edição, p. 608. Citado 1 vez na página 41.
- HIPPEL, K. W.; MCLEOD, A. I. **Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems**. Amsterdam, Holanda: Elsevier, 1994. 2ª edição. Citado 1 vez na página 41.
- KURIA, F.; VOGEL, R. M. Global Storage-Reliability-Yield Relationships for Water Supply Reservoirs. **Water Management Resources**, p. 1591–1605, mar. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 32, 82.
- ITAIPIU. **COMPARAÇÕES**. Foz do Iguaçu: 2019. Citado 1 vez na página 25.
- IEA. **Key World Energy Statistics 2019**. 2019. Citado 1 vez na página 25.
- KENDALL, M. **Non-parametric tests against trend**. Charles Griffin, San Francisco: Econometrica, 1975. 4ª edição. Citado 1 vez na página 54.
- KOUTSOYIANNIS, D. Nonstationarity versus scalin in hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 324, p. 239–254, jun. 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169405004890>>. Citado 1 vez nas páginas 40, 42.
- KURIA, F.; VOGEL, R. M. Uncertainty analysis for water supply reservoir yields. **Journal of Hydrology**, v. 529, p. 257–264, jul. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415005223?via%5C%3Dihub>>. Citado 1 vez na página 32.
- LI, W. K.; MCLEOD, A. I. Distribution of the Residual Autocorrelations in Multivariate ARMA Time Series Models. **Journal of The Royal Statistical Society, Series B**, v. 43, n. 2, p. 231–239, nov. 1981. Citado 1 vez na página 50.
- LOUCKS, D.; BEEK, E. Van. **Water Resource Systems Planning and Management**. Switzerland: Springer, 2017. Citado 1 vez na página 27.
- MANN, H. B. Non-parametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, p. 245–259, 1945. Citado 1 vez na página 54.
- MARTINI FILHO, L. R. **A hybrid ARIMA and ann model for sythetic streamflow generation**. 2019. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR. Citado 1 vez na página 54.
- MCMAHON, T.A.; ADELOYE, A. J. Water Resources Yield. **Water Resources Publication**, p. 220, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 32, 33.

MILLY, P. C. D. et al. Stationarity Is Dead: Whither Water Management? **Science**, v. 319, p. 573–574, fev. 2008. Disponível em: <<https://science.sciencemag.org/content/319/5863/573.full>>. Citado 1 vez na página 38.

MINE, M. et al. **CLARIS LPB Project: Patial Report 02**. CLARIS, 2009. Citado 1 vez na página 57.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M.C. **Análise de séries temporais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA., 2004. Citado 11 vezes nas páginas 37, 39, 41–45, 49.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 34, 35, 38.

NEIRA, K. L. **Curvas de regularização para reservatórios parcialmente cheios e confiabilidade constante**. 2005. Dissertação (Tese em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR. Citado 8 vezes nas páginas 28, 29, 31, 32, 59, 60.

ONS. **ONS Hidrelétricas do SIN**. Operador Nacional do Sistema, 2020. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 2 nov. 2020. Citado 1 vez na página 23.

\_\_\_\_\_. **Plano de Operação Energética 2019 - Sumário Executivo**. 2019. Citado 4 vezes nas páginas 30, 31, 53, 80.

\_\_\_\_\_. **Procedimentos de Rede, submódulo 7.7: Metodologia de cálculo da energia e da potência asseguradas de usinas despachadas centralizadamente**. Revisão 0.3. 2008. Citado 1 vez na página 52.

PESSOA, L. M. de N. Filho. **Estudo da variabilidade e previsibilidade das chuvas e vazões sazonais na Bacia do Rio Iguaçu**. 2013. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR. Citado 1 vez na página 60.

PETHERAM, C.; GALLANT, J.; READ, A. An automated and rapid method for identifying dam wall locations and estimating yield over large areas. **Environment Modelling Software**, Elsevier, v. 92, p. 189–201, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.016>>. Citado 1 vez na página 32.

PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the changepoint problem. **Applied Statistics**, v. 28, p. 126–135, 1979. Citado 1 vez na página 54.

RIPPL, W. **The capacity of storage reservoir for water supply**. v. 71. Proceedings Institution of Civil Engineers: 1883. p. 270–278. Citado 1 vez na página 26.

SALAS, J. D. et al. **Applied Modeling of hydrologic time series**. Littleton, Colorado, EUA: Water Resources Publications, 1980. 1ª edição. Citado 4 vezes nas páginas 35, 37, 39, 50.

SCHWARTZ, G. Estimating the Dimension of a Model. **The Annals of Mathematical Statistical**, v. 6, n. 2, p. 461–464, 1978. Citado 1 vez na página 50.

SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 231–239, nov. 1968. Citado 1 vez na página 57.

SERINALDI F; KILSBY, C. G. Stationarity is undead: Uncertainty dominates the distribution of extremes. **Journal of Hydrology**, v. 77, p. 17–36, mar. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170815000020>>. Citado 1 vez na página 39.

STORCH, V.; NAVARRA, A. **Analysis of Climate Variability: applications of statistical techniques**. Berlin: Springer, 1999. 2ª edição. Citado 1 vez na página 55.

VOGEL, R. M.; STEDINGER, J. R. Generalized Reservoir-Storage-Yield Relationships. **Journal of Hydrology**, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterda, v. 89, p. 303–327, 1987. Citado 2 vezes nas páginas 27, 58.

YESTE, P. et al. Climate-driven trends in the streamow records of a reference hydrologic network in Southern Spain. **Journal of Hydrology**, v. 566, p. 55–72, ago. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydro1.2018.08.063>>. Citado 1 vez na página 38.