UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ADEMILSON ARAUJO SABINO

VERIFICAÇÃO DO IMPACTO DE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS NO REGIME HIDROLÓGICO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS UTILIZANDO O *SOFTWARE IHA*

CURITIBA

2017

ADEMILSON ARAUJO SABINO

VERIFICAÇÃO DO IMPACTO DE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS NO REGIME HIDROLÓGICO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS UTILIZANDO O *SOFTWARE IHA*

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientadora: Prof.ª Drª. Miriam Rita Moro Mine

CURITIBA

2017

SA116v Sabino, Ademilson Araujo
Verificação do impacto de reservatórios de usinas hidrelétricas no regime hidrológico de bacias hidrográficas utilizando o Software IHA / Ademilson Araujo Sabino. – Curitiba, 2017.
108 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2017.

Orientadora: Miriam Rita Moro Mine.

1.Software IHA. 2. Curva de permanência de vazões. 3. Gestão de recursos hídricos.
4. Ecossistema fluvial. I. Universidade Federal do Paraná. II. Mine, Miriam Rita Moro. III. Título.

CDD: 551.48

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL
Código CAPES: 40001016021P0

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 **ADEMILSON ARAUJO SABINO**, intitulada: ""**VERIFICAÇÃO DO IMPACTO DE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS NO REGIME HIDROLÓGICO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS UTILIZANDO O SOFTWARE IHA**"", após terem inquirido o aluno e realizado 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, 22 de Dezembro de 2017.

MIRIAM RITA MORO MINE
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

DANIEL HENRIQUE MARCO DETZEL
Avaliador Interno (UFPR)

ELOY KAVISKI
Avaliador Interno (UFPR)

MAURICIO FELGA GOBBI
Avaliador Externo (UFPR)

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus que permite com que vivamos e nos criou para fazer tudo para honra e glória dele. Dedico este trabalho a minha família (Mayara, João, Marcilene, Edilson, Sthefany, Vânia e Irio), que sempre me incentivou e me amou incondicionalmente. Dedico esta dissertação a todas as pessoas que direta ou indiretamente me apoiaram no desenvolvimento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e a misericórdia da salvação manifestada a todos os homens em Jesus Cristo.

Agradeço a minha namorada (Mayara Torres) pelo companheirismo, por suportar cada dificuldade juntamente comigo, por me auxiliar em todos os momentos e pelo seu amor.

Agradeço a minha família (João, Marcilene, Mayara, Edilson, Sthefany, Vânia e Írio) pelo grande amor dedicado em cada etapa da minha vida, pelo cuidado, amor e carinho.

Agradeço minha orientadora Miriam Rita Moro Mine pela paciência, orientação, confiança, dedicação e grande empenho para que este trabalho pudesse ser realizado.

Aos Professores Daniel Henrique Marco Detzel, Eloy Kaviski e Ibraim Fantin pelo grande apoio dado no desenvolvimento deste trabalho, agradeço pelas orientações e pela paciência no esclarecimento das dúvidas suscitadas.

Aos amigos e professores do departamento de Hidráulica e Saneamento, em especial aos colegas de sala.

Agradeço a todas as pessoas que de alguma forma fizeram parte da concretização deste trabalho.

O Senhor é meu Pastor; nada me faltará.
Ele me faz repousar em pastos verdejantes.
Leva-me para junto das águas de descanso; refrigera-me a alma.
Guia-me pelas veredas da justiça por amor do seu nome.
Ainda que eu ande pelo vale da sombra da morte, não temerei mal nenhum, porque tu estás comigo; o teu bordão e teu cajado me consolam.
Preparas-me uma mesa na presença dos meus adversários, unges-me a cabeça com óleo;
o meu cálice transborda.
Bondade e misericórdia certamente me seguirão todos os dias da minha vida;
e habitarei na Casa do Senhor para todo o sempre. (Salmos 23)

RESUMO

Em estudos hidrológicos a questão ambiental de um rio está intimamente ligada ao regime de vazões, com enchentes, cheias, vazantes e secas. O regime hidrológico de um rio interage com processos geoquímicos e ecológicos do ecossistema fluvial. A presença de estruturas hidráulicas no rio pode causar inevitavelmente alteração hidrológica no regime de vazões com consequências presentes a montante e a jusante da estrutura. Diante desse contexto, buscou-se contribuir para um melhor entendimento das ferramentas disponíveis para avaliação de impactos de reservatórios de usinas hidrelétricas, mais especificamente na compreensão da capacidade do *software Indicators of Hydrological Alteration* (*IHA*) em identificar e quantificar os impactos ocasionados pela presença e operação de reservatórios no regime hidrológico. Para o desenvolvimento do estudo foram utilizados os regimes de vazões naturalizadas (pré-impacto) e defluentes (pós-impacto) a jusante dos reservatórios da UHE Manso e da UHE Passo Fundo. Foram analisados os 31 parâmetros presentes no *software IHA*. Posteriormente foram verificados os parâmetros significativamente alterados com a aplicação do teste de Wilcoxon pareado e, por fim, a comparação das Curvas de Permanência de Vazões com o teste de Kolmogorov-Smirnov. Os resultados do teste de Wilcoxon pareado mostraram que houve alteração significativa de 26 indicadores hidrológicos pelo reservatório da UHE Manso (vazão média de outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, maio, junho, agosto, e setembro; vazão máxima de 1, 3, 7, 30 e 90 dias; data juliana mínima; número de pulsos altos e baixos; duração dos pulsos altos; taxa de ascenção e recessão; vazão mínima de 1, 3, 7, 30 e 90 dias). Para o reservatório da UHE Passo Fundo houve alteração significativa de 10 indicadores hidrológicos (vazão mínima de 1, 30, 90 dias; vazão máxima de 3, 7 e 30 dias; duração dos pulsos baixos; número de pulsos altos e baixos). A aplicação do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov indicou que houve diferenças significativas para as curvas de permanência de vazão da UHE Manso e da UHE Passo Fundo. Conclui-se que o número de alterações hidrológicas identificadas pode estar atrelado ao nível de regularização dos reservatórios e às manobras operacionais para máxima produtividade. A utilização do *IHA* apresentou-se como ferramenta fundamental no avanço e no desenvolvimento de estudos que objetivam avaliar alterações hidrológicas de ações antrópicas. Os resultados dos estudos possibilitam um melhor entendimento do efeito de reservatórios de regularização no regime hidrológico de bacias hidrográficas e a possibilidade de adoção de estratégias de gestão de recursos hídricos para amenizar os impactos das alterações hidrológicas.

Palavras-chave: *Software IHA*, Curva de Permanência de Vazões, alterações hidrológicas, ecossistema fluvial, gestão de recursos hídricos.

ABSTRACT

In hydrological studies the environmental question of a river is closely linked to the flow regime, with floods, recesses and droughs. The hydrological regime of a river interacts with geochemical and ecological processes of the fluvial ecosystem. The presence of hydraulic structures in the river can inevitably cause hydrological alteration in the flow regime with consequences presents upstream and downstream of the structure. In this context, this work contributes to a better understanding of the tools available to evaluate the impacts of hydroelectric reservoirs, specifically in understanding the capacity of the *Indicators of Hydrological Alteration* software to identify and quantify the impacts caused by the presence and operation of reservoirs in the hydrological regime. For the development of the study, were used the naturalized (pre-impact) and defluent (post-impact) flow regimes downstream of the reservoirs of Manso hydropower plants and Passo Fundo hydropower plants. Were analyzed the 31 parameters present in the *IHA* software. Afterwards the parameters significantly altered were identified with the application of the paired Wilcoxon test and finally the comparison of the Flow-duration curve with the Kolmogorov-Smirnov test. The results of the paired Wilcoxon test showed that there were significant changes of 26 hydrological indicators by the Manso hydropower reservoir (average flow of October, November, December, January, February, May, June, August and September; maximum flow of 1, 3, 7 , 30 and 90 days; minimum julian data; number of high and low pulses; duration of high pulses; ascent and recession rate; minimum flow of 1, 3, 7, 30 and 90 days); For the Passo Fundo hydropower plant significant change of 10 hydrological indicators (Minimum flow of 1, 30, 90 days, maximum flow of 3, 7 and 30 days, duration of low pulses, number of pulses high and low). The application of the Kolmogorov-Smirnov goodness of fit test indicated that there were significant differences for the flow duration curves of the Manso hydropower plant and the Passo Fundo hydropower plant. It is concluded that the number of hydrological alterations identified can be linked to the level of reservoir regularization and operational maneuvers for maximum productivity. The use of the *IHA* was presented as a fundamental tool in the advancement and development of studies that aim to evaluate hydrological alterations of anthropic actions. The results of the studies allow a better understanding of the effect of regularization reservoirs in the hydrological regime of hydrographic basins and the possibility of adopting strategies of management of water resources to mitigate the impacts of hydrological alterations.

Key-words: *IHA* software, Flow Duration Curve, hydrological changes, river ecosystem, water resources management.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - BALANÇO DAS DIVERSAS ETAPAS DO PROCESSO ENERGÉTICO. 18
FIGURA 2 - MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA (2016). 20
FIGURA 3 - ACRÉSCIMO ANUAL DA CAPACIDADE INSTALADA POR FONTE. ..23
FIGURA 4 - ACRÉSCIMO DA CAPACIDADE INSTALADA HIDRELÉTRICA. 24
FIGURA 5 - PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM RESERVATÓRIO. 27
FIGURA 6 - CURVAS-GUIA DE RESERVATÓRIO DE MÚLTIPLOS USOS 31
FIGURA 7 - CLASSIFICAÇÃO DE IMPACTOS DECORRENTES DE RESERVATÓRIO. 36
FIGURA 8 - LOCALIZAÇÃO DA UHE MANSO 68
FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DA UHE PASSO FUNDO. 71
FIGURA 10 - VAZÕES NATURALIZADAS DO RIO MANSO A JUSANTE DO RESERVATÓRIO DA UHE MANSO. 72
FIGURA 11 - VAZÕES DEFLUENTES DO RIO MANSO A JUSANTE DO RESERVATÓRIO DA UHE MANSO. 73
FIGURA 12 - CURVAS DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES DO RIO MANSO. 79
FIGURA 13 - VAZÕES NATURALIZADAS DO RIO PASSO FUNDO A JUSANTE DO RESERVATÓRIO DA UHE PASSO FUNDO. 80
FIGURA 14 - VAZÕES DEFLUENTES DO RIO PASSO FUNDO A JUSANTE DO RESERVATÓRIO DA UHE PASSO FUNDO. 80
FIGURA 15 - CURVAS DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES DA UHE PASSO FUNDO 87

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - EMPREENDIMENTOS HIDRELÉTRICOS EM OPERAÇÃO, CONSTRUÇÃO E EM PROJETO NO ANO DE 2017.....21
TABELA 2 - EXPANSÃO HIDRELÉTRICA PREVISTA PARA O PERÍODO DE 2015 - 2024. 22
TABELA 3 - PREVISÃO EM INVESTIMENTOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA. ..25
TABELA 4 - SUMÁRIO DOS INDICADORES HIDROLÓGICOS USADOS PELO MÉTODO DO *IHA* E SUAS INFLUÊNCIAS NO ECOSSISTEMA (CONTINUA). 57
TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DA UHE MANSO. 65
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DA UHE PASSO FUNDO. 69
TABELA 7 - RESULTADO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS BÁSICAS.....74
TABELA 8 - VALORES DOS PERCENTIS DE 25% E 75% DAS VAZÕES NATURALIZADAS E DEFLUENTES DO RIO MANSO 75
TABELA 9 - INDICADORES DE ALTERAÇÃO HIDROLÓGICA DOS REGIMES NATURAL E DEFLUENTE DO RIO MANSO 77
TABELA 10 - RESULTADO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS BÁSICAS. 81
TABELA 11 - VALORES DOS PERCENTIS DE 25% E 75% DAS VAZÕES NATURALIZADAS E DEFLUENTES DO RIO PASSO FUNDO. 83
TABELA 12 - INDICADORES DE ALTERAÇÃO HIDROLÓGICA DOS REGIMES NATURAL E REGULARIZADO DO RIO PASSO FUNDO.....85

LISTA DE SIGLAS

ANA	–	AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS
CGH	–	CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS
CPRM	–	COMPANIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS
CPV	–	CURVAS DE PERMANÊNCIA DE VAZÃO
EFC	–	*ENVIRONMENTAL FLOW COMPONENTS*
IHA	–	*INDICATORS OF HYDROLOGICAL ALTERATION*
ONS	–	OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO
PCH	–	PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA
RVA	–	*RANGE VARIABILITY APPROPRIATED*
UHE	–	USINA HIDRELÉTRICA

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 13

1. A GERAÇÃO HIDRÁULICA NO BRASIL: CONTEXTUALIZAÇÃO 17

1.1 CENÁRIO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS DOS EMPREENDIMENTOS HIDRELÉTRICOS 17

1.2 RESERVATÓRIOS DE EMPREENDIMENTOS HIDRELÉTRICOS 25

1.3 OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS 30

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 34

2.1 IMPACTOS DE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS NO REGIME HIDROLÓGICO 34

2.2 *SOFTWARE IHA (INDICATORS OF HYDROLOGIC ALTERATION*) 41

2.3 APLICAÇÕES DO *SOFTWARE IHA* 46

3. MÉTODOS 53

3.1 DADOS DE VAZÃO 53

3.2 *SOFTWARE IHA (INDICATORS OF HYDROLOGIC ALTERATION)* 54

3.2.1 Indicadores de alteração hidrológica 54

3.2.2 Parâmetros do IHA 55

3.2.3 Curva de permanência de vazão 58

3.3 AVALIAÇÃO DA ALTERAÇÃO HIDROLÓGICA 59

3.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS SIGNIFICATIVAMENTE ALTERADOS 60

3.5 COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES “PRÉ E PÓS-IMPACTO” 61

3.6 SÍNTESE DO MÉTODO UTILIZADO 62

4. ESTUDO DE CASO 64

4.1 UHE MANSO 64

4.2 UHE PASSO FUNDO 68

5. RESULTADOS....72
5.1 UHE MANSO....72
5.1.1 Caracterização dos regimes....72
5.1.2 Alterações hidrológicas....73
5.1.3 Indicadores significativamente alterados....78
5.1.4 Comparação das curvas de permanência de vazão....78
5.2 UHE PASSO FUNDO....80
5.2.1 Caracterização dos regimes....80
5.2.2 Alterações hidrológicas....81
5.2.3 Indicadores significativamente alterados....86
5.2.4 Comparação das curvas de permanência de vazão....86
6. DISCUSSÃO....88
6.1 UHE MANSO....88
6.1.1 Parâmetros significativamente alterados....88
6.1.2 Análise das Curvas de Permanência de Vazões (CPV)....91
6.1.3 Impacto no ecossistema a jusante da UHE Manso....91
6.2 UHE PASSO FUNDO....93
6.2.1 Parâmetros significativamente alterados....93
6.2.2 Análise das Curvas de Permanência de Vazões (CPV)....94
6.2.3 Impacto no ecossistema a jusante da UHE Passo Fundo....95
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES....97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS....100

INTRODUÇÃO

O Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica que responde por 65,2% da oferta interna. As fontes renováveis representam 74,6% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (EPE, 2015).

Atualmente, a energia hidráulica é a fonte que mais contribui para o suprimento de energia elétrica no Brasil (EPE, 2015). A energia hidráulica transformada em energia elétrica tem sido um dos usos mais frequentes dos recursos hídricos. As hidrelétricas utilizam barragens para regularizar a vazão e criar o desnível para maximizar a produção de energia. A construção de barragens permite represar a vazão afluente à usina, propiciando a formação de um reservatório, o qual garantirá a queda de água para a operação das turbinas, resultando na geração de energia elétrica.

Diante desse contexto, a instalação de empreendimentos hidráulicos que contenham reservatórios de grande dimensão tornou-se dificultada, pois o potencial hidrelétrico a ser instalado passa por restrições ambientais, geográficas, técnicas, econômicas, sociais e públicas.

A dificuldade em instalar empreendimentos com grandes reservatórios decorre dos impactos ambientais ocasionados em diversos níveis e etapas da construção, desde as intervenções iniciais no ambiente até o pleno funcionamento dos mesmos. Empreendimentos hidrelétricos produzem os mais diferentes tipos de impactos, o que gera cada vez mais polêmica e fomenta o avanço das discussões sobre desenvolvimento sustentável (ZERLOTTI, 2011).

Em estudos hidrológicos a questão ambiental de um rio está intimamente ligada ao regime de vazões, com enchentes, cheias, vazantes e secas. O regime hidrológico de um rio interage com processos geoquímicos e ecológicos do ecossistema aquático. A presença de estruturas hidráulicas no rio pode causar inevitavelmente alteração hidrológica no regime de vazões com consequências presentes a montante e a jusante da estrutura. Segundo Rosenberg et al. (1997), alteração hidrológica pode ser conceituada como “qualquer perturbação antrópica na magnitude ou tempo de ocorrência das vazões naturais dos rios”.

Segundo Richter et al. (1998), a formação e operação de reservatórios são os principais responsáveis pela alteração dos padrões hidrológicos. O desenvolvimento e a utilização de recursos hídricos pelos seres humanos têm alterado a vazão natural de rios ao redor do mundo (RICHITER et al., 1997).

As alterações hidrológicas têm o potencial de comprometer sistemas ecológicos, como a dessincronização dos ciclos de vida, a perda da conectividade entre os sistemas, a invasão de espécies exóticas, a limitação da dispersão, gerando perda da biodiversidade e suas interações (RENÖFALT et al., 2010).

A alteração do regime de vazões dos rios impacta de forma direta e indireta os ecossistemas aquáticos, atingindo de forma negativa os usos requeridos pela população residente a jusante dos empreendimentos hidráulicos, pois o impacto pode ser verificado na diminuição dos serviços ambientais disponíveis do local (IUCN, 2005).

Atualmente, o conhecimento dos impactos provocados por reservatórios está restrito a poucos tipos de abordagens e direcionamentos. A reduzida quantidade de informações sobre o impacto que as barragens exercem no regime hidrológico de bacias hidrográficas dificulta o estabelecimento de estratégias e metas para a gestão dos recursos hídricos (GRAFF, 2006; CHEN et al., 2015; MANTEL et al., 2010).

Um dos métodos mais utilizados para identificação da alteração dos padrões hidrológicos é o *software Indicators of Hydrologic Alteration* (*IHA*), que compara 32 parâmetros da série de vazões, que pode ser dividida em duas partes: pré-impacto e pós-impacto, que são os períodos referentes, respectivamente, ao período anterior à instalação do empreendimento e ao período posterior à instalação do empreendimento (RICHTER et al., 1997). Autores como Richter et al., (1997), Cruz (2012), Frederice (2014), Opperman (2006a) utilizaram o *IHA* para identificação e quantificação das alterações em padrões hidrológicos no desenvolvimento de suas pesquisas.

O *IHA* é um *software* que fornece informações úteis para aqueles que tentam compreender os impactos hidrológicos das atividades humanas ou tentam obter recomendações de vazão ambiental para gestores de recursos hídricos (OPPERMAN, 2006b).

Dentro da abordagem da engenharia de recursos hídricos encontra-se o desenvolvimento de estudos do impacto da implantação de estruturas hidráulicas, como reservatórios de empreendimentos hidrelétricos. Nesse sentido, são de suma

importância a avaliação e quantificação dos efeitos gerados por estas estruturas de geração de energia elétrica.

Dessa forma, devido ao aumento do número de empreendimentos hidrelétricos e à importância que a utilização de reservatórios têm no cenário energético atual, este trabalho almeja contribuir no melhor entendimento das ferramentas disponíveis para avaliação de impactos de reservatórios de usinas hidrelétricas, mais especificamente na compreensão da capacidade do *software IHA* em identificar e quantificar os potenciais impactos causados pela presença e operação dos reservatórios no regime hidrológico de bacias hidrográficas.

OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral desta dissertação é a identificação e quantificação dos impactos causados pelos reservatórios de usinas hidrelétricas no regime hidrológico de bacias hidrográficas, por meio da utilização do *software IHA e de* ferramentas estatísticas auxiliares. Com o desenvolvimento desta dissertação busca-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

i) Apresentar uma contextualização da geração hidráulica no Brasil.

ii) Desenvolver uma revisão bibliográfica sobre impactos de reservatórios de empreendimentos hidrelétricos no regime hidrológico de bacias hidrográficas.

iii) Expor uma revisão bibliográfica sobre a aplicação do *software IHA* em estudos hidrológicos.

iv) Descrever o *software* “Identificadores de Alteração Hidrológica” (*IHA*, sigla em inglês).

v) Avaliar possíveis alterações no regime hidrológico de bacias hidrográficas devido aos reservatórios da UHE Manso e UHE Passo Fundo, presentes nas regiões hidrográficas da bacia Paraguai e do Uruguai, utilizando o *software IHA*.

HIPÓTESES DA DISSERTAÇÃO

A realização da presente dissertação servirá como base para avaliar se as seguintes hipóteses serão validadas ou refutadas:

i) Os reservatórios de regularização de usinas hidrelétricas em rios podem alterar o regime hidrológico e impactar de forma significativa os componentes do regime hidrológico ligados aos fatores ambientais.

ii) O *IHA* apresenta-se como ferramenta adequada para avaliação e quantificação dos impactos decorrentes da alteração do regime hidrológico de rios.

iii) Os reservatórios de usinas hidrelétricas apresentam-se como empreendimentos que devem ser monitorados por autoridades ambientais quanto ao potencial efeito impactante no regime hidrológico e, por consequência, nos fatores ambientais.

iv) A utilização do *IHA* e de ferramentas estatísticas auxiliares promovem uma melhor abordagem para compreensão dos efeitos provenientes da alteração do regime hidrológico de rios.

ESTRUTURA DO TRABALHO

O desenvolvimento da presente dissertação é realizado em seis capítulos, além da introdução, conclusões e recomendações. No capítulo 1 são abordados os conceitos e fundamentação teórica envolvidos no desenvolvimento do trabalho, a fim de conceituar os princípios básicos para a compreensão das próximas etapas do trabalho. No capítulo 2 é abordada a revisão bibliográfica dos principais trabalhos que aplicaram o *IHA* para avaliação de alteração hidrológica e os impactos hidrológicos provenientes de reservatórios de empreendimentos hidrelétricos. No capítulo 3 são apresentados os métodos utilizados para o desenvolvimento do estudo e os procedimentos envolvidos. No capítulo 4 é apresentado o estudo de caso, os locais escolhidos e as características das regiões, as quais os empreendimentos pertencem. No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos no estudo, contendo as principais informações oriundas da aplicação do *IHA* e das ferramentas estatísticas auxiliares. No capítulo 6 é apresentada a discussão dos resultados obtidos, por meio da comparação com outros estudos desenvolvidos por autores da área de pesquisa. Por fim, são apresentadas as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento do estudo e as recomendações para trabalhos futuros.

1. A GERAÇÃO HIDRÁULICA NO BRASIL: CONTEXTUALIZAÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo esclarecer conceitos iniciais sobre a energia hidráulica, o contexto dos reservatórios de empreendimentos hidrelétricos e as perspectivas atuais e futuras das usinas hidrelétricas. A abordagem é realizada por meio de informações básicas e esclarecimentos abrangentes do escopo do trabalho. O conteúdo abordado foi dividido em subcapítulos.

Na primeira parte é apresentado o cenário atual e perspectivas futuras dos empreendimentos hidrelétricos, por meio de dados elaborados por agências e estudos específicos do setor hidrelétrico, permitindo uma visão geral da participação da energia hidráulica na economia brasileira e sua importância para manutenção do desenvolvimento nacional.

Na segunda parte são abordados os conceitos gerais de reservatórios de empreendimentos hidrelétricos, as definições, suas diferentes concepções e classificações gerais. Na terceira parte são apresentados alguns conceitos relacionados à operação de reservatórios.

1.1 CENÁRIO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS DOS EMPREENDIMENTOS HIDRELÉTRICOS

Para o pleno desenvolvimento de uma nação é imprescindível que o setor energético supra de maneira plena as atividades que demandem esse recurso essencial. O crescimento econômico de uma nação vem acompanhado de consumo de insumos essenciais, dentre eles destaca-se a energia. Os setores industriais, comerciais e de serviços são dependentes da produção de energia para que possam desempenhar seu papel dentro do contexto econômico (PAULA, 2012).

O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer nação. Ele reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto à capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados, como automóveis, eletrodomésticos e eletroeletrônicos (EPE, 2017).

Segundo EPE (2017), a FIGURA 1 expressa o balanço das diversas etapas do processo energético: produção, transformação e consumo. A estrutura energética

permite a adequada configuração das variáveis físicas próprias do setor energético. Conforme a FIGURA 1, a estrutura geral do balanço é composta por quatro partes:

I. **Energia Primária**: Produtos energéticos providos pela natureza na sua forma direta, como petróleo, gás natural, carvão mineral, resíduos vegetais e animais, energia solar, eólica etc.

II. **Energia Secundária**: Produtos energéticos resultantes dos diferentes centros de transformação que têm como destino os diversos setores de consumo e eventualmente outro centro de transformação.

III. **Transformação**: O Setor Transformação agrupa todos os centros de transformação onde a energia que entra (primária e/ou secundária) se transforma em uma ou mais formas de energia secundária com suas correspondentes perdas na transformação.

IV. **Consumo Final:** Nesta parte se detalham os diferentes setores da atividade socioeconômica do país, para onde convergem as energias primária e secundária, configurando o Consumo Final de Energia.

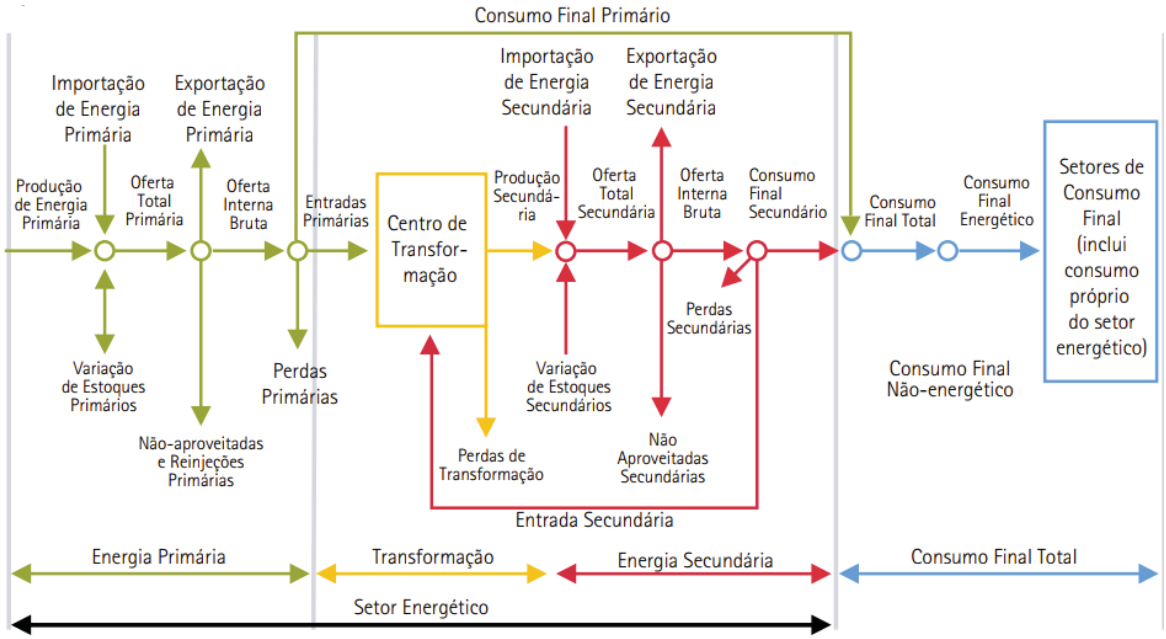

FIGURA 1 - BALANÇO DAS DIVERSAS ETAPAS DO PROCESSO ENERGÉTICO.

FONTE: Adaptado de EPE, 2017.

A produção de eletricidade abrange três segmentos principais, sendo eles: geração, transmissão e distribuição. No âmbito da geração, o objetivo está voltado à implantação de novas usinas. Na transmissão, à construção de novas interligações

entre os subsistemas, mas também o reforço de toda a malha da rede básica, em consonância com o aumento da carga e dos fluxos de energia. A distribuição envolve a instalação de equipamentos e a expansão da rede elétrica de média e baixa tensão, de acordo com a evolução do consumo final (TOLMASQUIM et al., 2007).

No Brasil, a matriz de geração elétrica é predominantemente renovável. Em 2015, a geração de energia hidráulica correspondeu a 65,2% da oferta de energia elétrica. A geração de energia elétrica de origem renovável é mais barata e menos emissora de gases de efeito estufa – principalmente se comparada com térmicas que utilizam combustível fóssil (EPE, 2016).

A matriz energética brasileira é centrada no uso da hidroeletricidade devido ao imenso potencial hídrico do país. O país chega a consumir cerca de 80% de eletricidade proveniente de hidroeletricidade. De acordo com MME (2017) a matriz de produção de energia elétrica em 2017 atingiu um pico de 82,8% de participação hidroelétrica no mês de fevereiro. Segundo ANEEL (2017), a capacidade instalada em 2014 foi de 89.193 MW, em 2015 foi de 91.650 MW e 2017 é de 98.739 MW.

De acordo com BEN (2017), a capacidade instalada no Brasil para a fonte hidrelétrica aumentou de 91.650 MW em 2015 para 96.925 MW em 2016, o que significa um aumento de 5,8% na capacidade instalada ao longo dos anos de 2015 e 2016. Em relação à geração distribuída, a fonte hidráulica em 2015 fechou em 0,8 MW e em 2016 com valor de 4,4 MW.

De acordo com BEN (2017), o Brasil possui um total 1267 empreendimentos hidrelétricos, totalizando 99.370.071 kW de potência instalada. Está prevista para os próximos anos uma adição de 4.805.180 kW na capacidade de geração hidrelétrica do país, provenientes dos 38 empreendimentos hidrelétricos atualmente em construção e mais 180 empreendimentos hidrelétricos em projetos.

A FIGURA 2 apresenta a matriz elétrica brasileira para o ano de 2016. A potência instalada era de 68,10% na matriz elétrica.

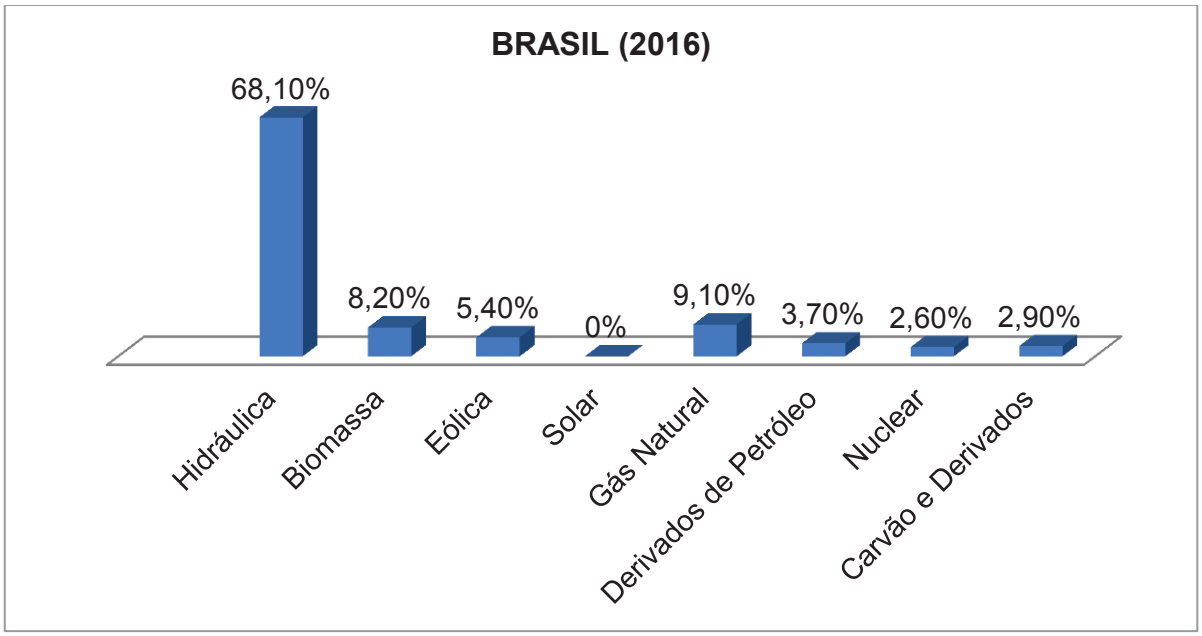

FIGURA 2 - MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA EM 2016.
FONTE: Adaptada de BEN (2017).

Para cumprir o acordado na 21ª Conferência das Partes (COP21) em Paris, o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005. Para tanto, o governo trabalha com a ampliação da oferta de energia hidráulica. O Plano Decenal de Energia 2024 prevê a implantação de 22 novas usinas hidrelétricas no horizonte decenal, o que aumentaria a capacidade de geração hidráulica de 90 GW para 117 GW, aproximadamente, de 2015 até 2024 (EPE, 2015).

O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2024), da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) prevê expansão de 55% na capacidade instalada de geração de energia no Brasil até 2024. O volume de investimentos previstos para essa expansão chega a R$ 1,4 trilhão nos próximos dez anos, dos quais 70% virão do setor de petróleo e gás, 27% do setor elétrico e cerca de 3% do setor de biocombustíveis.

A maior parte da expansão deverá vir de projetos de energia renovável. Dos 73 mil megawatts (MW) em novos empreendimentos, 62,1 mil MW serão de energias renováveis, sendo 27,2 mil MW de hidrelétricas.

A TABELA 1 é utilizada para mostrar os valores da situação dos empreendimentos hidrelétricos no cenário brasileiro. Os valores apresentados na tabela referem-se aos empreendimentos em operação, construção e em projetos.

TABELA 1 - EMPREENDIMENTOS HIDRELÉTRICOS EM OPERAÇÃO, CONSTRUÇÃO E EM PROJETO NO ANO DE 2017.

Empreendimentos em Operação

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada[(b)] (kW)	Potência Fiscalizada (kW)[(a)]	%
CGH	616	552.678	554.636	0,36
UHE	218	101.168.278	93.857.452	61,14
PCH	433	4.967.262	4.957.984	3,23

Empreendimentos em Construção

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	-	%
CGH	5	8.398	-	0,08
UHE	6	1.922.100	-	17,34
PCH's	27	370	-	3,37

Empreendimentos em Projeto

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	-	%
CGH	38	27.531	-	0,21
UHE	8	731.540	-	5,47
PCH's	130	1.703.870	-	13,03

CGH – Central Geradora Hidrelétrica
UHE – Usina Hidrelétrica
PCH - Pequena Central Hidrelétrica
(a) Potência Fiscalizada é igual a considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora.
(b) Potência Outorgada é igual a considerada no ato da outorga.
FONTE: ANEEL, 2017.

Com destaque nas bacias da região Norte e Centro-Oeste, os inventários hidrelétricos apresentam projetos importantes que poderão ser viabilizados nos próximos anos, acerca da crescente complexidade socioambiental que, normalmente, exige estágios de desenvolvimento extensos, além da redução da capacidade de armazenamento (ANDRADE, 2017).

A expansão hidrelétrica é composta por projetos já contratados e projetos cujos estudos estão em fase de conclusão. A TABELA 2 apresenta a lista de projetos que constam nesse cenário de expansão, para entrada em operação até 2024, no qual se destacam as usinas de Belo Monte e São Luiz do Tapajós, com 11.233 e

8.040 MW de potência total, respectivamente. Esses dois empreendimentos, somados, correspondem a 68% da expansão hidrelétrica (EPE, 2015).

TABELA 2 - EXPANSÃO HIDRELÉTRICA PREVISTA PARA O PERÍODO DE 2015 - 2024.

Entrada em Operação (Ano)[(b)]	Projeto	Rio	Potência (MW)[(a)]	Área do Reservatório (km²)
2015	UHE Teles Pires	Teles Pires	1.820	160
2016	UHE Belo Monte	Xingu	11.233	516 (fio d' água)
	UHE Colíder	Teles Pires	300	182,8
	UHE Salto Apiacás	Apiacás	45	89,6
	UHE São Roque	Canoas	135	45,8
2017	UHE Cachoeira Caldeirão	Araguari	219	55
	UHE Baixo Iguaçu	Iguaçu	350	35,36
2018	UHE São Manoel	Teles Pires	700	66
	UHE Sinop	Teles Pires	400	342
2019	UHE Itaocara I	Paraíba do Sul	150	Fio d'água
2021	UHE São Luiz do Tapajós[(c)]	Tapajós	8.040	729
	UHE Tabajara	Ji-paraná	350	96
2022	UHE Telêmaco	Borba Tibagi	118	84
2023	UHE Jatobá	Tapajós	2.338	643,3
2024	UHE Castanheira	Arinos	192	94,7 (fio d'água)
	UHE Bem Querer	Branco	708	559
Total			**28.349**	

Notas: (a) Potência total do empreendimento, em MW. No caso de usinas cuja motorização total não ocorre dentro do ano indicado, esta potência não corresponde à potência incorporada no ano.

(b) Ano esperado de início da operação do empreendimento segundo acompanhamento do DMSE – reunião de abril de 2015.

(c) Potência do empreendimento é a soma das casas de força principal e complementar (aproveitamento da água do reservatório principal).

FONTE: Adaptado de EPE (2015).

Segundo EPE (2015), os projetos de geração com concessão outorgada no passado não foram considerados no horizonte de estudo do Plano Decenal de Expansão de Energia, devido a problemas específicos a serem resolvidos para a

sua implantação. No entanto, permanecem sendo fiscalizados e acompanhados pela ANEEL, podendo compor a configuração dos futuros planos à medida que suas questões sejam equacionadas.

Os projetos hidrelétricos que constam neste plano somam 28.349 MW. No entanto, devido ao longo período de motorização de alguns empreendimentos de grande porte, esta capacidade total deverá estar disponível para atendimento ao SIN apenas no ano de 2027. A FIGURA 3 apresenta o acréscimo anual da capacidade instalada por fonte, de acordo com o gráfico, a viabilização desses empreendimentos acrescentará 74.099 MW até dezembro de 2024, cerca de 82% da sua capacidade instalada total..

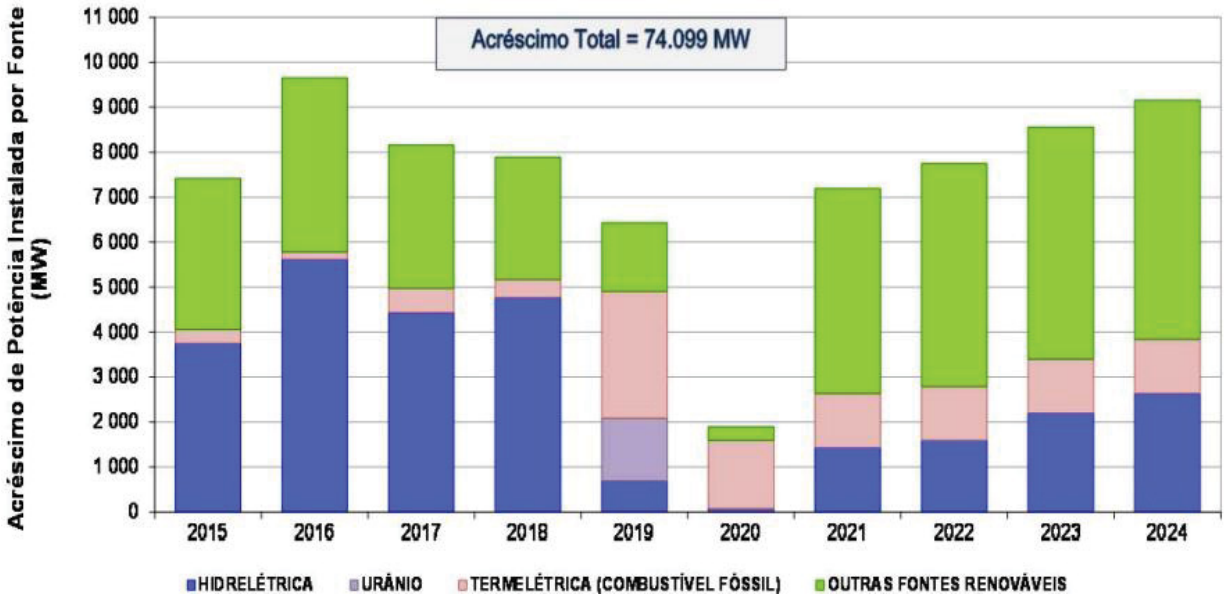

FIGURA 3 - ACRÉSCIMO ANUAL DA CAPACIDADE INSTALADA POR FONTE.
FONTE: EPE, 2015.

Na região Norte ocorrerá a maior expansão hidrelétrica, devido à entrada em operação de grandes empreendimentos. A FIGURA 4 apresenta o acréscimo anual de potência devido à expansão hidrelétrica considerando o cronograma de motorização previsto.

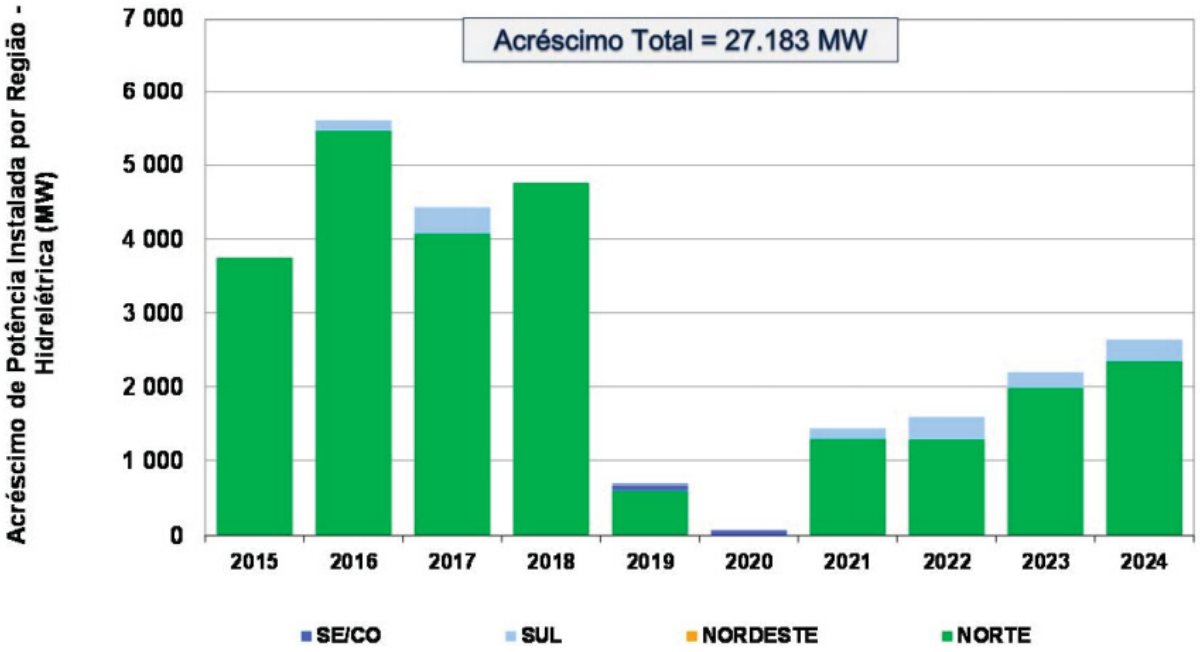

FIGURA 4 - ACRÉSCIMO DA CAPACIDADE INSTALADA HIDRELÉTRICA.
FONTE: EPE, 2015.

Além dos empreendimentos apresentados nesse PDE (2015 – 2024), os estudos de viabilidade de UHE aprovados ou com aceite da ANEEL, em maio de 2015, totalizavam aproximadamente 4.200 MW. Destaca-se que a geração hidrelétrica é uma tecnologia consagrada no país e seu preço médio nos últimos leilões de expansão do sistema tem sido baixo quando comparado com as outras fontes.

Levando em consideração o valor acumulado no período 2015-2024, a expansão da geração exigirá investimentos totais da ordem de R$ 268 bilhões. Deve-se ressaltar que grande parte destes investimentos refere-se às usinas já autorizadas, entre elas, as usinas com contratos assinados nos leilões de energia nova. O total que será investido em novas usinas, ainda não contratadas ou autorizadas (planejadas), é da ordem de R$ 165 bilhões, sendo, aproximadamente, 33% em hidrelétricas.

O aumento da oferta de energia elétrica no horizonte decenal estima a implantação de 22 usinas hidrelétricas (UHE's) distribuídas por quase todas as regiões do país, totalizando uma elevação de 28.349 MW na potência instalada do parque hidrelétrico brasileiro.

A TABELA 3 apresenta a previsão de investimentos para a geração de energia, considerando os tipos de fontes. Destacam-se na TABELA 3 as fontes hidráulicas, PCH, biomassa, eólica e solar.

O primeiro período do horizonte (2015-2019) é composto por usinas que já possuem Licença Prévia (LP), foram submetidas pela avaliação de sua viabilidade técnica, econômica e ambiental e pelo leilão de expansão da oferta de energia, estando em fase de implantação. Para esse período estão previstas 10 UHE's, que somam 15.352 MW de potência instalada. Para o segundo período (2020-2024) estão planejadas outras 12 UHE's, somando 12.997 MW (EPE, 2015).

TABELA 3 - PREVISÃO EM INVESTIMENTOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA.

Tipo de Fontes	**Usinas contratadas e autorizadas**		**Usinas planejadas**		**Total**	
	R$ bilhões	**%**	**R$ bilhões**	**%**	**R$ bilhões**	**%**
Hidráulica	18,3	17,6	54,8	33,2	73,1	27,2
PCH + Biomassa + Eólica+ Solar	59,3	57,3	96, 5	58,5	155,8	58,1
Termelétrica	26,0	25,1	13,6	8,3	39,6	14,7
Nuclear	11,0	10,6	-	-	11,0	4,1
Gás natural	12,7	12,3	13,6	8,3	26,3	9,8
Carvão	2,3	2,2	-	-	2,3	0,8
Óleo combustível/diesel	0,0	0,0	-	-	0,0	0,0
TOTAL	**103,6**		**164,9**		**268,5**	

Notas: Os investimentos abrangem as parcelas de desembolso que ocorrem no período decenal.
Data base: Maio/2015.
FONTE: EPE, 2015.

1.2 RESERVATÓRIOS DE EMPREENDIMENTOS HIDRELÉTRICOS

A sociedade utiliza a energia potencial advinda de quedas de água desde a antiguidade. As usinas hidrelétricas utilizam a energia disponível do escoamento em rios para produzir eletricidade. Desta forma, o potencial hidráulico existente em um

rio é propiciado pela vazão e pelos desníveis presentes ao longo do curso de um corpo hídrico. A equação 1 apresenta a fórmula do potencial hidráulico:

$$P_{(cv)} = \frac{Y.Q.Hm}{75.n} \quad . \tag{1}$$

Onde:

P: Potência (cv)

n: rendimento (%)

Y: peso específico do fluido (kgf/m³)

Q: vazão (m³/s)

Hm: Altura manométrica (m)

Segundo Brasil (2015), as usinas hidrelétricas também podem ser classificadas de acordo com a potência instalada, determinando-se se a usina é de grande, médio ou de pequeno porte. A classificação de acordo com a legislação vigente brasileira é: Centrais Geradoras Hidrelétricas – CGH (com até 5 MW de potência instalada); Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH (entre, 5 MW e 30 MW de potência); Usina Hidrelétrica de Energia – UHE (com mais de 30 MW) (Brasil, Lei nº 13.360/2016).

Os principais elementos de um reservatório são (FIGURA 5): Barramento; Vertedouro; Lago; Comporta; Casa de forças; Afluente(s) de entrada de vazão (cursos de água contribuintes ao reservatório).

Os objetivos para construção de reservatórios estão atrelados a vários fins, comumente são estes: irrigação, geração de energia hidrelétrica, fornecimento de água e o controle das cheias (ZERLOTTI, 2011).

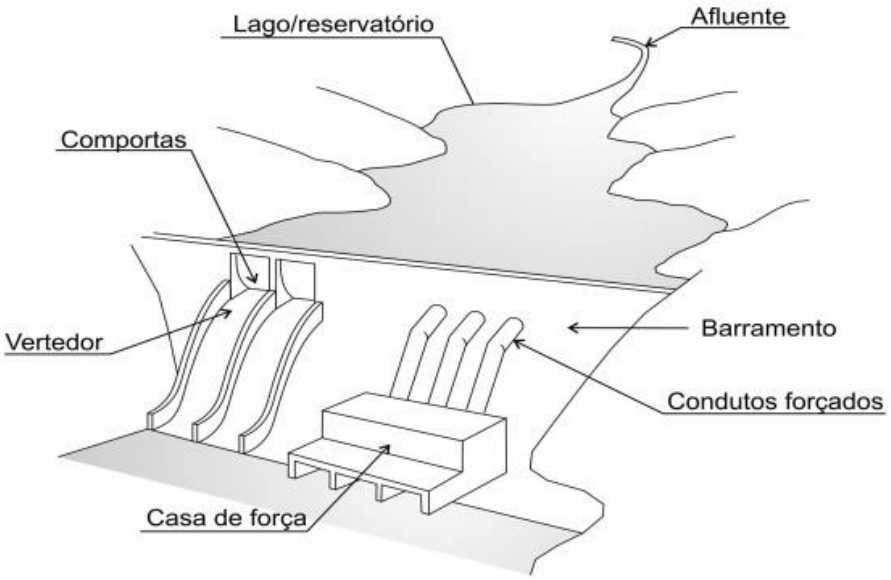

FIGURA 5 - PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM RESERVATÓRIO.
FONTE: Bravo, 2010.

De acordo com Bravo (2010), outras especificações importantes de um reservatório são as cotas de níveis característicos:

I. **Nível de água mínimo operacional**: É o nível mínimo necessário para operação adequada do reservatório; normalmente este nível é definido acima do limite superior da estrutura de tomada de água de modo a evitar a formação de vórtices que possam entrar e permitem evitar o ingresso de ar no conduto forçado.
II. **Volume morto:** O volume morto corresponde à parcela do volume do reservatório inativa ou indisponível para fins de captação de água. Corresponde ao volume do reservatório compreendido abaixo do nível mínimo operacional.
III. **Nível de água máximo operacional**: Corresponde ao nível máximo permitido para operação normal do reservatório (sem vertimento). Este nível normalmente corresponde à cota da crista do vertedor ou à borda superior das comportas vertedor. Este nível define o limite máximo do volume útil do reservatório.
IV. **Volume útil:** É o volume disponível para operação do reservatório, ou seja, ao atendimento das diversas demandas de água, sendo este volume compreendido entre os níveis máximo e mínimo de operação do reservatório.

V. **Volume de espera:** É o volume para controle de cheias; corresponde à parcela do volume útil do reservatório destinada ao amortecimento de ondas de cheia, visando ao atendimento das restrições de vazão a jusante do barramento. Estas restrições são, em geral, adotadas em função da capacidade de escoamento do canal a jusante e pelo não comprometimento de infraestruturas existentes, como pontes, rodovias ou áreas urbanas em zonas de inundação.

VI. **Nível de água máximo *maximorum*:** Corresponde à sobrelevação máxima do nível de água, medida a partir do máximo operacional, disponível para a passagem de cheias. Esta sobre-elevação consiste em uma superfície livre definida entre o nível da crista do vertedouro e da crista do barramento que garante que as ondas formadas pela ação dos ventos não passem por sobre o barramento, fato este que poderia ser danoso à estrutura.

Geralmente, a usina hidrelétrica é constituída por uma barragem formadora do reservatório, que represa um curso de água, condutos forçados que conduzem a água do reservatório até a casa de força, onde estão localizados os grupos turbina-gerador, canal de fuga, local onde a água é devolvida ao seu curso natural após turbinada, e o vertedouro, por onde há liberação da água excedente diretamente sem passar pelas turbinas (Silva 2003).

As classificações das usinas de acordo com o tipo de reservatório são:

I. **Reservatório de acumulação:** são importantes porque regulam as vazões naturais afluentes próprias (armazenando a água nos períodos úmidos ou de chuvas e utilizando-a nos períodos secos ou de estiagem), dispondo assim de uma vazão firme maior que a vazão mínima natural e ajudando também na regularização das afluências das usinas a jusante. (Costa et al., 2007).

II. **Reservatório a fio d´água:** dispõe de uma capacidade de armazenamento muito pequena e só pode utilizar água à medida que esta chega até ela. Algumas usinas desse tipo dispõem de suficiente capacidade de armazenamento (represamento) para possibilitar a acumulação da água durante os horários de carga reduzida, a fim de utilizá-la quando a usina estiver operando em horário de carga elevada. Este tipo de usina produz uma energia firme baixa, pois depende totalmente das suas vazões naturais afluentes. Contudo, esta será beneficiada se houver uma usina com

reservatório a montante (que regule as suas vazões afluentes) possibilitando que esta usina aumente o valor da sua energia firme (MME, 2004).

III. **Reservatório com armazenamento por bombeamento ou reversíveis:** É utilizado em lugares onde a quantidade de água disponível para a geração de energia é inadequada. Consiste no bombeamento de água desde um reservatório inferior para um reservatório superior durante períodos de pequena carga utilizando energia extra de outra fonte geradora do sistema. Esta água armazenada é então empregada para movimentar as turbinas hidráulicas na geração de eletricidade nas horas de demanda máxima (CANALES et al., 2015).

No Brasil, os reservatórios de maior volume foram construídos para fornecimento de energia, dada a grande disponibilidade de recursos hídricos e a existência de condições favoráveis à construção de usinas hidrelétricas. O aumento no consumo de água da população e na demanda dos parques industriais também tem levado à crescente necessidade de construção de barramentos ou reservatórios para abastecimento de água (VON SPERLING, 1999).

A capacidade de regularização é uma medida indireta da quantidade de água que pode ser armazenada em períodos hidrológicos chuvosos para utilização em períodos mais secos. A capacidade de regularização pode ser determinada por meio do tamanho do reservatório comparado com a variação na série temporal de vazões afluentes: quando o porte do reservatório é pequeno, diz-se que a capacidade de regularização é menor ou igual a 1 mês; em um reservatório de porte médio, com capacidade de regularização entre 1 mês a 12 meses, diz-se que esta regularização é intra-anual; por último, capacidades de regularização superiores a 12 meses são classificados como plurianuais (FALCETTA, 2015).

A energia advinda de hidrelétricas é vantajosa pelo fato de ser uma fonte renovável e considerada, em relação a outras fontes, relativamente limpa. Esse tipo de energia resulta em impactos ambientais relevantes na formação dos reservatórios, com a alteração do regime hidrológico dos rios e prejuízos à fauna e flora locais (FALCETTA, 2015).

No que diz respeito à condição da vazão, os reservatórios a fio de água não permitem o controle das descargas do rio. Nesse caso, geralmente, a qualquer momento, o que entra na represa sai, e o nível da água atrás da barragem é unicamente uma função da descarga natural do rio. As barragens de reservatórios

geralmente são projetadas para regular a vazão de um rio. Assim, podem reduzir artificialmente a vazão natural e o acúmulo de água (o nível de água na represa aumenta) ou aumentar a descarga e a liberação de água (o nível de água na represa diminui) (GIRARD, 2002).

A produção de energia em uma usina de acumulação é aproximadamente mais constante ao longo do tempo e a regularização exercida por elas colabora com as demais usinas a jusante, podendo ser elas de acumulação ou a fio de água.

1.3 OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

A operação de reservatórios consiste na tomada de decisões sobre o volume de água a ser liberado pelo reservatório, em um determinado intervalo de tempo, com o objetivo de atender às demandas necessárias pelo sistema. Este procedimento se torna ainda mais essencial em reservatórios que necessitam de uma geração contínua de energia, para o atendimento de uma demanda específica (MAIA, 2006).

Em relação às regras de operação dos reservatórios, existem diversas delas. As regras mais usadas são aquelas que incluem a divisão do volume útil do reservatório em várias “zonas” que possuem políticas de descargas específicas. A distribuição do volume útil do reservatório nessas zonas pode ser constante ao longo do ano, ou pode variar de forma sazonal. A FIGURA 6 apresenta um esquema particular de subdivisão em zonas, de um reservatório com dois usos predominantes: a geração de energia e o controle de cheias. Essas regras de operação são chamadas de curvas-guia e definem as vazões efluentes, ao longo do ano, em função do volume do reservatório (BRAVO, 2010).

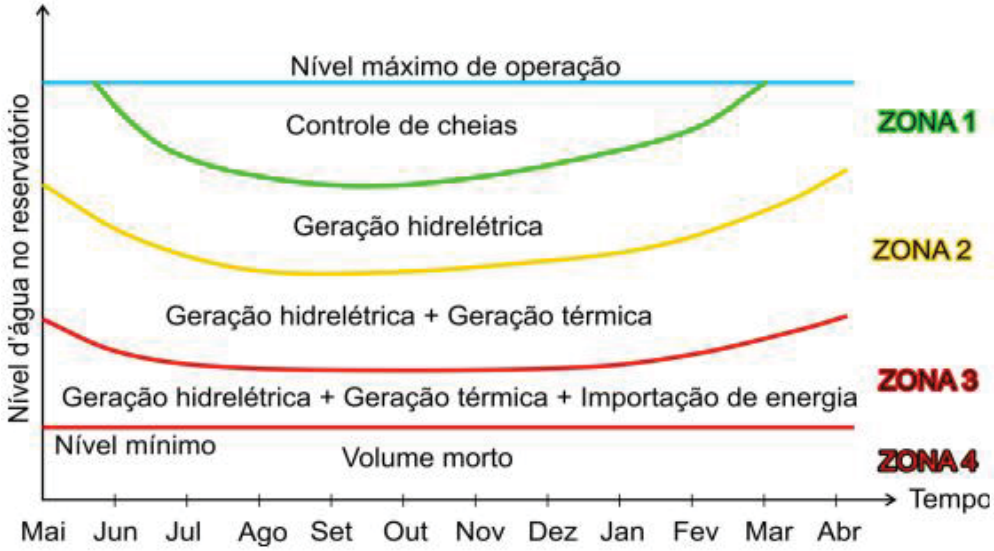

FIGURA 6 - CURVAS-GUIA DE RESERVATÓRIO DE MÚLTIPLOS USOS
FONTE: Bravo, 2010.

Segundo Bravo (2010), se o nível da água do reservatório se encontra acima da “curva-guia para controle de cheias”, são atendidas as demandas de geração de energia em 100% do tempo, podendo existir um excedente de energia que deve ser exportado. Ainda, são necessários vertimentos para levar o armazenamento ao nível definido por essa curva-guia. Dessa forma, é assegurado o chamado volume de espera para amortecer futuras cheias.

Caso o nível da água esteja na Zona 1, a demanda de energia é atendida e os vertimentos não são necessários. Quando se encontrar na Zona 2, a demanda de energia não pode ser atendida, exclusivamente, com geração hidrelétrica e, em consequência, são necessárias fontes complementares de geração de energia. Já na Zona 3, a utilização conjunta de geração hidrelétrica e de geração térmica não é suficiente para o atendimento da demanda, necessitando da importação de energia de outros sistemas.

Finalmente, se o armazenamento estiver na Zona 4, não existe geração hidrelétrica e o atendimento da demanda dependerá da capacidade de geração das usinas térmicas e da disponibilidade de energia para importação desde outros sistemas, podendo ocorrer racionamento de energia.

No Brasil, a ONS é responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), o qual é hidrotérmico, de grande porte, com forte predominância de

usinas hidrelétricas e múltiplos proprietários. Este sistema brasileiro de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica é formado por Agentes (empresas) das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte (ONS, 2009).

Registra-se que apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país ainda se encontram fora do SIN, em pequenos sistemas isolados — localizados, principalmente, na região amazônica. A fiscalização e regulação deste sistema são feitas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Os usos principais dos reservatórios de grande porte do SIN são a geração de energia e o controle de cheias (ONS, 2009).

No SIN, os sistemas de reservatórios para controle de cheias podem ser classificados em dois tipos: interdependentes e independentes. O primeiro é constituído por dois ou mais reservatórios que apresentam as seguintes características: (a) têm capacidade de influenciar na proteção de locais situados a jusante de outros reservatórios, sujeitos à restrição de vazão máxima (ONS, 2009). Nesse caso, a operação de cada reservatório é feita de forma integrada, procurando atender a todas as restrições do controle de cheias e de atendimento às demandas de geração de energia; (b) podem ser influenciados por outros reservatórios situados a montante, na proteção de locais situados imediatamente a jusante. Este se refere aos reservatórios que não possuem as características previamente apresentadas, sendo operados de forma isolada, atendendo suas próprias restrições do controle de cheias (ONS, 2009).

Segundo Villela e Mattos (1975), a capacidade mínima de um reservatório para atender a determinada lei de regularização é dada pela diferença entre o volume acumulado que seria necessário para atender aquela lei no período mais crítico de estiagem e o volume acumulado que aflui ao reservatório no mesmo período. Levando em conta diversos períodos de estiagem, o mais crítico é aquele que resulta na maior capacidade do reservatório. Assim, pode-se calcular a capacidade do reservatório para vários períodos de estiagens e adotar a maior capacidade encontrada.

Grande parte dos reservatórios de grandes dimensões foi projetado para gerar energia elétrica. A utilização dos reservatórios para controlar cheias depende de uma avaliação no tempo de recorrência de cada restrição e o volume necessário é alocado no reservatório que é operado para proteção do local até a cheia relacionada com o tempo de recorrência estabelecido (FREITAS, 2016).

A operação hidráulica de reservatórios de usinas hidrelétricas deve seguir os seguintes princípios fundamentais: (1) garantir a segurança da barragem; (2) não causar eventos mais críticos na área de influência do que aqueles que seriam observados em condições naturais; e (3) mitigar efeitos danosos na área de influência (BUBA et al., 2011).

O ajuste da operação individual para a operação coordenada depende das características da bacia, do projeto de inundação e das cheias históricas. Em um sistema de reservatórios, geralmente, a regra de operação é desenvolvida a partir de cada empreendimento operado como unidade separada (USACE, 1987).

A regulação ótima do reservatório depende de requisitos de montante e de jusante. As defluências dependem das restrições hidráulicas em determinados pontos. O controle da cheia depende do tempo de propagação causada pelo armazenamento no rio e das vazões incrementais entre os reservatórios e os pontos de controle. A simulação do escoamento e das regras de operação do reservatório facilita a procura da melhor maneira de operar cada reservatório (YEH, 1985).

;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os impactos de reservatórios de empreendimentos hidrelétricos no regime hidrológico e a utilização do *software IHA* como ferramenta para avaliação dos impactos provenientes dessas estruturas hidráulicas. A revisão bibliográfica é composta de subdivisões; na primeira subdivisão é realizada uma revisão dos impactos hidrológicos de reservatórios de empreendimentos hidrelétricos e suas possíveis causas; na segunda parte são apresentadas as principais características e funções do *software IHA;* na terceira parte são apresentados os estudos desenvolvidos com o uso do *software IHA*, esclarecendo quais foram os resultados obtidos pelo seu uso.

2.1 IMPACTOS DE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS NO REGIME HIDROLÓGICO

A variabilidade temporal das vazões fluviais tem como resultado visível a ocorrência de excessos hídricos nos períodos úmidos e a carência nos períodos secos. Nada mais natural que seja preconizada a formação de reservas durante o período úmido para serem utilizadas na complementação das demandas na estação seca, exercendo um efeito regularizador das vazões naturais (ANA, 2013).

A vazão regularizada é a vazão que o reservatório pode fornecer em longo prazo, sem que o volume mínimo ou volume morto seja atingido. A maior vazão que pode ser regularizada é a vazão média de longo termo. A vazão regularizada pode variar muito de acordo com a área de drenagem e a hidrologia da bacia (ANA, 2013).

As barragens de reservatórios apresentam alguns impactos sobre os ecossistemas fluviais que são descritos pela *World Commission on Dams* (Comissão Mundial sobre Barragens - 2000). A *World Commission on Dams* relaciona vários grupos de maior impacto das barragens em ecossistemas fluviais, a saber:

I. Impactos sobre ecossistemas terrestres, principalmente na parte do rio localizado acima das barragens;
II. Emissão de gases de efeito estufa associada a grandes projetos de barragens e suas represas;

III. Impactos causando alteração da corrente aquática em ecossistemas aquáticos e biodiversidade;
IV. Impactos causando alteração no ciclo natural rio abaixo em planícies inundáveis;
V. Impactos das barragens sobre as áreas de piscicultura rio acima, na represa e rio abaixo;
VI. Impactos cumulativos das barragens sobre um sistema fluvial.

Atualmente, existe uma preocupação cada vez maior em relação aos impactos ecológicos cumulativos de muitas barragens ao longo do mesmo curso de água dentro da mesma bacia hidrográfica (WCD, 2000). Impactos cumulativos já foram observados em várias bacias, como a bacia do mar de Aral (Anderson, 1997), o rio Murray na Austrália (CRABB, 1997) e o rio Colúmbia nos EUA (ELEY e WATKINS, 1991), por exemplo.

A modificação do regime de vazões pelas barragens leva à redução da inundação rio abaixo, tanto em relação ao espaço quanto ao tempo. Um dos impactos mais importantes desta redução é a queda na conectividade entre o canal principal e as águas da planície de inundação, o que acarreta impactos diversos, entre eles o declínio na abundância dos peixes, redução da transferência de matéria (sedimentos, matéria orgânica) e interferências no ecossistema fluvial (ZERLOTTI, 2011).

A operação e construção de barragens podem causar impactos ambientais de curto, médio e longo prazos, abrangendo um nível local, regional e global. Os reservatórios podem influenciar os rios onde são construídos, alterando a vazão e os sistemas aquáticos de forma considerável (TUNDISI, 1999).

As barragens trazem vários benefícios, porém este tipo de estrutura apresenta pontos negativos, como por exemplo, os impactos decorrentes de sua implantação sobre o regime hidrológico, as características hidráulicas, o fluxo de sedimentos, a qualidade da água e a biota (BURKE; JORDE; BUFFINGTON, 2009).

O regime hidrológico poderá ser afetado de diversas formas quando uma barragem é construída, e apesar dos estudos de avaliação das alterações hidrológicas causadas por barragens terem evoluído no cenário mundial, esta prática não tem sido realizada ainda em fase de projeto de forma complexa (LIMA et al., 2015).

Os impactos decorrentes de reservatórios são classificados por Lima (2014), na FIGURA 7, em 4 ordens. Na primeira ordem, a influência da operação de reservatórios é refletida na hidrologia, qualidade da água e suprimento de sedimentos. Na segunda ordem, a influência da operação de reservatórios impacta a morfologia da várzea, morfologia do canal, regime hidráulico, transporte de sedimento. Na terceira ordem, a influência da operação de reservatório é refletida na vegetação da várzea e aquática, invertebrados, peixes, pássaros, mamíferos. Na quarta ordem, a influência é verificada na resposta biológica do ecossistema.

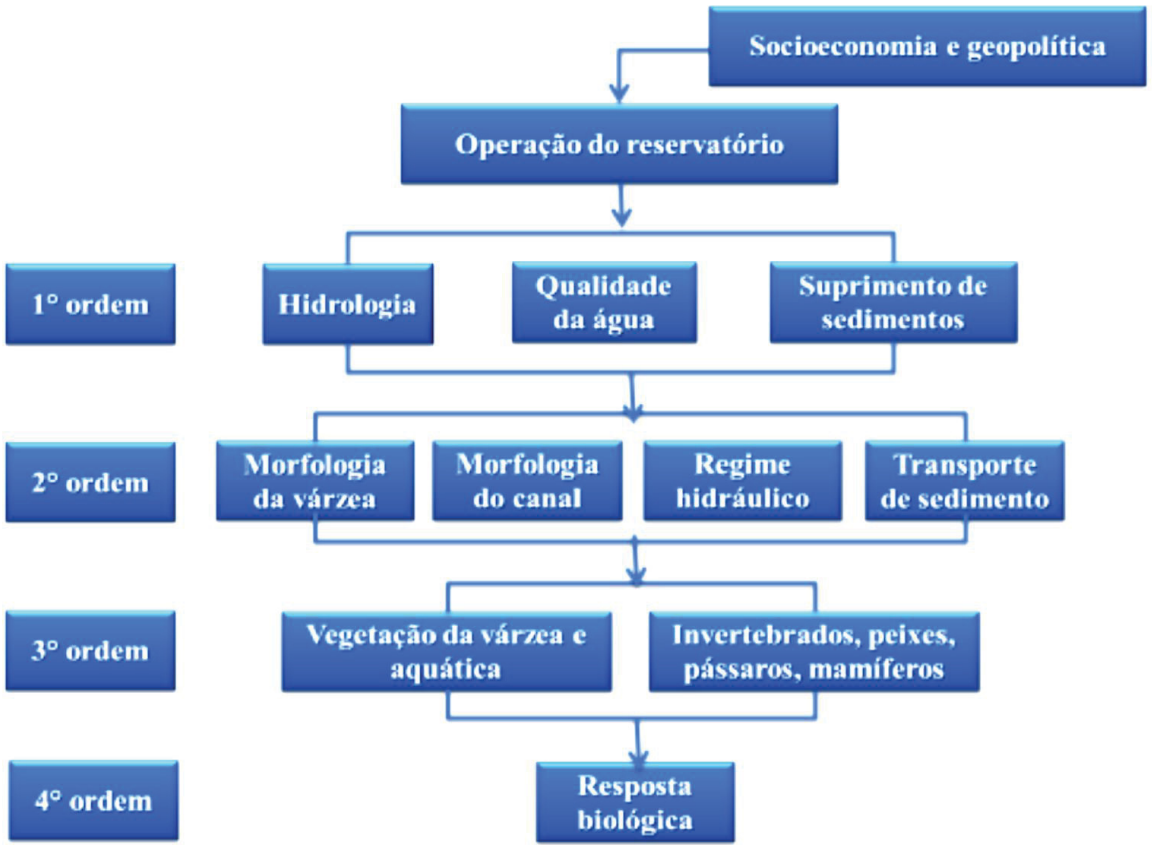

FIGURA 7 - CLASSIFICAÇÃO DE IMPACTOS DECORRENTES DE RESERVATÓRIO.
FONTE: Lima, 2014.

A implantação de reservatórios de regularização modifica a distribuição das vazões nos rios e modifica o fornecimento de água a jusante do mesmo. As vazões a jusante dos reservatórios passam, desta forma, a apresentar comportamentos distintos no que se refere à garantia das disponibilidades, gerando uma elevação do valor de vazão mínima disponível, que tende a se aproximar do valor da vazão média de longa duração (ASFORA; CIRILO, 2005).

De acordo com Poff e Matthews (2013), os impactos relacionados com os reservatórios ficam mais evidentes à medida que o número de reservatórios aumenta, gerando efeitos em escala local, regional e global.

Conforme Brasil (2005), o impacto ambiental de reservatórios abrange alteração na vazão da água, modificação no regime de vazão, inundação de áreas, alteração na qualidade da água, salinização da água – devido à evaporação e prejuízos à fauna.

Os reservatórios presentes nos corpos de água podem gerar alterações na dinâmica fluvial, alterando o ciclo natural do rio e interferindo nos processos de transporte e deposição, ao mesmo tempo em que ocorre a diminuição da biodiversidade aquática e destruição de habitats naturais (STEVAUX et. al., 2009).

Segundo Esteves (1998) pode-se observar distintas consequências à jusante dos reservatórios com implicação no sistema ecológico. Podem-se destacar as alterações ocorridas no regime hidrológico que passa a ter regime de cheia e seca aperiódico, sendo assim, independente do regime hidrológico da região. Os efeitos das modificações no regime hidrológico à jusante tanto podem ser observadas logo após a formação dos reservatórios, como também anos após a implementação do reservatório. O ecossistema aquático e terrestre sofrem efeitos imediatos das modificações ocorridas no regime hidrológico. A alteração do regime hidrológico tem como consequência ausência de cheias e secas, assim muitas espécies vegetais e animais têm seu ciclo de crescimento, reprodutivo e adaptativo alterados, o que acarreta ao ecossistema local impactos que podem comprometer sua continuidade.

De acordo com Cendretti, Santos e Biondi (2009) os empreendimentos relacionados à produção de energia elétrica têm potencial de impacto do ponto de vista social e ambiental. Os reservatórios podem causar impactos de caráter negativo ao ecossistema e às populações, desta forma é fundamental que os reservatórios de empreendimentos hidrelétricos sejam estudados no âmbito do potencial impacto ambiental que possam causar.

Segundo Andrade (2006), os reservatórios de acumulação causam impactos no regime hidrológico e que devem ser quantificados para mensurar os impactos acumulativos devido ao grande número de empreendimentos localizados em bacias hidrográficas.

De acordo com Andrade (2006), os principais impactos ambientais causados pelos reservatórios são:

I. Ocupação do solo pela formação do lago;
II. Destruição do leito natural do rio por sedimentos;
III. Erosão que altera o leito original do rio;
IV. Alteração da velocidade da água;
V. Alteração da qualidade da água devido às atividades anaeróbias, óxidos e gases tóxicos que se formam quando da construção da barragem;
VI. Modificação da vida aquática (peixes, plantas e seus habitats);
VII. Vazão residual no trecho seco do rio.

Para Carvalho (2014) o desvio de um curso natural do rio, em função da barragem presente, pode ser uma fonte de conflitos com outros usos na bacia onde se localiza o empreendimento. A redução da vazão à jusante do rio pode mudar a disponibilidade do habitat, o regime de vazões predominante e a amplitude da área molhada, que pode alterar negativamente várias espécies, incluindo os ecossistemas aquáticos de plantas, de invertebrados e de peixes. A manutenção de uma vazão residual adequado deve ser necessária para proteger a ecologia do corpo hídrico, por meio das variações ocorridas nas diferentes vazões sazonais. As alterações no regime de vazões, da mesma forma como aumento no sedimento e demais materiais em suspensão podem levar ao desaparecimento de habitats. A modificação na vazão, assim como do leito do rio e a redução da corrente pode conduzir à redução ou substituição de espécies nativas do ecossistema aquático. Os barramentos que causam certa redução na vazão têm como consequência a alteração dos poluentes transportados pela água e dos organismos patogênicos.

Segundo Souza et al. (2002), a diminuição do volume de água, em função do trecho impactado pela mudança do regime hídrico e da sua relevância ecológica, pode desencadear uma mudança na comunidade aquática, podendo resultar na extinção de espécies endêmicas e na diminuição da biodiversidade.

Andrade (2006) considerou que no interior do ecossistema local, os reservatórios podem desencadear impactos no bioma e nas comunidades que nelas vivem; a implantação de um reservatório pode influenciar na dinâmica do ecossistema local, tal influência dependerá da potencialidade e fragilidade do meio frente à especificidade da obra instalada.

Abassi e Abassi (2011) afirmam que os impactos causados por barragens, ainda são pouco estudados. As pesquisas realizadas indicam que a construção de barragens alteram as características físicas do rio, alterando a frequência de ambientes lênticos e lóticos e modificando, também, a estrutura do habitat presente ao longo do rio.

Latini e Pedlowski (2016) concluíram que, mesmo diante da baixa capacidade instalada e do reduzido tamanho de suas barragens, as pequenas barragens têm potencial de afetar as características hidrológicas dos sistemas aquáticos e biota em nível individual, populacional e de comunidades, além de causar impactos negativos às populações que residem nas regiões onde esses empreendimentos são implantados.

Burke et al. (2009) concluíram que as barragens Libby e Corra Linn alteraram significativamente o regime do Rio Kootenai nos Estados Unidos. Os resultados obtidos pelos autores indicaram que as mudanças mais significativas ocorreram nas vazões relacionadas ao tempo, à magnitude, à frequência, à duração e à taxa de mudança de vazões. As vazões médias mensais do período de inverno aumentaram, sendo que no período de pré-impacto apresentavam vazões baixas.

Genz e Luz (2009) realizaram uma análise das alterações hidrológicas no baixo trecho do Rio São Francisco no Brasil e enfatizaram um conjunto de alterações hidrológicas que ocorrem neste trecho por causa da implantação e operação de barragens. Dentre o conjunto de alterações pode-se destacar: a eliminação dos pulsos de vazão mínima, aumento das vazões mínimas e redução das vazões máximas.

Truffer et al. (2003) e Friedl e Wüest (2002) apresentam que a construção de usinas hidrelétricas e a sua operação está associada a uma série de problemas ambientais, sendo eles: desvio de água, interrupção da migração de peixes, descarga de reservatórios e inundação de paisagens e alteração no ciclo biogeoquímico.

Para Magilligan e Nislow (2005) os reservatórios têm grandes impactos sobre a hidrologia do rio, principalmente através de mudanças no tempo, magnitude e frequência de vazões baixas e altas, produzindo, em última instância, um regime hidrológico que diferiu significativamente do regime de vazão natural prévio.

Magilligan e Nislow (2005) analisaram as mudanças hidrológicas nos períodos de pré e pós-implantação de reservatórios para 21 regiões nos Estados

Unidos, com dados de 30 anos de vazão diária antes e depois da construção do reservatório. No estudo realizado, vários parâmetros hidrológicos foram alterados por causa das barragens; o impacto mais significante ocorreu na mudança das vazões máximas, redução dos picos de vazão após a construção do barramento.

Poff e Zimmerman (2010) avaliaram estudos que estavam relacionados com alterações hidrológicas a respostas ambientais e a maioria das alterações hidrológicas identificadas estavam ligadas aos reservatórios.

De acordo com Junk e Mello (1990), a finalidade da construção de um reservatório de hidrelétrica é a de aproveitar água de alto desnível em quantidade constante durante o ano todo. O reservatório nivela as flutuações naturais da descarga do rio. Desta forma, as flutuações do nível do rio abaixo do reservatório são modificadas. Rios com alta descarga, por exemplo, o rio Tocantins, são influenciados de tal modo que níveis extremamente baixos e, até certo ponto, extremamente altos são evitados. Por consequência, o padrão natural do ciclo hidrológico abaixo do reservatório será mantido com uma amplitude reduzida, porque a descarga do rio Tocantins durante a cheia é grande demais para ser estocada na represa. Rios com descarga pequena, por exemplo, o rio Uatumã vai perder seu padrão natural de descarga abaixo do reservatório, porque a capacidade de armazenamento do reservatório é suficientemente grande para controlar a descarga completamente.

Segundo Souza (2009), o ecossistema tem respostas dependendo da magnitude com que os componentes do regime hidrológico foram alterados em relação ao regime natural do rio. As respostas do ecossistema às alterações hidrológicas podem ser lineares ou bruscas a partir de um limite específico de alteração, que pode variar para cada local. De acordo com o autor, algumas alterações podem ser verificadas em função de reservatórios de empreendimentos hidrelétricos:

I. Variações diárias extremas à jusante de usinas hidrelétricas que operam para produzir energia adicional para suprir demandas por potência em alguns períodos representam condição de extrema ameaça à diversidade e abundância de peixes e invertebrados.

II. No outro extremo hidrológico, estabilização de vazões à jusante de reservatórios, a exemplo daqueles operados para abastecimento de água, resultam em ambientes artificialmente constantes sem extremos naturais.

III. Regularização de vazões reduz a magnitude e frequência de inundações de várzeas, afetando espécies e comunidades de plantas ripárias. Além disso, por conta de outros efeitos da regularização, incluindo aumento da salinidade, espécies exóticas passam dominar o ambiente.
IV. A eliminação de inundações pode afetar espécies animais que dependem de habitats terrestres.
V. Alterações na duração de condições hídricas também têm consequências biológicas significativas. Alterações de duração de inundações, independente da manutenção do volume anual de escoamento, podem alterar a abundância de tipos de cobertura de plantas.
VI. Alteração do período de ocorrência de eventos pode afetar organismos aquáticos tanto diretamente como indiretamente.

De acordo com Rosenberg et al. (1997), os impactos distintos das alterações hidrológicas incluem a fragmentação de habitats dentro dos rios afetados por reservatórios; mudança do habitat à jusante, como perda de áreas úmidas adjacentes e deterioração, perdas de deltas de rios e estuários de oceano, zonas ripárias e planícies de inundação.

2.2 *SOFTWARE IHA (INDICATORS OF HYDROLOGIC ALTERATION*)

O *software IHA* foi desenvolvido, na década de 90, pela organização *The Nature Conservancy* (TNC), que é uma das maiores organizações sem fins lucrativos de conservação ambiental do mundo, com sede nos EUA. O *IHA* foi projetado para calcular 32 parâmetros ecológicos que descrevem as variabilidades das vazões; o programa foi projetado com base em pesquisas ecológicas que definem conjuntos de dados hidrológicos relevantes ecologicamente, incluindo a magnitude, tempo, frequência, duração e taxa de flutuações (MATHEWS; RICHTER, 2007).

A fundamentação teórica do *software* consiste em caracterizar, para cada ano, o regime de vazões em relação ao ecossistema de regimes hídricos. A avaliação de possíveis alterações do regime hidrológico se dá por meio da comparação de estatísticas de tendência central (média, mediana) e dispersão (desvio padrão, distância interquartílica) de cada aspecto (POFF et al., 1997).

O *IHA* tem um papel fundamental no avanço de estudos que analisam a alteração de regimes hidrológicos provenientes de alguma interferência ocorrida no regime de vazões. O *software* tem sido utilizado em diversas aplicações, por exemplo, para caracterização dos regimes de vazões de uma bacia hidrográfica (RICHTER et al., 1998) e , também, para recomendação de valores de vazões ambientais (Mathews; Richter, 2007).

De acordo com Richter et al. (1996), o *software IHA* é baseado na avaliação de dados hidrológicos disponíveis que foram adquiridos em locais de medição em corpos de água ou gerados por modelos hidrológicos. Segundo autores, o *software IHA* pode ser utilizado com os objetivos de: 1) comparar a condição de um sistema hidrológico através do tempo; 2) comparar a condição do sistema com outro; 3) comparar a última condição do sistema com os dados de simulação, tendo como base modelos, de alterações vindouras do sistema.

O *software IHA* tem sido utilizado em aplicações diversas. Pode-se citar a caracterização dos regimes de vazão de uma bacia hidrográfica e para realizar a recomendação de valores de vazões ambientais, funções disponíveis na sua última versão (TNC, 2009).

A ideia original de desenvolver o *software IHA* foi com o intuito de possibilitar um rápido processamento de dados hidrológicos objetivando diagnosticar as condições da vazão natural e facilitar a análise das mudanças provocadas pelo homem nas condições naturais de vazão (MATHEWS; RICHTER, 2007).

O *software IHA* tem sido utilizado por cientistas e gestores de recursos hídricos nas bacias hidrográficas dos Estados Unidos (EUA) e do mundo, para que, juntamente com modelos ecológicos que auxiliem na gestão de atividades de proteção e restauração de vazões importantes ecologicamente (MATHEWS; RICHTER, 2007).

Os primeiros trabalhos desenvolvidos com o *software* (*IHA*) foram desenvolvidos por Richter et al. (1996). O *software* auxilia na descrição de como os tipos de uso da água de um corpo hídrico podem impactar seus padrões hidrológicos; esse *software* é disponibilizado gratuitamente pela plataforma *online* da *The Nature Conservancy*.

Os indicadores hidrológicos do *IHA* dividem-se em cinco grupos: Grupo 1 (Magnitude das condições de vazões mensais), Grupo 2 (Magnitude e duração das condições de vazões anuais extremas), Grupo 3 (Momento de ocorrência das

vazões anuais extremas), Grupo 4 (Frequência e duração dos pulsos de vazões altas e baixas), Grupo 5 (Taxa e frequência de mudança no hidrograma) (RICHTER et al.,1997).

O *IHA* calcula a alteração ocorrida nos 32 parâmetros hidrológicos. O *software* determina a alteração hidrológica que ocorreu após a influência antrópica no rio, por meio da determinação de faixas de variabilidade dos parâmetros naturais do rio, chamadas de categorias RVA (*Range of Variability Approach*) (RICHTER et al.,1997).

O *software IHA* pode calcular a vazão máxima de cada ano de maior inundação ou as vazões mais baixas, em seguida, calcula a média e variância dos valores durante algum período de tempo. Análise comparativa pode ajudar a descrever como esses padrões mudaram para um rio ou lago particular, devido aos impactos abruptos, como a construção de barragens, ou tendências mais graduais associadas às mudanças terrestres e de uso de água (OPPERMAN, 2006).

Posteriormente, foi inserida no *software* a determinação de cinco componentes de vazão ambiental (*Environmental Flow Components – EFC*): vazões extremas baixas; vazões baixas; pulsos de vazão alta; pequenas cheias; e grandes cheias, sendo calculados mais 34 novos parâmetros desses componentes. Estes caracterizam o regime fluvial de uma maneira representativa, com base nas relações chave entre as vazões e a ecologia, tendo a vantagem prática na prescrição de vazão ambiental (MATHEWS; RICHTER, 2007).

De acordo com TNC (2009), os parâmetros *EFC* foram fixados com fundamento em pesquisas feitas por ecólogos nas quais alegam que os hidrogramas dos rios podem ser separados em um conjunto de padrões de repetição que são ecologicamente relevantes.

Os cinco parâmetros do *EFC* são descritos a seguir:

I. **Vazões extremas baixas** - nos períodos de seca, a vazão do rio atinge níveis muito baixos, podendo realizar uma pressão sobre diversos organismos, todavia pode proporcionar as condições necessárias para outras espécies. A química da água, a temperatura e a disponibilidade de oxigênio dissolvido podem ser fontes de grande pressão para muitos organismos durante as vazões extremas baixas, no nível em que estas condições possam causar uma mortalidade considerável. Por outro lado, as vazões extremas baixas podem concentrar presas aquáticas para algumas

espécies ou podem ser necessárias para secar áreas de várzeas e permitir a regeneração de certas espécies de plantas.

II. **Vazões baixas** - Na grande parte dos rios esta condição predomina. Nos rios naturais, depois de um evento de precipitação ou em regiões onde há um período de degelo, após o escoamento superficial proveniente desses eventos ter diminuído, o rio retorna à vazão de nível básico ou vazão baixa. Estes níveis de baixa vazão se mantêm pelas contribuições das águas subterrâneas. Os níveis de vazões baixas de um rio que modificam com a estação do ano obrigam uma restrição fundamental às comunidades aquáticas, porque especificam a quantidade de hábitat aquático disponível durante a maior parte do ano. Isso influencia enormemente a diversidade e o número de organismos que podem viver no rio.

III. **Pulsos de vazão alta** - quando uma tempestade produz precipitações abundantes ou durante períodos de degelo, um rio ultrapassará seu nível de vazão baixa. Os pulsos de vazão alta incluem qualquer elevação na quantidade de água que não ultrapasse as margens do canal. Estes pulsos propiciam interrupções importantes e necessárias nas vazões baixas. Mesmo uma descarga de água breve ou pequena pode propiciar um alívio necessário para as temperaturas altas da água ou os níveis baixos de oxigênio dissolvido que são característicos dos períodos de vazão baixa e fornecer um aporte nutritivo de material orgânico ou outro alimento para apoiar a cadeia alimentar aquática. Os pulsos de vazão alta também permitem um melhor acesso para áreas a montante e a jusante de peixes e outros organismos móveis.

IV. **Pequenas cheias** - durantes as cheias, os peixes e outros organismos móveis podem movimentar-se para várzeas a montante ou a jusante e para pântanos. Estas áreas, geralmente inacessíveis, podem oferecer recursos alimentares essenciais. As áreas atingidas pela cheia de pouca profundidade são geralmente mais quentes que o canal principal e estão cheias de nutrientes e insetos que propiciam um crescimento acelerado dos organismos aquáticos. Dependendo do uso que se dá, uma pequena inundação abrange todas as enchentes do rio que ultrapassem o canal principal, mas não incluem as mais extremas que são de pequena frequência.

V. **Grandes cheias** - as grandes cheias geralmente modificam a estrutura biológica e física de um rio e sua planície de inundação. Estas grandes cheias podem levar muitos organismos e, desse modo, diminuir muitas populações, mas em muitos casos também podem promover novas vantagens competitivas para muitas espécies. As grandes cheias também podem ser importantes para estruturar hábitats fundamentais, tais como lagoas marginais e áreas alagáveis nas planícies de inundação.

Segundo TNC (2009), as vazões baixas são a condição dominante na maioria dos rios, sendo que em rios naturais, após um evento de chuva, o rio volta ao seu nível de base, sustentado pelas águas subterrâneas. A sazonalidade na variação das vazões baixas impõe restrições à comunidade aquática, pois determina a quantidade de habitat disponível na maior parte do ano, apresentando forte influência sobre a diversidade e número de organismos que podem viver no rio.

As vazões extremas baixas, ocorridas durante determinado período de seca, podem ser estressantes para muitos organismos, devido às condições químicas da água, temperatura e oxigênio dissolvido, a ponto de causar considerável mortandade. Porém, podem proporcionar as condições necessárias para outros organismos, concentrando presas aquáticas para algumas espécies e secando áreas de várzeas baixas, permitindo que certas espécies de plantas se regenerem (FREDERICE, 2014).

Os pulsos de vazão alta incluem os aumentos de vazões no rio, como durante um evento de chuva, não considerados como cheias (não ultrapassam a calha fluvial), fornecendo rupturas importantes e necessárias às vazões baixas. Mesmo que se refiram a uma pequena descarga de água no rio, podem fornecer alívio a partir de mudanças na temperatura e quantidade de oxigênio dissolvido característicos dos períodos de vazões baixas, além de fornecer subsídio nutritivo para a cadeia alimentar aquática e maior acesso a áreas de montante e jusante para os organismos móveis, como peixes (FREDERICE, 2014).

Assim também, durante as pequenas cheias os peixes e outros organismos móveis são capazes de se moverem para montante e jusante, além de saírem para áreas de várzea inundadas ou zonas úmidas, para acessar habitats adicionais que podem fornecer recursos alimentares substanciais (FREDERICE, 2014).

As grandes cheias podem reorganizar tanto a estrutura física como biológica de um rio e sua várzea, podendo eliminar muitos organismos e criar vantagens

competitivas para algumas espécies. Além disso, podem ser importantes na formação de habitat*s*-chave, como lagoas marginais e áreas alagadas de várzea (FREDERICE, 2014).

O *software IHA* (TNC, 2009) é um dos componentes de um método de gestão mais sofisticado chamado *RVA* (*Range of Variability Approach*), que consiste em metas de gestão anuais, para rios controlados por reservatórios, por exemplo, com base na caracterização natural do regime de vazões ecologicamente relevantes, por meio de seis passos básicos: (RICHTER et al.,1997; MATHEWS; RICHTER, 2007).

I. Caracterização da variabilidade natural das condições hidrológicas;
II. Quantificação do grau de alteração das condições hidrológicas por influência humana;
III. Desenvolvimento de hipóteses sobre impactos em espécies ou processos dos ecossistemas associados com as alterações hidrológicas;
IV. Identificação de oportunidades e abordagens para modificação da gestão de água ou do solo para restaurar ou proteger as condições naturais de vazões;
V. Implementação de um programa de monitoramento do ecossistema capaz de rastrear respostas bióticas;
VI. Avaliação dos dados do monitoramento e revisão dos passos 3 a 5

Richter et al. (1997) expuseram o RVA, que tem como objetivo o desenvolvimento de práticas de gestão dos rios tomando como referência suas vazões, independente da existência de estudo ecológico. Além disso, esse método tem enfatizado as principais características dos corpos hídricos que são: a variabilidade hidrológica das vazões e a integridade do ecossistema do rio.

2.3 APLICAÇÕES DO *SOFTWARE IHA*

A utilização de métodos de avaliação e classificação das alterações hidrológicas provenientes de empreendimentos construídos no curso do rio tem sido realizada por diversos autores (RICHTER et al., 1996; RICHTER et al., 1997; OLDEN e POFF, 2003; GENZ E LUZ, 2009; MC MANAMAY et al., 2012). A metodologia que utiliza o *software IHA* tem obtido resultados coerentes entre os estudos científicos desenvolvidos.

Cruz (2012) utilizou o *software IHA* para avaliar os efeitos da operação do reservatório Ponte de Pedra, um reservatório de pequena regularização, na alteração do regime hidrológico. Para atingir esse objetivo, as características dos regimes natural (reconstituído) e regularizado (observado) foram obtidas. Utilizaram - se 31 parâmetros dos Indicadores de Alteração Hidrológica juntamente com Curvas de Permanência de Vazões, calculados para os períodos de pré e pós-construção do reservatório. Segundo as conclusões do estudo, o teste de Wilcoxon apresentou que sete parâmetros dos *IHA* foram significativamente alterados pelo reservatório de pequena regularização (vazões mínimas de 1, 3 e 7 dias, vazão máxima de 90 dias e o número de pulsos altos e baixos). Entre os parâmetros alterados, as vazões máximas de 90 dias e o número de pulsos altos sintetizam as alterações provocadas pelo reservatório, e podem ser utilizadas como alvo para proteção e restauração dos atributos hidrológicos avaliados. No estudo realizado, as alterações hidrológicas identificadas foram consideradas de baixa magnitude.

Frederice (2014) realizou a caracterização do regime natural de vazões dos principais rios da bacia do rio Piracicaba e identificou as alterações ocorridas no regime de vazões, em decorrência da implantação dos reservatórios do sistema Cantareira. Para o estudo foi utilizado o *software IHA*, por meio do qual foram determinados os fatores de alterações hidrológicas de cada um dos 32 parâmetros hidrológicos. Os resultados dos estudos apresentaram que no período pós-impacto, no geral, houve diminuição nas vazões médias de aproximadamente 24% no rio Atibaia, 50% e 34% no rio Jaguari e 14% no rio Piracicaba, principalmente no período seco. Foi constatada, nos postos analisados, a redução na duração das vazões altas, assim como no aumento nas taxas de ascensão e recessão dessas vazões. As conclusões apresentaram que as mudanças foram mais significativas no rio Jaguari, seguido pelo rio Atibaia e menos significativas no rio Piracicaba, o qual se encontra mais distante dos reservatórios.

Richter et al. (1996) aplicaram o *software IHA* para avaliar as alterações hidrológicas ocorridas no rio Roanoke na Carolina do Norte (USA), devido à presença de barragem. No estudo de caso, os autores utilizaram estatísticas não paramétricas, além dos 32 parâmetros hidrológicos disponíveis no *software* para análise. Os resultados da análise feita pelo *software IHA* para o rio Roanoke são: as diferenças relativas entre as médias alteraram de – 73% (vazão máxima anual de 1 dia) para +232 % (contagens de pulsos baixos), considerando atributos individuais,

enquanto que a diferença absoluta média para os cinco grupos das características hidrológicas alteraram de 15% (grupo 1: Média mensal) para 88% (grupo 4: frequência e duração dos pulsos). Para atributos individuais a diferença relativa no coeficiente de variação alterou de -60% (vazão média de agosto) para +72% (vazão média de abril); a mudança para os cincos grupos foi de 26% (grupo 4: frequência e duração de pulsos) para 41% (grupo 3: período de eventos extremos). Os resultados da análise do *IHA* para o rio Roanoke refletem os efeitos da operação do reservatório Kerr para os propósitos do controle de inundação e operação para geração de energia hidrelétrica.

Richter et al. (1996) esclarecem que, pelo caso de estudo realizado no rio Roanoke, o *software IHA* é extremamente útil em chamar a atenção para aspectos do regime hidrológico alterado por vários tipos de influências humanas como barragens ou bombeamento de águas subterrâneas. A utilidade do *software IHA* também abrange estratégias de restauração hidrológica ou para avaliar efeitos hidrológicos associados a empreendimentos. Decisões de gestão dos recursos hídricos podem, então, ser baseadas nos resultados advindos do *IHA*, utilizando as mudanças ocorridas no regime hidrológico para associação com cenários alternativos de gestão. Também, através do *software IHA*, as avaliações das influências do sistema de barragens no rio Roanoke, na Carolina do Norte (EUA), permitiram concluir que as alterações hidrológicas verificadas poderiam estar associadas com alguns impactos no ecossistema, chamando atenção para a avaliação dos impactos das operações dessas barragens sobre as populações de peixes, da fauna bentônica da zona litorânea e das comunidades da floresta de várzea.

Na bacia do rio Green em Washington (EUA), o método *IHA* foi utilizado como parte de um projeto de desenvolvimento de indicadores ecológicos, devido à grande diminuição na abundância e distribuição de salmonídeos na bacia, para a caracterização do regime de vazões anterior à barragem Howard Hanson e determinação das alterações ocorridas no período posterior à barragem, auxiliando no estabelecimento das relações entre os parâmetros hidrológicos e os ciclos de vida das espécies e no levantamento de hipóteses sobre como essas alterações poderiam estar afetando essas espécies e os processos ecológicos (MATHEWS; RICHTER, 2007).

Olden e Poff (2003) realizaram uma análise de redundância e representatividade de 171 índices hidrológicos, obtidos de 13 estudos em ecologia. Observou-se que o *software IHA* apresentou capacidade para explicar a variação dos regimes de 420 rios americanos para diferentes aspectos do regime hidrológico. Mesmo o *IHA* tendo apresentado resultados consistentes para representar a variabilidade de rios hidrologicamente heterogêneos como os americanos, estudos ainda continuam sendo realizados para identificação e seleção de um conjunto de índices hidrológicos que possibilitem a melhor descrição dos regimes hidrológicos locais.

Segundo Genz e Luz (2009), o *IHA* permite enfatizar alterações na distribuição temporal das vazões abrangendo os grupos 1, 2 e 3, além das modificações nas características de forma do hidrograma dos grupos 4 e 5. O *software* permite identificar as mudanças que são fundamentais nas análises de alterações hidrológicas e desta forma, essa metodologia de avaliação tem sido utilizada para a identificação das alterações hidrológicas.

Em estudo realizado por Poff et al. (2007), a análise da capacidade dos reservatórios em homogeneizar a variabilidade natural dos regimes hidrológicos utilizando a aferição de estatísticas presentes nos Indicadores de Alteração Hidrológica culminou em resultados positivos de homogeneidade de regimes à jusante de reservatórios operados com o mesmo propósito, ainda que em locais com características hidrologicamente diferentes.

Sabino (2016) utilizou o *software IHA* para avaliação dos efeitos da operação da barragem da PCH São Lourenço no regime hidrológico do rio São Lourenço. As análises foram feitas com base nos dados da série de vazões diárias da estação fluviométrica são Lourenço de Fática, situada a jusante da PCH São Lourenço. No estudo realizado as principais constatações foram: houve um aumento de 6,7% na mediana das vazões, nos percentis 25% e 75% ocorreu redução de 20,7% e aumento de 20,6%, respectivamente; houve aumento na máxima de 1 dia (34%) e na máxima de 3 dias (16%); foram identificadas alterações nos número de pulsos baixos (+40%) e (+ 128%) no número de pulsos altos; na duração dos pulsos baixos houve elevação dos valores (+8%) e em relação à duração dos pulsos altos houve redução dos valores (67%). Em relação à taxa de ascensão, taxa de recessão e número de inversões a alteração foi de, respectivamente, +18%, +138% e +25%; além disso, o período de pré-impacto apresentou uma sazonalidade bem definida

nos períodos seco (abril e setembro) e chuvoso (outubro e março), diferentemente do período de pós-impacto. O estudo concluiu que a presença e operação da barragem da PCH São Lourenço alterou o regime hidrológico natural à jusante da barragem.

Rocha (2010) aplicou o *software IHA*, na Bacia Hidrográfica do Rio Paraná, para constatar os padrões do regime natural e do regime alterado do Rio Paraná no trecho superior do rio, por meio da observação da variabilidade das vazões relacionando-as aos fenômenos geomorfológicos e hidrodinâmicos. O estudo utilizou os dados hidrológicos diários obtidos da estação fluviométrica de Porto São José - com série histórica completa a partir de 1964 – no Alto Rio Paraná. A partir da obtenção dos dados diários da série, foram analisados cinco componentes do regime de vazões relacionados aos processos ecológicos em ecossistemas fluviais: a magnitude da vazão, a duração, a periodicidade, a frequência e a taxa de alteração da vazão, sendo utilizados ao todo 32 índices hidrológicos. Os resultados do estudo indicam para alterações ligadas às baixas vazões e são, em grande parte, resultado do controle exercido pelos reservatórios a montante; os indicadores apresentaram elevação na magnitude e diminuição na frequência. As conclusões do estudo indicaram que a utilização dos indicadores de alterações hidrológicas permitiu a verificação de uma ampla modificação na hidrologia do Alto Rio Paraná. Os resultados indicaram que as principais modificações estão relacionadas à regulação das vazões estabelecidas pela operação dos grandes reservatórios, implantados ao longo do tempo na bacia do Alto Rio Paraná. De acordo com Rocha (2010), o uso dos Indicadores de Alteração Hidrológica e das Metas associadas à taxa de Avaliação da Variabilidade possibilitam uma nova visão de gestão e manejo de sistemas fluviais, com benefícios econômicos e à população, particularmente onde a conservação da biodiversidade fluvial não tenha sido adequadamente levada em relevância em estudos antigos.

Lima (2014) aplicou o *software IHA* para avaliar as alterações hidrológicas a jusante de barragens por meio da análise de sensibilidade à variação da capacidade de armazenamento. Para a execução do estudo foram simuladas as alterações impostas pelas barragens em dois regimes hidrológicos distintos (um perene e um intermitente). Com os dados de vazão dos períodos pré e pós-impacto, foram avaliadas as alterações ocorridas. Os resultados obtidos permitiram verificar que as alterações hidrológicas afetaram de forma distinta e com diferentes graus de cada

grupo de parâmetros hidrológicos do *IHA*. Com relação à magnitude das vazões médias mensais, magnitude e duração das vazões extremas anuais e da frequência e duração destas, ficou mais evidente a influência do tipo de demanda, já no tempo de ocorrência das vazões anuais extremas e características do hidrograma, outros fatores influenciaram as alterações. De acordo com o estudo, a capacidade de armazenamento foi um fator que influenciou diretamente o impacto da modificação hidrológica no rio perene, pois os estudos de barragens com pequena capacidade de armazenamento (volume igual a 5% da vazão média anual) foram classificados como Classe 2 (baixo risco de impacto), enquanto que todos os estudos de barragens com maior capacidade de armazenamento foram classificados na classe 4. Na conclusão do estudo, foi apresentado que a utilização do *software IHA* permite que os projetos de barragens sejam melhores avaliados e medidas de gestão podem ser implementadas para reduzir os impactos ocorridos a jusante dos empreendimentos.

Okawa (2009) visou analisar as alterações ocorridas no regime de vazões após a construção de reservatórios dispostos em cascata a montante da planície de inundação do Alto Rio Paraná. Tendo como referência o início de operação da Usina Hidrelétrica de Porto Primavera, para o estudo foi utilizado o *software IHA* juntamente com o método RVA. Okawa (2009) utilizou a série histórica de vazões médias diárias da estação fluviométrica de Porto São José e os dados da estação de Guairá – com o intuito de estender o período das séries históricas de Porto São José até o ano de 1921. A utilização do *software IHA* permitiu a verificação de uma acentuada modificação nos parâmetros avaliados no regime hidrológico do rio Paraná.

Harish Kumara e Srikantaswamy (2011) analisaram as vazões ecológicas do Rio Tungabhadra, localizado na Índia. O local de estudo foi a bacia hidrográfica do Rio Tungabhadra, que possui área de 48.827 km². O reservatório de Tundabhadra tem tido a capacidade de armazenamento reduzida devido ao assoreamento provocado pela mineração e erosão do solo. Os resultados obtidos na pesquisa indicaram que o regime de vazões naturais do rio Tungabhadra vem sendo significativamente alterado desde os anos de 1960. De acordo com os resultados, as análises dos dados históricos de vazões indicaram uma redução de vazão nos últimos anos, o que tem afetado a região, resultando em consequências e efeitos preocupantes para os usos realizados a jusante do reservatório.

Vasco (2010) realizou um estudo para determinar as diversas modificações de ordem hidrológicas ocorridas no baixo rio São Francisco nos períodos pré e pós-construção das barragens e determinar os indicadores hidrológicos que sofreram os maiores impactos depois da construção da hidrelétrica de Xingó. Segundo o estudo realizado, a utilização dos indicadores de alterações hidrológicas possibilitou a identificação de uma ampla modificação na hidrologia do baixo rio São Francisco. Os resultados indicaram que as principais alterações estão relacionadas à regularização das vazões estabelecidas pela operação da hidrelétrica de Xingó; ocorreu uma tendência de diminuição da vazão mínima com sete dias de duração; as inundações que ocorriam frequentemente no baixo rio São Francisco passaram a ser reduzidas; as diferenças relativas flutuaram para os parâmetros individuais de +92% (duração de pulso baixo) para +42% (mínimo anual data juliana), a diferença média absoluta para os cinco grupos do *IHA* sofreram variação nas características hidrológicas em 19% (taxa e frequência das condições de alteração das vazões) para 57% (frequência e duração dos pulsos).

Mc Manamay et al. (2012) aplicaram o *software IHA* para construção de um índice de alteração hidrológica. A região de estudo foi parte dos 8 estados dos EUA (Georgia, Kentucky, Maryland, Carolina do Norte, Carolina do Sul, Tennessee, Virginia e West Virginia).

Zuo e Liang (2014) realizaram um estudo no rio Shaying, na seção hidrológica de Jieshou. A região selecionada foi utilizada para estudar a influência da eclusa e todas as barragens a montante da seção. Foram utilizados dados de 55 anos de vazões diárias medidos na estação hidrológica de Jieshou; os dados hidrológicos foram divididos em duas séries como períodos de pré e pós-impacto. Com a utilização do *IHA* a variabilidade de 32 parâmetros de vazão foi quantificada e a alteração hidrológica associada à operação de barragens foi quantificada. Os resultados obtidos indicaram que as barragens têm forte influência sobre o regime.

Diante do exposto, o *software IHA* apresentou-se como uma ferramenta amplamente utilizada por diversos autores para avaliação de alterações no regime hidrológico. A utilização do *software* permite com que decisões atreladas às ações de gerenciamento de recursos hídricos sejam tomadas com mais rigor e fundamentação técnica por meio dos resultados das alterações. Além disso, a aplicação do *software* em diversas regiões do mundo revela sua capacidade em lidar com as diferentes aplicações.

3. MÉTODOS

No presente capítulo são descritos os métodos que foram utilizados para identificar e quantificar os potenciais impactos hidrológicos provenientes dos reservatórios hidrelétricos da UHE Manso e UHE Passo Fundo. Os pontos abordados foram separados em subdivisões:

Na primeira parte, é esclarecido como os dados são levantados e qual é sua origem. Na segunda parte, são apresentados os principais aspectos relacionados com o *software IHA*, com o intuito de apresentar as funções e atribuições básicas do *software*. Na terceira parte é apresentado o método que envolve a avaliação da alteração hidrológica pela realização da diferença relativa entre os resultados obtidos dos parâmetros. Na quarta parte é detalhado o método de obtenção dos parâmetros significativamente alterados, usando o teste de Wilcoxon pareado nos 31 parâmetros do *IHA*. Por fim, é apresentada a teoria que envolve as curvas de permanência de vazão – CP. Para avaliar se a CP das vazões defluentes distingue-se da CP das vazões naturalizadas foi utilizado o teste de aderência de *Kolmogorov-Smirnov.*

3.1 DADOS DE VAZÃO

Para aplicação do *software IHA* foram utilizados os dados de vazões diárias provenientes do SAR – Sistema de Acompanhamento de Reservatórios, banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), disponíveis no site da agência. Foram utilizadas as séries de vazões diárias defluentes e vazões diárias naturalizadas da UHE Manso e UHE Passo Fundo.

As vazões naturais são aquelas que ocorreriam em uma seção do rio, se não houvesse as ações antrópicas na sua bacia contribuinte – tais como regularizações de vazões realizadas por reservatórios, desvios de água, evaporações em reservatórios e usos consuntivos (irrigação, criação animal e abastecimentos urbano, rural e industrial). As vazões naturalizadas são obtidas por meio de um processo de reconstituição, que considera a vazão observada no local e as informações relativas às ações antrópicas na bacia (BRAGA; ROCHA; CONTIJO 2009).

3.2 *SOFTWARE IHA (INDICATORS OF HYDROLOGIC ALTERATION)*

Nesta parte é realizada a apresentação mais detalhada do *software IHA*, esclarecendo os pontos pertinentes aos princípios básicos, funções, aplicações e resultados obtidos. Possibilita-se, desta forma, o melhor entendimento da aplicabilidade do *software* para o alcance dos objetivos propostos.

3.2.1 Indicadores de alteração hidrológica

O *software IHA* analisa longos períodos de dados hidrológicos em conjunto com parâmetros ecologicamente importantes. O *software IHA* agrupa 32 parâmetros hidrológicos em cinco grupos distintos: (1) magnitude das vazões mensais; (2) magnitude e duração das vazões extremas; (3) periodicidade das vazões extremas; (4) frequência e duração dos pulsos altos e baixos; (5) taxa e frequência de mudança das vazões (OPPERMAN, 2006).

O *IHA* possibilita ao usuário comparar dois períodos distintos de tempo ou realizar uma análise de tendência em um único período de dados hidrológicos para uma série temporal. Para verificar o impacto que a construção de barragem ocasionou no regime hidrológico é necessário utilizar o *IHA* para dois períodos distintos, pré-impacto e pós-impacto. No caso de modificações humanas realizadas em corpos hídricos em longo prazo, o *software* permite preparar gráficos de regressão linear para avaliar a tendência.

A função básica do *IHA* é comparar os conjuntos de dados hidrológicos e realizar análises estatísticas para avaliar possíveis alterações hidrológicas entre eles. O *IHA* foi desenvolvido para avaliar um único conjunto de dados e o usuário deve inserir o ano da alteração ocorrida (descontinuidade dos dados).

Em caso simplificado, encontra-se o exemplo de um registro de dados hidrológicos no qual uma barragem foi construída em determinado período dentre o número de anos dos dados. A partir do ano de descontinuidade fornecido ao *software*, é dividido o conjunto de dados em período de pré-impacto (antes do ano considerado para o início da conclusão da barragem) e pós-impacto (depois do ano da conclusão da barragem) (OPPERMAN, 2006).

Para determinação dos valores referentes à possível alteração hidrológica ocorrida no período de pós-impacto, ou seja, posterior ao ponto de descontinuidade

dos dados hidrológicos, deve-se optar por uma das alternativas de avaliação disponível pelo *software*. As alternativas correspondem à estatística paramétrica (média/desvio padrão) ou não paramétrica (percentis). Nas análises realizadas nesse trabalho, adotou-se a análise pela estatística não paramétrica, pois são estatísticas mais robustas e proporcionam melhores estimativas para dados distorcidos, que é característica frequente em dados hidrológicos (FREDERICE, 2014; OPPERMAN, 2006).

De acordo com Callegari-Jacques (2003), nos testes paramétricos os valores da variável estudada devem ter distribuição normal ou aproximadamente normal. Os testes não paramétricos, também chamados por testes de distribuição livre, não têm exigências quanto ao conhecimento da distribuição da variável na população. Nas situações práticas com vários dados hidrológicos, a utilização de estatísticas não paramétricas são as melhores escolhas para a natureza não normal dos conjuntos de dados hidrológicos. Caso a situação em análise seja a frequência de inundações ou vazões médias mensais, as estatísticas paramétricas são preferíveis.

A escolha em realizar uma análise não paramétrica, dentro do *software IHA*, é devido à distribuição não normal natural dos dados hidrológicos. Dentre as opções de análise de dados foi escolhida a comparação entre dois períodos de tempos distintos, separados pelo ano do impacto. O ano de ruptura dos dados ou “ano do impacto” é o ano referente ao início da operação ou término da construção da barragem.

Os parâmetros hidrológicos analisados pelo *IHA* são calculados e organizados em tabelas por ano hidrológico. O ano hidrológico padrão utilizado pelo *IHA* compreende o período de 1 de outubro a 30 de setembro, mas pode ser alterado para compreender período de tempo distinto, como foi realizado na aplicação do estudo de caso do presente trabalho. O ano hidrológico adotado para a UHE Passo Fundo foi de 1 de setembro a 30 de agosto, já para a UHE Manso o ano hidrológico adotado permaneceu com a configuração padrão do *software*.

3.2.2 Parâmetros do IHA

De acordo com Frederice (2006), nas análises para quantificação das alterações ocorridas no período pós-impacto, os valores obtidos para os 32 parâmetros no período pré-impacto são fragmentados em três diferentes categorias

(denominadas de categorias RVA), as quais são fundamentadas em valores percentuais:

1. Baixa: Valores menores ou iguais ao percentil 33%.
2. Média: valores na faixa dos 34% a 67% percentil.
3. Alta: valores acima do percentil 67%.

Dentro das três categorias de cada parâmetro descrito, o *software* realiza o cálculo do fator de alteração hidrológica para cada uma e em cada parâmetro. O *IHA* realiza a análise dos dados de pós-impacto e compara os dados de distribuição observada (pós-impacto) com os dados de distribuição esperada (pré-impacto), por meio da seguinte equação:

$$FAH = \frac{f_o - f_e}{f_e} . \quad (2)$$

Na qual:

FAH: valor obtido para o fator de alteração hidrológica;

f_o: referente ao número de vezes em que os valores dos parâmetros do *IHA* foram classificados dentro do período correspondente ao pós-impacto.

f_e: referente ao número de vezes em que os valores dos parâmetros do *IHA* foram classificados dentro do período correspondente ao pré-impacto.

Na análise dos resultados, um valor positivo do fator de alteração hidrológica significa que a frequência de valores na categoria (grupo percentil) aumentou no período pós-impacto, enquanto um fator FAH negativo significa que a frequência de valores na categoria (grupo percentil) diminuiu no pós-período de impacto (OPPERMAN, 2006).

Os indicadores calculam a alteração ocorrida no regime hidrológico dos 32 parâmetros descritos na TABELA 4. Tal descrição dos possíveis impactos que possam ocorrer pode permitir uma melhor compreensão dos possíveis efeitos que ações antrópicas têm ocasionado nos sistemas naturais.

TABELA 4 - SUMÁRIO DOS INDICADORES HIDROLÓGICOS USADOS PELO MÉTODO DO *IHA* E SUAS INFLUÊNCIAS NO ECOSSISTEMA (Continua).

Grupo Estatístico do *IHA*	**Parâmetros hidrológicos**	**Influência no ecossistema**
Grupo 1. Magnitude das condições de vazões mensais	1. Valor médio para janeiro 2. Valor médio para fevereiro 3. Valor médio para março 4. Valor médio para abril 5. Valor médio para maio 6. Valor médio para junho 7. Valor médio para julho 8. Valor médio para agosto 9. Valor médio para setembro 10. Valor médio para outubro 11. Valor médio para novembro 12. Valor médio para dezembro	• Habitat disponível para os organismos aquáticos; • Umidade do solo disponível para as plantas; • Disponibilidade e confiabilidade do fornecimento de água para animais terrestres; • Acesso por predadores aos locais de nidificação; • Influências na temperatura, níveis de oxigênio e fotossíntese na coluna de água.
Grupo 2. Magnitude e duração das vazões anuais extremas	13. Vazão máxima diária 14. Vazão mínima diária 15. Vazão máxima de 3 dias 16. Vazão mínima de 3 dias 17. Vazão máxima de 7 dias 18. Vazão mínima de 7 dias 19. Vazão máxima de 30 dias 20. Vazão mínima de 30 dias 21. Vazão máxima de 90 dias 22. Vazão mínima de 90 dias 23. Número de dias com vazão nula	• Balanço de organismos competitivos, ruderais e estresse tolerante; • Criação de locais para a colonização de plantas; • Estruturação dos ecossistemas aquáticos por fatores abióticos versus fatores bióticos; • Estruturação morfológica do canal do rio e das condições físicas de habitat; • Umidade do solo estressante para plantas.
Grupo 3. Momento de ocorrência das vazões anuais extremas	24. Dia Juliano de cada máxima de 1 dia anual. 25. Dia Juliano de cada mínima de 1 dia anual.	• Compatibilidade com os ciclos de vida dos organismos; • Acesso a habitats especiais durante a reprodução ou para evitar a predação; • Indicação de desova de peixes migradores; • Evolução das estratégias de história de vida e mecanismos comportamentais.
Grupo 4. Frequência e duração dos pulsos de vazões máximas e mínimas	**26**. Número pulsos de máxima em cada ano **27**. Número pulsos de mínima em cada ano **28.** Duração média do pulso de máxima anual (dias) **29**. Duração média do pulso de mínima anual (dias)	• Frequência e magnitude do estresse de umidade do solo para as plantas; • Frequência e duração do estresse anaeróbio para as plantas; • Disponibilidade de habitats de várzea para os organismos aquáticos;

TABELA 4 - SUMÁRIO DOS INDICADORES HIDROLÓGICOS USADOS PELO *SOFTWARE DO IHA* E SUAS INFLUÊNCIAS NO ECOSSISTEMA (Conclusão).

Grupo Estatístico do *IHA*	**Parâmetros hidrológicos**	**Influência no ecossistema**
Grupo 5. Taxa e frequência de mudança no hidrograma	30. Taxa de ascensão 31. Taxa de recessão 32. Número de reversões	• Estresse hídrico em plantas (níveis de queda); • Aprisionamento de organismos e milhas e planícies de inundação (níveis crescentes); • Estresse dessecação de organismos de baixa mobilidade na beira do rio (zona variável);

FONTE: adaptado de TNC (2009)

A estatística descritiva do comportamento hidrológico de corpos de água tem sido aplicada em pesquisas na área de engenharia e ecologia. As estatísticas relacionadas ao comportamento de longo-período de séries hidrológicas são utilizadas nas pesquisas, assim como as estatísticas do *IHA*.

3.2.3 Curva de permanência de vazão

O *IHA* realiza o cálculo da curva de permanência da vazão separadamente para cada período de análise (para análise de um período ou dois períodos) ou para cada arquivo de dados hidrológicos. Os períodos usados nestes cálculos são determinados usando as mesmas configurações usadas para especificar os anos de análise e dias de análise dos 32 parâmetros *IHA*.

A curva de permanência de vazões é construída por meio dos valores de vazão no eixo das ordenadas versos a porcentagem do tempo em que as vazões são igualadas ou superadas durante o tempo de registro, no eixo das abscissas.

As curvas de duração de frequência são calculadas utilizando o seguinte método:

1. Ordenar a média das vazões diárias para o período de registro desde os maiores valores aos menores valores, utilizando um total de n valores.

2. Atribuir o valor de cada posição de descarga (M) na lista ordenada, que inicia com o valor 1 para o maior valor de vazão diária.

3. Calcular a probabilidade de exceder o valor, de acordo com a equação a seguir:

$$P = 100 \times \frac{M}{n}. \quad (3)$$

Na qual:

P: é a probabilidade que dada vazão será igualada ou excedida (% tempo).

M: é a posição na lista de classificação.

n: é o tamanho da amostra.

Segundo Pinto et al (1976), a curva de permanência é uma variação do diagrama de frequências relativas acumuladas, na qual a frequência de não superação é substituída pela porcentagem de um intervalo de tempo específico em que o valor da variável, indicado em abscissas, foi igualado ou superado. A Curva de Permanência de Vazão é útil para apresentar o padrão de variações de vazões.

De acordo com Gao et al. (2012), a utilização dos parâmetros do *IHA* e as Curvas de Permanência de Vazões (CPV) têm apresentado resultados positivos e apontado como ferramentas com elevada capacidade para quantificar o nível de alteração hidrológica ocorrida nos regimes hidrológicos.

A curva de permanência de vazões resume a variabilidade das vazões, descrevendo a base de comportamento para a sustentabilidade de sistemas aquáticos, permitindo diagnosticar a distribuição do comportamento da vazão ao longo do tempo e não para valores extremos (PINTO et al., 1976).

3.3 AVALIAÇÃO DA ALTERAÇÃO HIDROLÓGICA

Para avaliar a alteração hidrológica é realizado o cálculo da diferença relativa entre os valores dos parâmetros da série defluente e natural, de modo pareado - ou seja, os dados dos parâmetros comparados são relativos ao mesmo ano de análise - obtidos do *software IHA*. Os valores dos parâmetros da série defluente e natural são pertencentes ao mesmo ano hidrológico. O intuito de avaliar os parâmetros de forma pareada faz parte de um método utilizado por Cruz (2012), que permite a quantificação da intensidade e da direção da alteração hidrológica anual. A avaliação da alteração hidrológica é realizada utilizando a equação 3:

$$Ah\ (\%) = \frac{P_r - P_n}{P_n} \times 100. \quad (4)$$

Na qual:

$Ah\ (\%)$: é o valor da alteração hidrológica anual em porcentagem.

P_r: é o valor do parâmetro calculado utilizando o regime defluente em determinado ano.

P_n: é o valor do mesmo parâmetro e no mesmo ano, todavia calculado a partir do regime natural.

O resultado obtido da alteração poderá apresentar valores positivos ou negativos, de acordo com a elevação ou redução no valor do parâmetro em relação ao regime natural. De acordo com Cruz (2012), a abordagem realizada permite remover possíveis influências causadas pela variabilidade climática interanual entre os anos, que poderiam ser responsabilizados à barragem. As alterações climáticas entre os anos podem refletir em períodos com os valores de vazões acima ou abaixo das médias anuais, e que podem influenciar os resultados dos estudos.

3.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS SIGNIFICATIVAMENTE ALTERADOS

Com o objetivo de conhecer os parâmetros significativamente alterados, caso haja a influência dos reservatórios de regularização no regime hidrológico, é utilizado o teste de Wilcoxon pareado. Esse teste compara se as medidas de posição entre duas amostras (pré e pós-impacto) são iguais ou não, considerando um nível de significância de 5%.

Segundo Levine et al. (2005), o teste não paramétrico de Wilcoxon serve como opção adicional para o teste t de *Student* para amostras pareadas. O teste pode ser utilizado com dados ordinais, intervalares ou proporcionais; a série permite utilizar menos do que 30 valores e não possuir necessariamente as características de uma distribuição Normal.

O teste de Wilcoxon pareado é utilizado para comparar se as medidas de posição de duas amostras são iguais no caso em que as amostras são dependentes. Para isto, consideram-se duas amostras dependentes de tamanho n vindas de duas populações P1 e P2, isto é, X1,..., Xn e Y1,...., Yn.

O teste de Wilcoxon considera o caso de duas variáveis aleatórias X e Y, cujas amostras são observações pareadas, isto é, tem-se *(X1, Y1), (X2, Y2),.....,(Xn, Yn)* como sendo amostras aleatórias X e Y, de tamanho n, em que os pares são independentes, mas há dependência entre cada par. Considerando então a variável

aleatória $D = X - Y$, tem-se a amostra $D1, D2,..., Dn$, correspondendo às diferenças entre os valores de cada par. Assim, o problema fica reduzido ao caso de uma amostra.

Se a distribuição de D for simétrica, então, novamente o teste de Wilcoxon é na realidade um teste para a média (da diferença). Portanto, esse teste é concorrente ao teste t-Student para amostras pareadas (teste para a média de uma população normal com variância desconhecida). A aplicação do teste de Wilcoxon dependerá da suposição de normalidade de D ser satisfeita ou não.

As hipóteses adotadas são:

Ho: A distribuição da variável $D = X - Y$ na população é qualquer, com mediana m e $P(x = m) = 0$;

H1: A distribuição da variável $D = X - Y$ na população é simétrica, de modo que $m = \mu d$.

3.5 COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES “PRÉ E PÓS-IMPACTO”

Realizou-se uma análise das curvas de permanência de vazão para os períodos anterior e posterior ao ano do “impacto”. Diante disso, para que pudesse ser verificado o grau de concordância entre as curvas de permanência e se apresentam a mesma distribuição de probabilidades é aplicado o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov.

Segundo Naghettini e Pinto (2007), o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS) é um teste não paramétrico, cuja estatística tem como referência a diferença máxima entre as funções de probabilidades acumuladas, empírica e teórica, de variáveis aleatórias contínuas.

O teste de Kolmogorov-Smirnov é baseado na Função de Distribuição Empírica (FDE) dos dados, e apresentam vantagens sobre outros testes, como por exemplo o teste de aderência qui-quadrado, incluindo maior poder e invariância em relação aos pontos médios dos intervalos escolhidos. O teste de Kolmogorov-Smirnov pertence à classe suprema de estatísticas baseadas na FDE, pois trabalha com a maior diferença entre a distribuição empírica e a postulada (LEOTTI et al., 2005).

O teste de Kolmogorov - Smirnov pode ser utilizado para avaliar as hipóteses:

I. $H0$: Os dados das duas séries possuem a mesma distribuição.

II. $H1$: Os dados das duas séries não possuem a mesma distribuição.

Este teste verifica a máxima diferença absoluta entre a função de distribuição acumulada assumida para os dados e a função de distribuição empírica dos dados. Como critério, compara-se esta diferença com um valor crítico para um dado nível de significância (PINTO, 1976).

3.6 SÍNTESE DO MÉTODO UTILIZADO

Apresentaram-se neste capítulo as etapas e procedimentos que foram realizados na elaboração desta dissertação, com o intuito de responder aos questionamentos desenvolvidos na justificativa do presente trabalho e no alcance dos objetivos propostos. A identificação de impactos da presença e operação reservatórios no regime hidrológico de bacias hidrográficas com a utilização do *software IHA* apresenta-se como alternativa viável visto sua vasta utilização na literatura existente, abordada na revisão bibliográfica deste trabalho.

O desenvolvimento da presente dissertação seguiu os seguintes procedimentos básicos:

I. Dados de vazão: As séries de vazões são provenientes do banco de dados da ANA, compreendendo os dados de vazões defluentes e os dados de vazões naturais.

II. Aplicação do *software IHA*: A partir das vazões diárias defluentes (pós-impacto) e naturais (pré-impacto), pertencentes ao mesmo período de anos, são calculados os 31 parâmetros hidrológicos dos 32 parâmetros disponíveis no *IHA*, para realização da caracterização do regime.

A utilização de apenas 31 parâmetros hidrológicos se deve ao fato da não inclusão do parâmetro referente ao número de dias com vazão zero, pois os rios analisados não apresentam vazão com magnitude zero.

Nesta etapa utilizou-se o software *IHA* para realização das análises e geração de informações que servirão de base para a identificação dos impactos possivelmente ocasionados por reservatórios de empreendimentos hidrelétricos. Na aplicação do *software IHA* estatísticas não-paramétricas foram utilizadas, por serem

mais robustas e fornecerem melhores estimativas de dados distorcidos. Na execução do *IHA,* o regime natural de vazões foi considerado pré-impacto e o regime regularizado será considerado pós-impacto, tomando como se fossem uma série temporal contínua, pois os dados de vazão regularizado e natural são pertencentes ao mesmo período de anos.

III. Avaliação da alteração hidrológica: Para realizar a avaliação da alteração hidrológica foi realizado o cálculo da diferença relativa entre os valores dos parâmetros da série defluente e natural, de modo pareado - ou seja, os dados dos parâmetros comparados são relativos ao mesmo ano de análise- obtidos do *software IHA*.

IV. Determinação dos parâmetros significativamente alterados: utilização do teste de Wilcoxon pareado para obter quais parâmetros hidrológicos, resultado da aplicação do software *IHA*, foram significativamente alterados com a operação dos reservatórios de empreendimentos hidrelétricos.

V. Comparação das curvas de permanência de vazão "pré" e "pós-impacto": nesta parte foi realizada a análise nas curvas de permanência de vazão para os períodos anterior e posterior ao ano do "impacto". Para verificar o grau de concordância entre as curvas de permanência e se apresentam a mesma distribuição foi aplicado o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov.

4. ESTUDO DE CASO

O presente capítulo destina-se a caracterizar os locais escolhidos para realização do desenvolvimento dos estudos. Busca-se neste capítulo a descrição geral dos reservatórios dos empreendimentos hidrelétricos de UHE Manso e UHE Passo Fundo e as características gerais das bacias hidrográficas na qual os reservatórios estão inseridos. A escolha da bacia hidrográfica do rio Uruguai e do Paraguai possibilita obter um melhor entendimento dos impactos gerados e entender as consequências de reservatórios de elevada regularização presentes em duas das principais regiões hidrográficas do país. Além disso, a escolha da UHE Manso e UHE Passo Fundo está ligada à disponibilidade de dados com menor número de falhas na série hidrológica de vazão.

A bacia hidrográfica do Paraguai tem distinções das demais regiões hidrográficas brasileiras, pois os serviços ambientais oferecidos pelos recursos hídricos possuem implicação de efeito integrado ao conjunto de ecossistemas de importância vital à comunidade. Essa bacia hidrográfica abrange uma área de 1.095.000 km², sendo 33% no Brasil – Mato Grosso e Mato Grosso do Sul - e o restante na Argentina, Bolívia e Paraguai. A implantação de obras de infraestrutura energética é um desafio que requer cautela e estudos mais profundos, uma vez que podem implicar em alterações no pulso de inundações da planície pantaneira e comprometer os ecossistemas (MMA, 2006).

A bacia hidrográfica do rio Uruguai corresponde a apenas 2% do território do país, sua área abrange um total de 174.412,0 km². Dentre as 12 regiões hidrográficas presentes no país, a Região hidrográfica Uruguai é a menor delas. Em contrapartida, essa bacia possui um elevado potencial hidrelétrico, que se destaca no cenário nacional. A disponibilidade hídrica natural da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai é muito influenciada por importantes variações especiais e temporais de alguns dos parâmetros climáticos, como o regime pluviométrico (MMA, 2006).

4.1 UHE MANSO

O aproveitamento Múltiplo (APM) Manso foi instalado no rio Manso, um tributário do rio Cuiabá, que drena a região de planície do Pantanal brasileiro. O reservatório situa-se no município de Chapada dos Guimarães, a nordeste de

Cuiabá-MT, capital do estado de Mato Grosso, localizado na região Centro-Oeste do Brasil, entre os paralelos 14º 40’ e 15º 20’ S e os meridianos 55° 20’ e 60º 00’, barrando vazões originais de uma bacia de 9265 km².

A UHE Manso está localizada na região hidrográfica do Paraguai, na bacia hidrográfica do rio Cuiabá, sub-bacia hidrográfica do rio Manso. A operadora da Usina é a Eletrobrás Furnas; a usina tem potência nominal de 212 MW.

A instalação e operação do reservatório do empreendimento APM Manso foi projetado para atender os seguintes objetivos: hidroeletricidade, controle de cheia, abastecimento de água à agricultura, turismo, pesca e recreação.

O projeto APM Manso apresenta uma barragem de 72 m de altura, inundando 427 km² com 73 10^8 m³, que produz um tempo de residência de 429 dias. Deste volume 29 10^8 m³ são usados para produção de eletricidade em turbinas com 210 MW de capacidade de geração de energia (SOUZA, 2009).

TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DA UHE MANSO.

Bacia hidrográfica	Rio Cuiabá
Área da bacia hidrográfica	9.265 km²
Nome do rio	Manso
Área do reservatório	427 km²
Queda bruta	59 m
Capacidade Instalada	210 MW
Volume máximo	7337 hm³
Volume mínimo	4386 hm³
Cota máxima	287 m
Cota mínima	278 m
Volume Vertido	4386 hm³
Volume desviado	4386 hm³
Canal fuga médio	224,8 m
Tipo de turbina	Francis
Número conjunto de máquinas	1
Unidades Geradoras	4

FONTE: ONS, 2016.

O reservatório APM Manso foi dimensionado com volume de espera capaz de conter, de forma integral, cheias afluentes à UHE Manso com período de retorno de até 20 anos (FURNAS, 2002).

A região hidrográfica do Paraguai possui uma disponibilidade de recursos hídricos que representam 1,31% da vazão média brasileira e 0,92% da vazão com permanência de 95% do tempo (Q_{95}). A Região compreende uma área de 362.259 km^2, dos quais 188.374,68 km^2 correspondem ao Mato Grosso e 173.874,32 km^2 ao Mato Grosso do Sul, 52% e 48 %, respectivamente (MMA, 2006).

A bacia do rio Cuiabá totaliza aproximadamente 29.000 km^2 de área, com perímetro de 841 km, abrangendo as cabeceiras dos rios Cuiabá da Larga e Cuiabá do Bonito, que são formadores do rio Cuiabá até a confluência do rio Coxipó-Assú, pouco a jusante da cidade de Santo Antônio do Leverger, pertencendo assim a Bacia do Alto Rio Paraguai (BAP). Nesta bacia estão inseridos 13 municípios: Acorizal, Rosário Oeste, Nobres, Jangada, Nossa Senhora do Livramento, Nova Brasilândia, Chapada dos Guimarães, Planalto da Serra, Santo Antônio do Leverger, Campo Verde, Barão de Melgaço e, entre esses, Cuiabá e Várzea Grande, principais núcleos urbanos do Estado (HMETSU, 2004).

A bacia do rio Cuiabá, uma das mais importantes para a formação da bacia do Alto Paraguai, apresenta uma superfície de, aproximadamente, 28.000 km^2 até as proximidades do município de Barão de Melgaço e estende-se entre os paralelos 14^o 18' e 17^o 00'S e 54^o 40' e 56^o 55'W (CAVINATTO et al., 1995).

O rio Cuiabá, que tem suas nascentes no município de Rosário Oeste, é inicialmente formado por dois pequenos cursos de água, Cuiabá do Bonito e Cuiabá da Larga, que afloram entre as serras Azuis e Cuiabá, numa altitude de 500 metros. O ponto de união desses cursos de água é denominado Limoeiro, onde o rio passa a ser chamado de Cuiabazinho. A precipitação média anual da bacia do rio Cuiabá é de 1.335 mm, com regime sazonal tipicamente tropical, cujo caráter deve-se aos sistemas regionais de circulação atmosférica (CAVINATTO et al., 1995).

O rio Manso é um dos principais afluentes do rio Cuiabá e um dos contribuintes do rio Paraguai, controlando uma área de drenagem de 9.365 km^2, que representa cerca de 40% da bacia do rio Cuiabá, na cidade do mesmo nome, e, aproximadamente, 2% da bacia hidrográfica formadora do Pantanal (CAVINATTO et al., 1995).

Lima (2001) estudou os valores de vazão registrados no rio Cuiabá, na capital mato-grossense, entre os anos de 1948 e 1998, portanto, antes da implantação da UHE Manso. Os valores médios máximos mensais variaram entre 400 m³/s e 1000 m³/s nos meses de janeiro a março, enquanto as vazões médias mínimas foram inferiores a 100 m³/s nos meses de agosto e setembro.

O rio Paraguai é um dos principais tributários da Bacia do Prata, a segunda maior bacia da América do Sul, superada apenas pela bacia do Amazonas e conta com 3.100.000 km^2 em sua totalidade. De todos os rios que formam a bacia do rio da Prata, o rio Paraguai é o que penetra mais em direção ao centro do continente. A Bacia do Alto Paraguai tem três regiões bastante distintas: o Planalto, o Pantanal e o Chaco (ANA, 2006).

A FIGURA 8 apresenta a curva de regularização do reservatório da UHE Manso, para o período que compreende de 1931 a 2015. A vazão firme da UHE Manso é de 400 m³/s, sendo que a porcentagem de regularização anual é de 96,32%, totalizando um valor de regularização de 164.3 m³/s. Entre as características do Aproveitamento Múltiplo de Manso, destaca-se o de regularizar os ciclos de cheias e secas do rio Cuiabá. O armazenamento total do sistema é de 552,4 MW.

O Planalto é uma região relativamente alta, com cotas acima de 200 m, podendo atingir até 1400 m, localizada na região leste da bacia, quase inteiramente em território brasileiro, onde a drenagem é bem definida e convergente (ANA, 2006).

O Pantanal é uma região baixa, localizada no centro da bacia, onde os rios inundam a planície e alimentam um intrincado sistema de drenagem que inclui lagos extensos, cursos de água divergentes e áreas de escoamento e inundação sazonal. A região do Pantanal apresenta cotas entre 80 e 150 m e foi formada pelo rebaixamento de uma grande região, simultaneamente ao surgimento da Cordilheira dos Andes (ANA, 2006).

A FIGURA 8 apresenta a localização da UHE Manso, localizada no estado de Mato Grosso, na bacia hidrográfica do rio Manso.

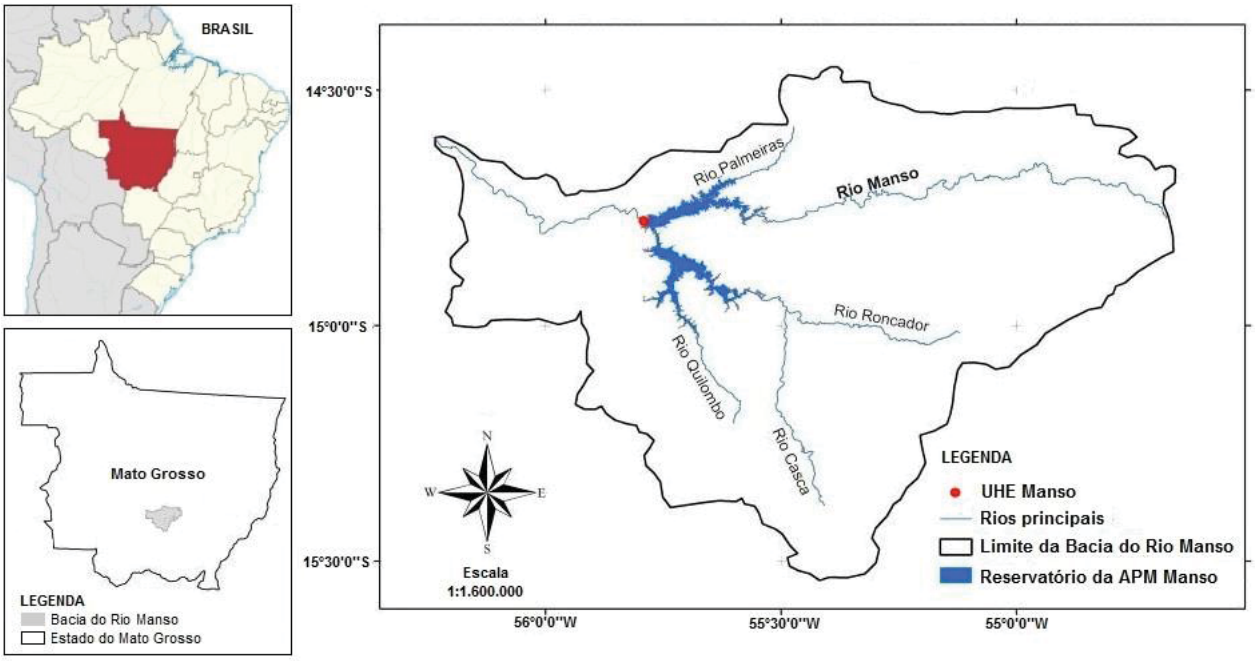

FIGURA 8 - LOCALIZAÇÃO DA UHE MANSO.
FONTE: Adaptado de SANTOS; OLIVEIRA; SOUZA, 2013.

4.2 UHE PASSO FUNDO

A UHE de Passo Fundo iniciou sua operação em maio de 1973. O barramento do rio Passo Fundo está localizado no município de Entre Rios do Sul (RS). O reservatório abrange áreas dos municípios de Campinas do Sul, Benjamim Constante do Sul, Cruzaltense, Jacutinga, Quatro Irmãos, Pontão, Trindade do Sul, Três Palmeiras, Ronda Alta além do próprio município de Entre Rios do Sul (HAHN et al., 2001).

A UHE Passo Fundo tem energia assegurada de 119 MW médios, possuindo duas unidades geradoras de 113 MW cada. A primeira unidade geradora foi disponibilizada por despacho do ONS em março de 1973 e a segunda, em junho de 1973 (ENGIE, 2017).

A UHE Passo Fundo está localizada na Bacia Hidrográfica do Rio Passo Fundo, afluente do rio Uruguai, situa-se ao norte do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 27°04' a 28°19' de latitude Sul e 52°13' a 52°51' de longitude Oeste. Abrange a província geomorfológica Planalto Meridional. Possui área de 4.802,87 km², abrangendo municípios como Ametista do Sul, Carazinho, Erechim, Frederico Westphalen, Passo Fundo e Sarandi, com população estimada

em 160.077 habitantes. Os principais cursos de água são: o Arroio Timbó e o Rio Passo Fundo (SEMA, 2017).

A TABELA 5 apresenta as características da UHE Passo Fundo, RS.

TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DA UHE PASSO FUNDO.

Bacia Hidrográfica	Rio Passo Fundo
Área da bacia hidrográfica	2.300 km²
Nome do rio	Rio Passo Fundo
Área do reservatório	151,5 km²
Queda bruta	258 m
Capacidade Instalada	226 MW
Volume máximo	1589 hm³
Volume mínimo	185 hm³
Cota máxima	598 m
Cota mínima	584 m
Volume Vertido	870 hm³
Volume desviado	185 hm³
Canal fuga médio	335,5m
Tipo de turbina	Francis
Número conjunto de máquinas	1
Unidades Geradoras	2

Fonte: ONS, 2016.

A UHE Passo Fundo tem energia assegurada de 119 MW médios, possuindo duas unidades geradoras de 113 MW cada. A primeira unidade geradora foi disponibilizada por despacho do ONS em março de 1973 e a segunda, em junho de 1973 (ENGIE, 2017).

A UHE Passo Fundo está localizada na Bacia Hidrográfica do Rio Passo Fundo, afluente do rio Uruguai, situa-se ao norte do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 27°04' a 28°19' de latitude Sul e 52°13' a 52°51' de longitude Oeste. Abrange a província geomorfológica Planalto Meridional. Possui área de 4.802,87 km², abrangendo municípios como Ametista do Sul, Carazinho, Erechim, Frederico Westphalen, Passo Fundo e Sarandi, com população estimada

em 160.077 habitantes. Os principais cursos de água são: o Arroio Timbó e o Rio Passo Fundo (SEMA, 2017).

O clima da região é temperado, apresentando uma distribuição intra-anual de chuvas, todavia com certa elevação no período de maio a setembro, coincidindo com o inverno. A precipitação média anual é de 1.784 mm, com temperatura anual variando entre 16º e 20º, e evapotranspiração média anual de 1.041 mm (MMA, 2006).

A Bacia Hidrográfica do Uruguai possui um regime de precipitações marcado por uma regular distribuição de chuvas ao longo do ano, com totais mensais superiores a 60 mm, sem ocorrência de grandes extremos: máximos ou mínimos. A vazão média anual da região é de 4.117 m³/s, isso corresponde a 2,6% da disponibilidade hídrica do país (MMA, 2006).

No que se refere à produção de energia, toda a Bacia do Rio Uruguai (incluindo as partes em territórios argentino e uruguaio), com um potencial da ordem de 41 kwmed/km^2, ainda oferece amplas possibilidades de novos aproveitamentos hidrelétricos. A UHE Passo Fundo, com um reservatório de acumulação plurianual sobre o rio Passo Fundo, deriva águas (100 m^3/s) para o rio Erechim, por meio de um túnel com 6 km, e com queda bruta de 260 m, O volume útil do reservatório é da ordem de 1.400 hm^3 (MMA, 2006).

A vazão firme da UHE Passo Fundo é de 102 m³/s, sendo que a porcentagem de regularização é de 79,5%, totalizando um valor de regularização de 45 m³/s. O armazenamento total do sistema é de 1149,34 MW.

A FIGURA 9 apresenta a localização da Usina Hidrelétrica de Passo Fundo que é alvo de estudo desta dissertação. Pode-se observar na FIGURA 9 a região hidrográfica do Uruguai, localizada na região sul do país, compreendendo os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

A Região hidrográfica, que corresponde à projeção da área da Bacia em território nacional, possui 73% de sua área no Rio Grande do Sul e 27% em Santa Catarina. A UHE Passo Fundo fica localizada na Sub-bacia do Rio Uruguai – Trecho alto – que compreende os dois formadores do rio Uruguai e seu trecho inteiramente em território brasileiro. Compreende uma área de 76.209 km², de relevo com grande declividade, com cotas variando de 1600 m a 160 m.

O trecho alto do Uruguai tem um elevado potencial hidrelétrico, o que é garantido pelo forte gradiente de relevo.

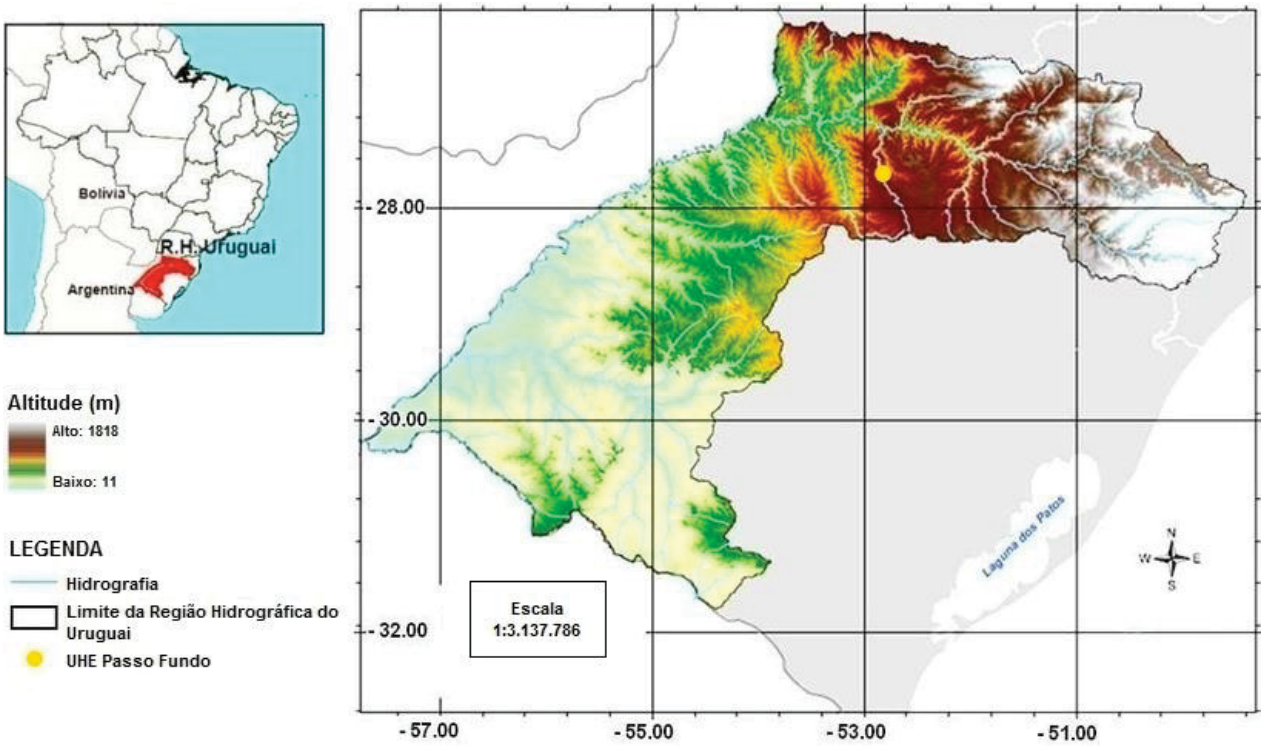

FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DA UHE PASSO FUNDO
FONTE: Adaptado de RODRIGUES et al., 2011.

5. RESULTADOS

Os impactos no regime hidrológico provenientes da presença e operação dos reservatórios da UHE Manso e UHE Passo Fundo foram analisados a partir das séries de vazões naturalizadas e defluentes que compreendem o período de 01/01/2003 até 31/12/2016, totalizando um período de 14 anos de dados de vazão para ambos os reservatórios estudados. Neste capítulo são apresentados os resultados alcançados com a aplicação da metodologia proposta.

5.1 UHE MANSO

5.1.1 Caracterização dos regimes

Os hidrogramas dos regimes hidrológicos naturalizados e defluentes do rio manso estão apresentados nas FIGURAS 10 e FIGURA 11. Os gráficos dos regimes hidrológicos permitem visualizar as variações de vazões ao longo dos anos de 2003 até 2016 ocorridas no rio Manso.

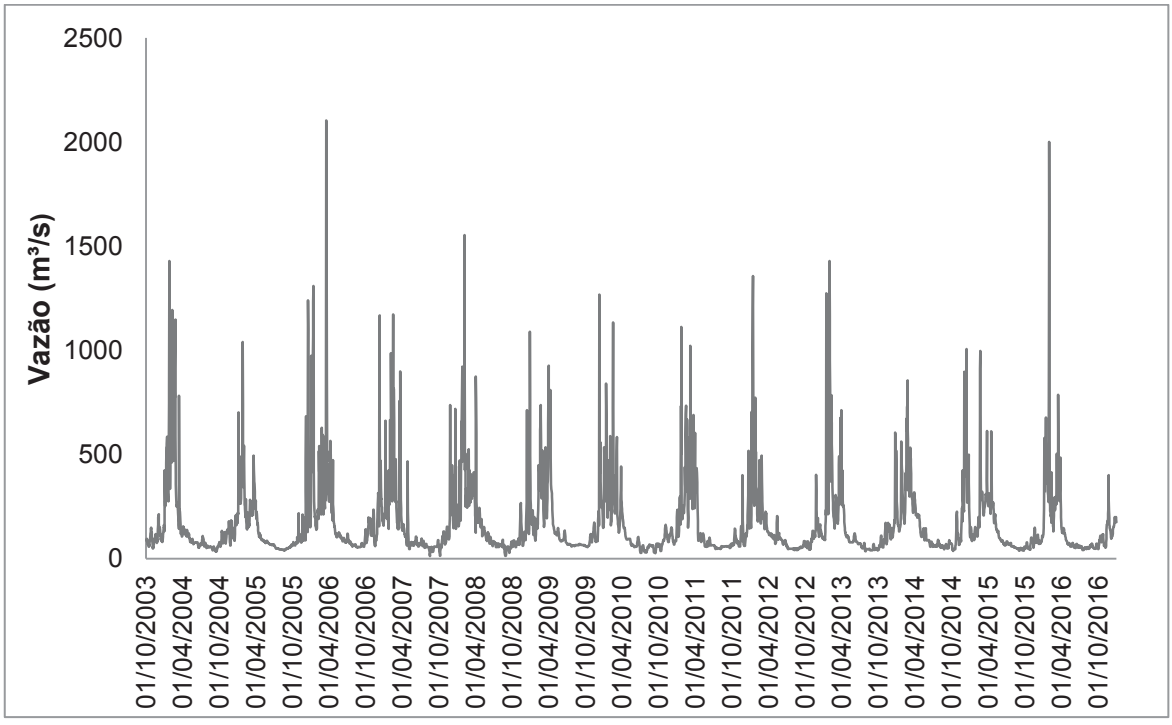

FIGURA 10 - VAZÕES NATURALIZADAS DO RIO MANSO A JUSANTE DO RESERVATÓRIO DA UHE MANSO.

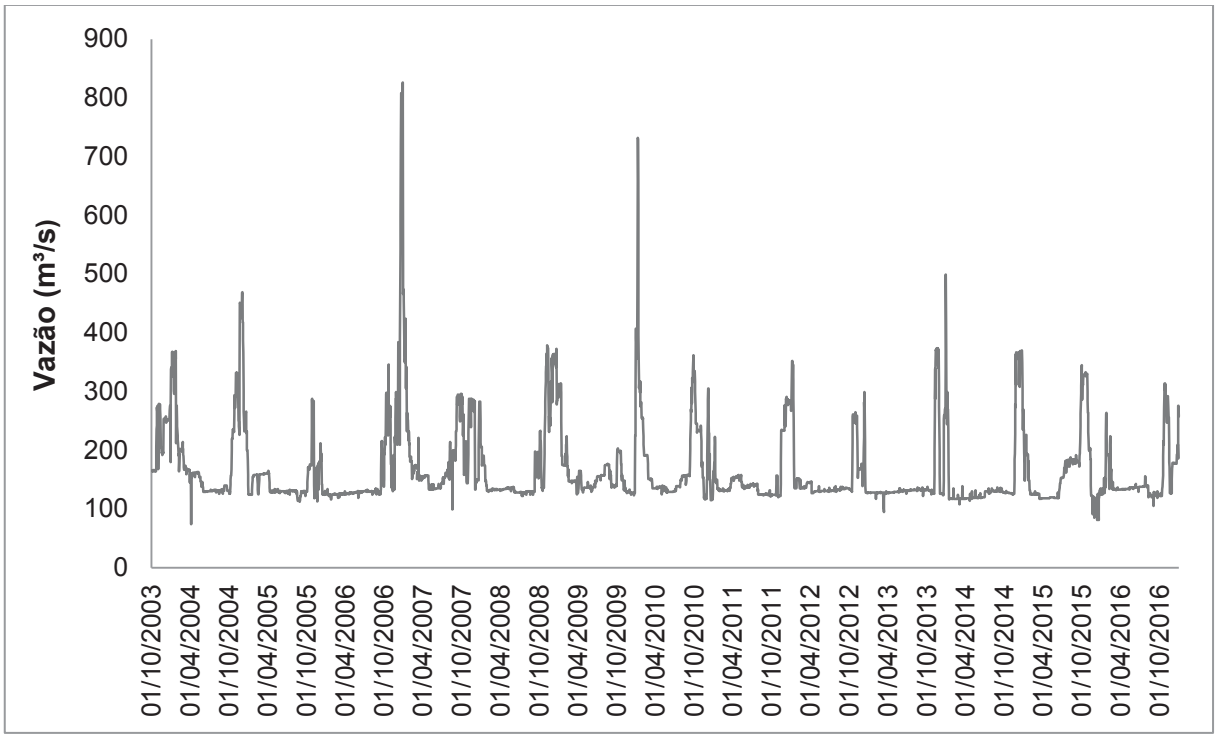

FIGURA 11 - VAZÕES DEFLUENTES DO RIO MANSO A JUSANTE DO RESERVATÓRIO DA UHE MANSO.

5.1.2 Alterações hidrológicas

A aplicação das séries de vazões no *software IHA* resultou em conjunto de valores que permitiram realizar uma análise geral das alterações hidrológicas ocorridas. A tabela 7 apresenta os resultados relativos à mediana, percentil 25% e percentil 75% das vazões naturalizadas e defluentes do rio Manso a jusante do reservatório da UHE Manso.

Verifica-se na tabela 7 a alteração ocorrida nos valores dessas estatísticas comparando-se as vazões naturalizadas e defluentes. O valor da mediana sofreu um aumento de 36,75 m³/s (37%). Nos percentis 25% e 75% ocorreram aumento de 65% e redução de 14% respectivamente.

O aumento do percentil 25% reflete no aumento das vazões mínimas, redução e duração dos pulsos baixos. O impacto do aumento do percentil 25% é refletido nas alterações positivas de agosto e setembro.

A redução de 16% no percentil de 75% reflete na redução das vazões máximas e na redução da quantidade de pulsos altos.

A TABELA 7 apresenta uma visão geral das mudanças básicas ocorridas no rio Manso em virtude da presença e operação do reservatório da UHE Manso.

TABELA 7 - RESULTADO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS BÁSICAS

Vazões Naturalizadas	
Mediana	10,71 l/s/km²
Percentil 25%	7,03 l/s/km²
Percentil 75%	21,69 l/s/km²
Vazões Defluentes	
Mediana	14,67 l/s/km²
Percentil 25%	13,92 l/s/km²
Percentil 75%	18,56 l/s/km²

As alterações dos percentis de 25% e 75% identificados nos cinco grupos dos parâmetros hidrológicos estão sintetizadas na TABELA 8.

I. No grupo 1, representado pela magnitude das vazões mensais, os meses com alterações positivas no percentil 25% foram outubro, junho, julho, agosto e setembro com aumento de 108%, 83%, 151%, 146% e 145%, respectivamente. Os meses com variação positiva no percentil 75% foram outubro, junho, julho, agosto e setembro com elevação de 67%, 83%, 110%, 133% e 120%, respectivamente.

II. No grupo 2, representado pela magnitude e duração das vazões extremas, os fatores com alteração positiva no percentil 25% foram as mínimas de 1, 3, 7, 30 e 90 dias com aumento de 211%, 247%, 231%, 172% e 143%, respectivamente; em relação às máximas de 1, 3 e 7 dias houve redução de -70%, -60%, -50%. Já no percentil 75% ocorreram aumentos nas mínimas de 1, 3, 7, 30 e 90 dias com aumento de 191%, 191%, 162%, 143% e 119%, respectivamente. Ocorreram reduções nas máximas de 1, 3 e 7 dias com reduções de 68%, 64% e 56%, respectivamente.

III. O grupo 3, representado pela periodicidade das vazões em condições extremas, teve alteração na data juliana mínima de -25% no percentil de 25% e –84% no percentil de 75%. Na data juliana máxima houve alteração de 124% no percentil de 75%.

IV. O grupo 4, representado pela frequência e duração dos pulsos altos e baixos, apresentou reduções nos números de pulsos altos de -61% no percentil de 25% e -59% no percentil de 75%. Na duração dos pulsos altos houve aumento de 50% no percentil de 25% e aumento de 102% no percentil de 75%.

V. O grupo 5, representado pela taxa e frequência de mudanças de vazões, houve reduções nas taxas de ascensão de 72% no percentil de 25% e redução de 50% no percentil de percentil de 75%. Na taxa de recessão houve redução de 41% no percentil de 25% e 86% no percentil de 75%. No número de inversões houve redução de 11% nos percentil de 25% e 75%.

TABELA 8 - VALORES DOS PERCENTIS DE 25% E 75% DAS VAZÕES NATURALIZADAS E DEFLUENTES DO RIO MANSO

	Pré-impacto (Naturalizado)		**Pós-impacto (Defluente)**	
	Percentil 25%	**Percentil 75%**	**Percentil 25%**	**Percentil 75%**
Grupo 1 - Magnitude das vazões Mensais				
Outubro (m³/s)	62	86	130	144
Novembro (m³/s)	90	120	129	161
Dezembro (m³/s)	123	236	130	162
Janeiro (m³/s)	192	388	136	223
Fevereiro (m³/s)	230	339	147	290
Março (m³/s)	209	306	138	298
Abril (m³/s)	122	234	12	283
Maio (m³/s)	75	116	124	173
Junho (m³/s)	67	82	123	15
Julho (m³/s)	49	68	125	143
Agosto (m³/s)	51	58	126	136
Setembro (m³/s)	52	61	128	135
Grupo 2 - Magnitude e Duração das vazões extremas				
Mínima de 1 dia (m³/s)	31	42	98	122
Mínima de 3 dias (m³/s)	32	43	111	125
Mínima de 7 dias (m³/s)	34	48	114	126
Mínima de 30 dias (m³/s)	43	53	118	129
Mínima de 90 dias (m³/s)	51	61	123	135
Máxima de 1 dia (m³/s)	1066	1491	310	477
Máxima de 3 dias (m³/s)	788	1244	309	437
Máxima de 7 dias (m³/s)	615	899	305	393
Máxima de 30 dias (m³/s)	447	580	279	365
Máxima de 90 dias (m³/s)	335	415	218	272
Grupo 3 - Periodicidade das vazões extremas				
Data Juliana mínima	227	279	166	43
Data Juliana máxima	5	40	365	90
Grupo 4 - Frequência e Duração dos pulsos altos e baixos				
Número de pulsos baixos	5	9	0	0
Duração dos pulsos baixos (dias)	3	10	0	0
Número de pulsos altos	5	8	2	3
Duração dos pulsos altos (dias)	4	14	6	28
Grupo 5 - Taxa e frequência de mudança de vazões				
Taxa de ascensão (m³/s/dia)	7	8	2	4
Taxa de recessão (m³/s/dia)	-9	-7	-5	-1
Número de Inversões	103	130	92	115

O comportamento dos valores das vazões defluentes e naturais é resumido pelos indicadores de alteração hidrológica apresentado na TABELA 9. As alterações ocorridas nos parâmetros do *IHA* apresentaram intensidades de alterações distintas nos diferentes grupos avaliados:

I. O grupo 1, representado pela magnitude das vazões mensais, apresentou alterações predominantemente positivas, sendo os meses de outubro, junho, julho, agosto e setembro com alterações de 88%, 71%, 115%, 136% e 134%, respectivamente.

II. O grupo 2, representado pela magnitude e duração das vazões em condições extremas, apresentou alterações positivas nas vazões mínimas de 7, 30 e 90 dias com medianas de 184%, 166% e 130%, respectivamente. Nas vazões máximas foi verificadas reduções das máximas de 1, 3 e 7 dias no valor de 71%, 62% e 49%, respectivamente. Foi verificado, em geral, elevações das vazões mínimas de 1, 3, 7, 30 e 90 dias. Todavia, as vazões máximas de 1, 3, 7, 30 e 90 dias apresentaram reduções das vazões máximas.

III. O grupo 3, representado pela periodicidade das vazões em condições extremas, apresentou alterações na data juliana mínima de +31% na mediana e aumento de 110% na data juliana máxima.

IV. O grupo 4, representado pela frequência e duração dos pulsos altos e baixos, apresentou reduções nos números de pulsos altos e nos números de pulsos baixos de 100% e 58%, respectivamente.

V. O grupo 5, representado pela taxa e frequência de mudança de vazões, apresentou reduções de 55%, 56% e 11% nas taxas de ascensão, recessão e número de inversões, respectivamente.

TABELA 9 - INDICADORES DE ALTERAÇÃO HIDROLÓGICA DOS REGIMES NATURAL E DEFLUENTE DO RIO MANSO

Parâmetros *IHA*	Natural				Defluente			
	Mediana	**Coef. Disp.**	**Mínima**	**Máxima**	**Mediana**	**Coef.Disp.**	**Mínima**	**Máxima**
Grupo 1 - Magnitude das vazões Mensais								
Outubro (m³/s)	70	0,34	53	138	132	0,11	90,3	171
Novembro (m³/s)	109	0,27	83	136	133	0,24	123	198
Dezembro (m³/s)	149	0,76	84	397	134	0,24	123	280
Janeiro (m³/s)	276	0,71	116	431	171	0,51	124	328
Fevereiro (m³/s)	323	0,34	172	633	192	0,75	123	346
Março (m³/s)	292	0,33	171	450	170	0,94	119	384
Abril (m³/s)	137	0,82	113	319	163	0,96	118	340
Maio (m³/s)	83	0,49	67	135	135	0,36	117	202
Junho (m³/s)	78	0,20	58	90	133	0,21	117	167
Julho (m³/s)	61	0,30	39	74	132	0,14	118	160
Agosto (m³/s)	56	0,13	43	65	133	0,07	119	155
Setembro (m³/s)	55	0,16	42	71	130	0,05	120	139
Grupo 2 - Magnitude e Duração das vazões extremas								
Mínima de 1 dia (m³/s)	38	0,28	13	56	114	0,21	47	124
Mínima de 3 dias (m³/s)	39	0,28	14	56	117	0,12	48	128
Mínima de 7 dias (m³/s)	41	0,33	17	61	118	0,10	62	128
Mínima de 30 dias (m³/s)	46	0,21	41	63	124	0,09	84	132
Mínima de 90 dias (m³/s)	56	0,19	50	69	129	0,09	118	138
Máxima de 1 dia (m³/s)	1268	0,34	857	2104	366	0,45	288	826
Máxima de 3 dias (m³/s)	956	0,48	774	1912	359	0,36	280	808
Máxima de 7 dias (m³/s)	695	0,41	592	1182	350	0,25	259	779
Máxima de 30 dias (m³/s)	488	0,27	402	753	311	0,28	208	535
Máxima de 90 dias (m³/s)	364	0,22	290	463	240	0,23	170	335
Grupo 3 - Periodicidade das vazões extremas								
Data Juliana mínima	241	0,14	197	291	318	0,34	33	340
Data Juliana máxima	25	0,10	14	363	53	0,25	26	366
Grupo 4 - Frequência e Duração dos pulsos altos e baixos								
Número de pulsos baixos	7	0,57	3	10	0	0	0	2
Duração dos pulsos baixos (dias)	5	1,25	2	19	4,5		4,5	4,5
Número de pulsos altos	6	0,58	4	10	2,5	0,6	1	6
Duração dos pulsos altos (dias)	7	1,39	1,5	19,5	15	1,46	4	71
Grupo 5 - Taxa e frequência de mudança de vazões								
Taxa de ascensão (m³/s/dia)	7,8	0,16	5,26	9,35	3,5	0,64	1	7,5
Taxa de recessão (m³/s/dia)	-8	-0,19	-14	-4,62	-3,5	-1,21	-7	-1
Número de Inversões	115	0,23	83	160	102	0,23	75	149

5.1.3 Indicadores significativamente alterados

A aplicação dos 31 indicadores hidrológicos no teste de Wilcoxon Pareado indicou que a regularização realizada pelo reservatório da UHE Manso pode ter alterado significativamente 26 indicadores hidrológicos.

Os indicadores hidrológicos alterados foram:

I. Vazão média de outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, maio, junho, julho, agosto e setembro.
II. Máxima de 1 dia
III. Máxima de 3 dias
IV. Máxima de 7 dias
V. Máxima de 30 dias
VI. Máxima de 90 dias
VII. Data Juliana mínima
VIII. Número de pulsos altos e baixos
IX. Duração dos pulsos altos (dias)
X. Taxa de ascensão e recessão ($m^3/s/d$)
XI. Mínima de 1 dia
XII. Mínima de 3 dias
XIII. Mínima de 7 dias
XIV. Mínima de 30 dias
XV. Mínima de 90 dias

A redução das vazões máximas de 1,3, 7, 30 e 90 dias é um reflexo da redução nos pulsos de vazões altas e na taxa de ascensão. O aumento das mínimas de 1, 3, 7, 30 e 90 dias é um reflexo na diminuição dos pulsos baixos e na taxa de recessão. A alteração positiva ocorrida nos meses de agosto e setembro, meses com baixa precipitação, é reflexo do aumento das vazões mínimas e dos números de pulsos baixos.

5.1.4 Comparação das curvas de permanência de vazão

As curvas de permanência de vazão do rio Manso para o período pré-impacto (vazões naturalizadas) e período pós-impacto (vazões defluentes) da UHE Manso estão apresentadas na FIGURA 12. As vazões naturalizadas estão

representadas pela curva de cor preta e as vazões defluentes pela curva de linha vermelha.

Pode-se perceber que as vazões defluentes que compreendem a probabilidade de excedência 30% ou menos sofreram redução em relação às vazões naturalizadas. Essa redução é proveniente da diminuição das vazões máximas, da quantidade de pulsos altos e da taxa de ascensão, tais alterações eram esperadas que fossem identificadas.

Em contrapartida, as vazões defluentes que compreendem a probabilidade de excedência de 30% ou mais sofreram uma aumento em relação às vazões naturalizadas, essa elevação é reflexo do aumento das vazões mínimas, da redução dos pulsos baixos e do aumento da taxa de recessão, proveniente do efeito regularizador do reservatório.

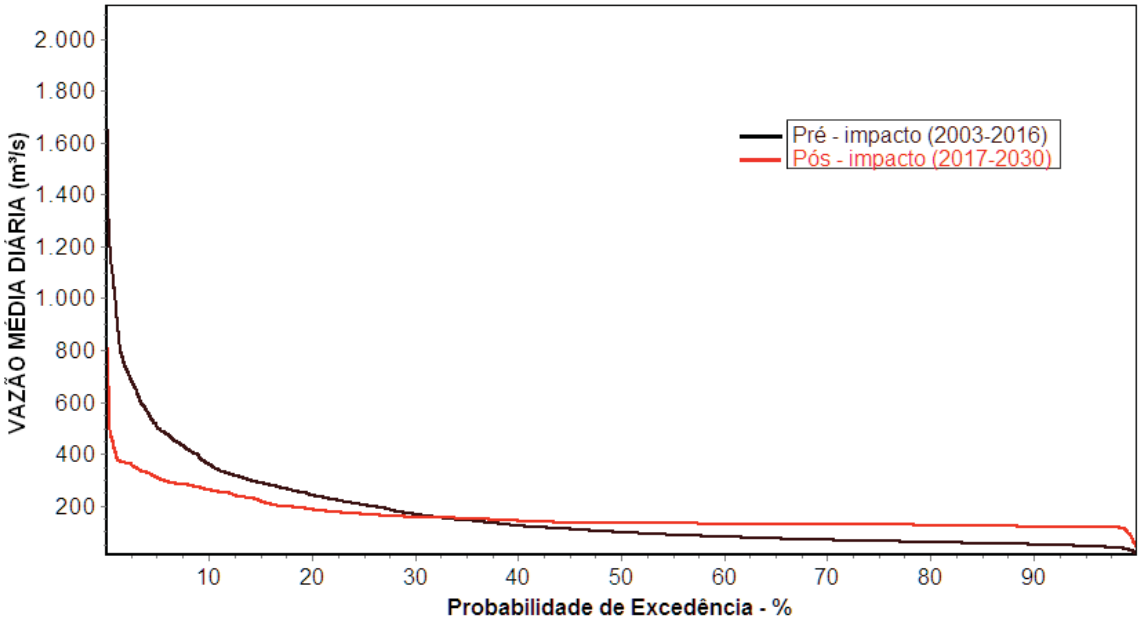

FIGURA 12 - CURVAS DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES DO RIO MANSO.

O teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov realizado com os dados de vazões naturalizadas e defluentes do rio Manso para o período anterior ao impacto e posterior ao impacto indicou que existem diferenças significativas entre as curvas de permanência de vazão. O resultado do teste indicou que a estatística de Kolmogorov-Smirnov (0,556), que é o maior desvio que ocorre entre as duas curvas. O valor resultante do p-valor foi de 0,0001, o que, considerando um nível de significância de 0,05, permite concluir pela rejeição da hipótese nula.

5.2 UHE PASSO FUNDO

5.2.1 Caracterização dos regimes

Os hidrogramas dos regimes hidrológicos naturalizados e defluentes do rio Passo Fundo estão apresentados nas FIGURAS 13 e FIGURA 14, respectivamente. Os gráficos dos regimes hidrológicos permitem visualizar as variações de vazões ocorridas ao longo dos anos de 2003 até 2016 no rio Passo Fundo.

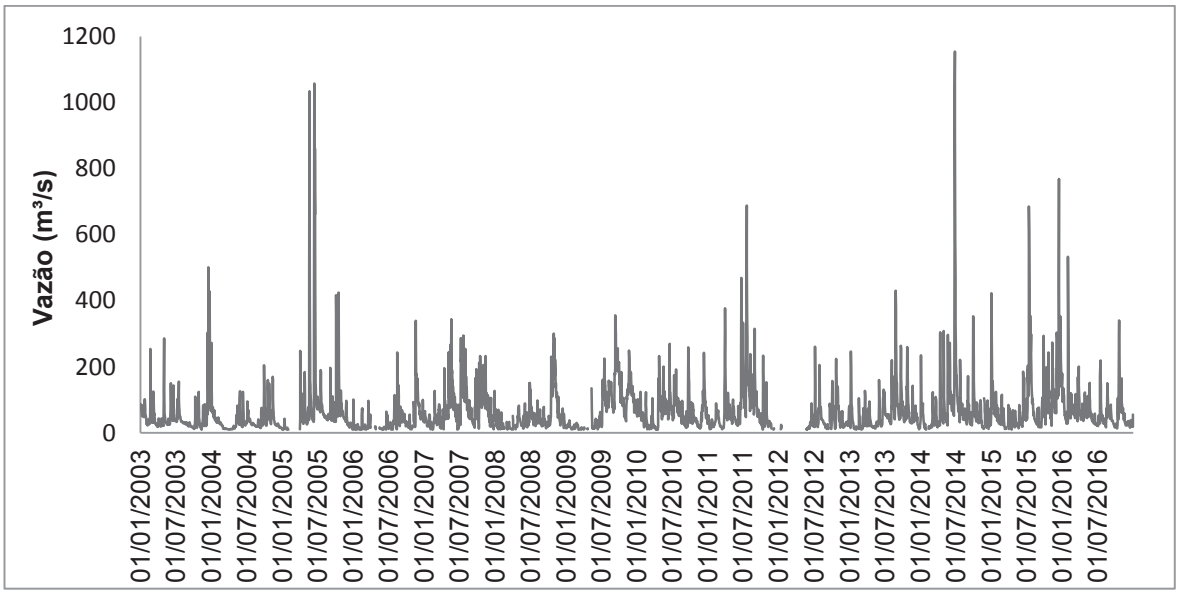

FIGURA 13 - VAZÕES NATURALIZADAS DO RIO PASSO FUNDO A JUSANTE DO RESERVATÓRIO DA UHE PASSO FUNDO.

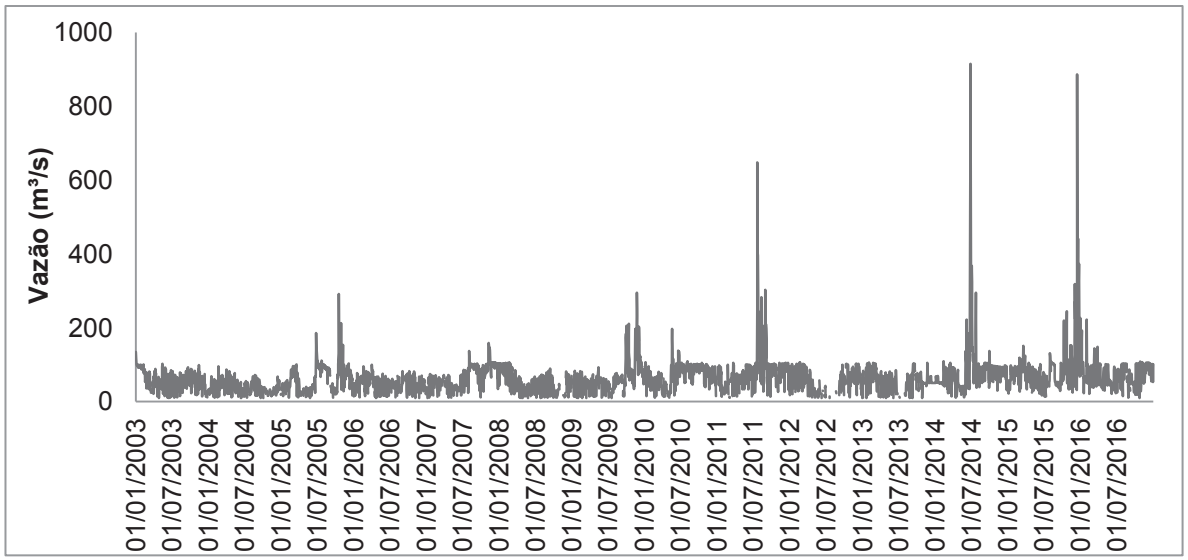

FIGURA 14 - VAZÕES DEFLUENTES DO RIO PASSO FUNDO A JUSANTE DO RESERVATÓRIO DA UHE PASSO FUNDO.

5.2.2 Alterações hidrológicas

A aplicação dos dados no software *IHA* resultou em conjunto de valores que permitiram realizar uma análise geral das alterações hidrológicas ocorridas. A TABELA 10 apresenta dados relativos à mediana, percentil 25% e percentil 75% das vazões naturalizadas e defluentes do rio Passo Fundo a jusante do reservatório da UHE Passo Fundo.

Verifica-se na TABELA 10 a variação nas estatísticas comparando-se as vazões naturalizadas e defluentes. O valor da mediana sofreu um aumento de 21 m³/s (53,8%). Nos percentis 25% e 75% ocorreram aumentos de 17 m³/s (80%) e 9 m³/s (12%), respectivamente.

O aumento do percentil 25% reflete no aumento das vazões mínimas e na redução da duração dos pulsos baixos. O impacto do aumento do percentil 25% é refletido na elevação positiva de março, abril, maio, junho e agosto.

A TABELA 10 permite ter uma visão geral das mudanças básicas ocorridas no rio Passo Fundo em virtude da presença e operação do reservatório da UHE Passo Fundo.

TABELA 10 - RESULTADO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS BÁSICAS.

Vazões Naturalizadas	
Mediana	16,9 l/s/km²
Percentil 25%	9,1 l/s/km²
Percentil 75%	32,17 l/s/km²
Vazões Defluentes	
Mediana	26,08 l/s/km²
Percentil 25%	16,52 l/s/km²
Percentil 75%	36,08 l/s/km²

As alterações dos percentis de 25% e 75% identificados nos cinco grupos dos parâmetros hidrológicos estão sintetizadas na TABELA 11.

I. No grupo 1, representado pela magnitude das vazões mensais, os meses com alterações positivas no percentil 25% foram novembro (64%), junho (93%), julho (22%) e agosto (83%). Os meses com variação positiva no percentil 75% foram junho, agosto, setembro e abril com elevação de 2%, 15%, 59% e 15%,

respectivamente. Os meses com variação negativa no percentil 75% foram outubro, novembro, maio, julho com redução de 6%, 7%, 6%, 22%, respectivamente.

II. No grupo 2, representado pela magnitude e duração das vazões extremas, os fatores com alteração positiva no percentil 25% foram as mínimas de 7, 30 e 90 dias com aumentos de 26%, 102%, 124%, respectivamente; em relação às máximas de 1, 3, 7, 30 e 90 dias houve reduções de 59%, 57%, 51%, 35% e 16%, respectivamente. Já no percentil 75% ocorreram aumentos nas mínimas de 7, 30 e 90 dias com aumentos de 80%, 48% e 58%, respectivamente. Foram identificadas reduções nas máximas de 1, 3, 7, 30 e 90 dias com reduções de 42%, 37%, 34%, 29% e 21%, respectivamente.

III. O grupo 3, representado pela periodicidade das vazões em condições extremas, teve alterações na data juliana máxima de 7% no percentil de 25% e de 12% no percentil de 75%.

IV. O grupo 4, representado pela frequência e duração dos pulsos altos e baixos, apresentou reduções nas durações dos pulsos baixos e durações dos pulsos altos de 50% e 21%, respectivamente; no percentil de 25% houve aumento nos números de pulsos altos de 44% no percentil de 25%. No percentil de 75% houve aumento nos números de pulsos altos e duração dos pulsos altos de 72% e 14%, respectivamente; além disso, houve redução na duração dos pulsos baixos de 73%.

V. O grupo 5, representado pela taxa e frequência de mudanças de vazões, apresentou aumentos nas taxas de ascensão, taxas de recessão, números de inversões de 60%, 44% e 52% no percentil de 25%, respectivamente. Em relação ao percentil de 75%, houve aumentos nas taxas de ascenção, taxas de recessão e números de inversões de 36%, 143% e 36%, respectivamente.

TABELA 11 - VALORES DOS PERCENTIS DE 25% E 75% DAS VAZÕES NATURALIZADAS E DEFLUENTES DO RIO PASSO FUNDO.

Parâmetros	Pré-impacto (naturalizadas)		Pós-impacto (regularizadas)	
	Percentil 25%	Percentil 75%	Percentil 25%	Percentil 75%
Grupo 1 - Magnitude das vazões Mensais				
Setembro (m³/s)	19	57	48	91
Outubro (m³/s)	23	95	59	89
Novembro (m³/s)	24	94	39	87
Dezembro (m³/s)	10	85	41	96
Janeiro (m³/s)	7	52	52	77
Fevereiro (m³/s)	3	37	48	81
Março (m³/s)	4	29	53	71
Abril (m³/s)	3	52	42	60
Maio (m³/s)	7	63	22	59
Junho (m³/s)	19	71	38	72
Julho (m³/s)	25	122	31	95
Agosto (m³/s)	29	83	53	95
Grupo 2 - Magnitude e Duração das vazões extremas				
Mínima de 1 dia (m³/s)	3	7	0	2
Mínima de 3 dias (m³/s)	4	8	2	8
Mínima de 7 dias (m³/s)	5	10	6	18
Mínima de 30 dias (m³/s)	7	21	14	30
Mínima de 90 dias (m³/s)	12	31	26	50
Máxima de 1 dia (m³/s)	322	728	129	417
Máxima de 3 dias (m³/s)	260	547	112	344
Máxima de 7 dias (m³/s)	210	411	103	268
Máxima de 30 dias (m³/s)	141	229	91	161
Máxima de 90 dias (m³/s)	83	148	70	117
Grupo 3 - Periodicidade das vazões extremas				
Data Juliana mínima	33	96	163	348
Data Juliana máxima	184	298	197	334
Grupo 4 - Frequência e Duração dos pulsos altos e baixos				
Número de pulsos baixos	6	15	15	38
Duração dos pulsos baixos (dias)	2	5	1	1
Número de pulsos altos	13	19	18	33
Duração dos pulsos altos (dias)	2	4	1	4
Grupo 5 - Taxa e frequência de mudança de vazões				
Taxa de ascensão (m³/s/dia)	5	9	8	12
Taxa de recessão (m³/s/dia)	-8	-4	-12	-9
Número de Inversões	113	144	172	196

O comportamento dos valores das vazões defluentes e naturais é resumido pelos indicadores de alteração hidrológica apresentado na TABELA 12. As alterações ocorridas nos parâmetros do *IHA* apresentaram intensidades de alterações distintas nos diferentes grupos avaliados:

I. O grupo 1, representado pela magnitude das vazões mensais, apresentou alterações predominantemente positivas, sendo os meses de setembro, outubro, novembro, dezembro, abril, maio e junho com alterações de 42%, 20%, 85%, 107%, 89%, 37% e 8%, respectivamente.

II. O grupo 2, representado pela magnitude e duração das vazões em condições extremas, apresentou alterações positivas nas vazões mínimas de 3, 7, 30 e 90 dias com medianas de 3,5%, 44%, 63,6% e 24%, respectivamente. Nas vazões máximas foi verificada redução das máximas de 1, 3, 7, 30 e 90 dias no valor de 54%, 51%, 50%, 38% e 24%, respectivamente. Foi verificada, em geral, elevação das vazões mínimas de 7, 30 e 90 dias. No entanto, as vazões máximas de 1, 3, 7, 30 e 90 dias apresentaram redução.

III. O grupo 3, representado pela periodicidade das vazões em condições extremas, apresentou alteração na data juliana máxima de +22% na mediana. Todavia, a alteração na data juliana mínima foi três vezes maior em relação às máximas.

IV. O grupo 4, representado pela frequência e duração dos pulsos altos e baixos, apresentou elevação no número de pulsos baixos, número de pulsos altos e duração de pulsos altos de 130%, 47% e 20%, respectivamente.

V. O grupo 5, representado pela taxa e frequência de mudança de vazões, apresentou alterações de 43%, -50% e 48% nas taxas de ascensão, recessão e número de inversões, respectivamente.

TABELA 12 - INDICADORES DE ALTERAÇÃO HIDROLÓGICA DOS REGIMES NATURAL E REGULARIZADO DO RIO PASSO FUNDO.

Parâmetros *IHA*	Natural				Defluente			
	Mediana	**Coef.Disp.**	**Mínima**	**Máxima**	**Mediana**	**Coef.Disp.**	**Mínima**	**Máxima**
Grupo 1 - Magnitude das vazões Mensais								
Setembro (m³/s)	43	1	18	194	60	1	31	98
Outubro (m³/s)	62	1	21	111	74	0	20	102
Novembro (m³/s)	39	2	23	125	72	1	9	112
Dezembro (m³/s)	32	2	4	214	67	1	25	170
Janeiro (m³/s)	30	1	4	75	66	0	35	98
Fevereiro (m³/s)	19	1	3	83	60	1	35	95
Março (m³/s)	18	1	2	67	61	0	41	94
Abril (m³/s)	26	2	2	65	49	0	23	80
Maio (m³/s)	38	1	5	131	52	1	16	74
Junho (m³/s)	42	1	17	109	45	1	13	126
Julho (m³/s)	80	1	19	165	57	1	5	102
Agosto (m³/s)	50	1	23	115	63	1	8	106
Grupo 2 - Magnitude e Duração das vazões extremas								
Mínima de 1 dia (m³/s)	4	1	1	10	1	2	0	9
Mínima de 3 dias (m³/s)	5	1	1	10	5	1	1	33
Mínima de 7 dias (m³/s)	7	1	1	16	11	1	3	41
Mínima de 30 dias (m³/s)	13	1	2	30	21	1	6	51
Mínima de 90 dias (m³/s)	29	1	3	48	36	1	11	60
Máxima de 1 dia (m³/s)	430	1	233	1155	198	1	93	915
Máxima de 3 dias (m³/s)	351	1	186	1031	172	1	89	740
Máxima de 7 dias (m³/s)	278	1	119	729	137	1	68	508
Máxima de 30 dias (m³/s)	172	1	75	278	106	1	62	231
Máxima de 90 dias (m³/s)	110	1	52	156	84	1	47	143
Grupo 3 - Periodicidade das vazões extremas								
Data Juliana mínima	81	0,17	22	355	255	0,49	72	360
Data Juliana máxima	239	0,31	142	352	293	0,37	34	349
Grupo 4 - Frequência e Duração dos pulsos altos e baixos								
Número de pulsos baixos	10	1	3	16	23	1	3	43
Duração dos pulsos baixos (dias)	3	1	2	26	1	0	1	2
Número de pulsos altos	16	0	6	24	24	1	10	45
Duração dos pulsos altos (dias)	3	1	1	12	3	1	1	6
Grupo 5 - Taxa e frequência de mudança de vazões								
Taxa de ascensão (m³/s/dia)	7	0,57	2	14	10	0,43	6	16
Taxa de recessão (m³/s/dia)	-7	-0,64	-11	-2	-11	-0,24	-14	-6
Número de Inversões	122	0,25	69	175	181	0,13	144	199

5.2.3 Indicadores significativamente alterados

A aplicação dos 31 indicadores hidrológicos no teste de Wilcoxon Pareado apresentou que a regularização realizada pelo reservatório da UHE Passo Fundo alterou significativamente 10 indicadores hidrológicos.

Os indicadores hidrológicos alterados foram:

I. Mínima de 1 dia
II. Mínima de 30 dias
III. Mínima de 90 dias
IV. Máxima de 1 dia
V. Máxima de 3 dias
VI. Máxima de 7 dias
VII. Máxima de 30 dias
VIII. Duração dos pulsos baixos
IX. Número de pulsos baixos
X. Número de pulsos altos

A variação entre os limites altos e baixos corroborou para que houvesse elevação nos números de pulsos altos e baixos. As medianas mensal e sazonal (30 e 90 dias) sofreram alteração devido a reduzida mudança nas vazões mínimas de curta duração (3 e 7 dias).

5.2.4 Comparação das curvas de permanência de vazão

As curvas de permanência de vazão do rio Passo Fundo para o período pré-impacto (vazões naturalizadas) e período pós-impacto (vazões defluentes) da UHE Passo Fundo estão apresentadas na FIGURA 15. As vazões naturalizadas estão representadas pela linha preta e as vazões defluentes pela linha vermelha.

Pode-se identificar que as vazões naturalizadas que compreendem a probabilidade de excedência 15% ou menos sofreram redução em relação às vazões defluentes, essa redução é resultado da diminuição das vazões máximas.

Em contrapartida, as vazões defluentes que compreendem a probabilidade de excedência entre 25% e 90% mais sofreram aumento em relação às vazões naturalizadas, essa elevação é reflexo do aumento das vazões mínimas de 30 e 90 dias e da taxa de recessão.

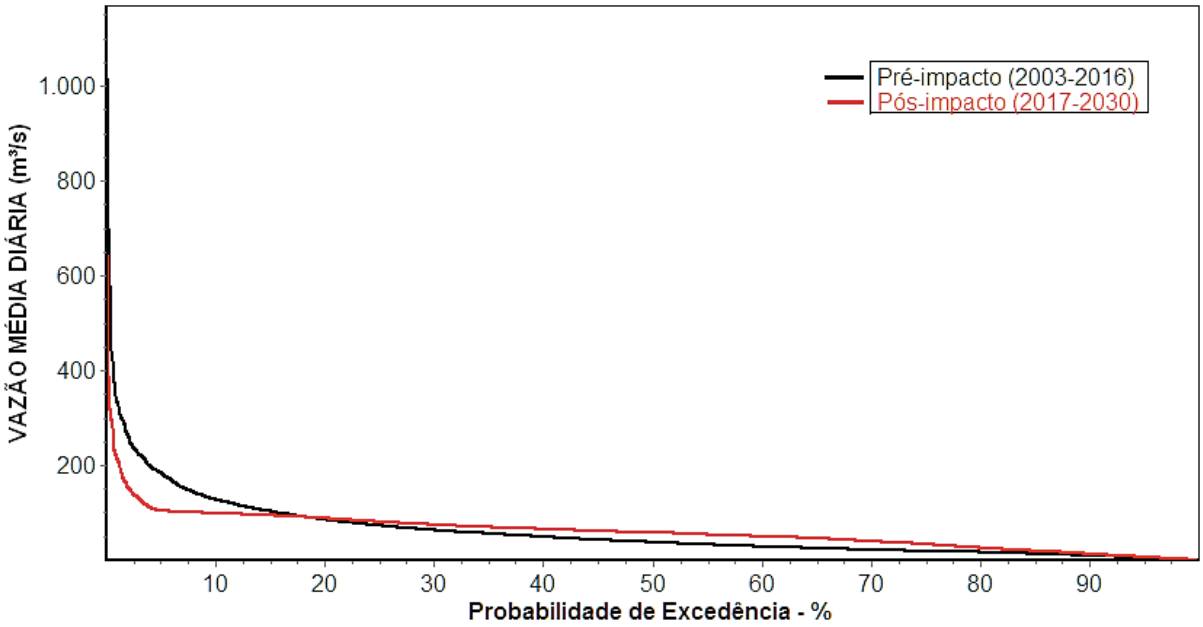

FIGURA 15 - CURVAS DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES DA UHE PASSO FUNDO.

O teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov realizado com os dados de vazões naturalizadas e defluentes do rio Passo Fundo para o período anterior ao impacto e posterior ao impacto indicou que existem diferenças significativas entre as curvas de permanência de vazão. O resultado do teste indicou que a estatística de Kolmogorov-Smirnov (0,281), que é o maior desvio que ocorre entre as duas curvas. O valor resultante do p-valor foi de 0,0001, o que, considerando um nível de significância de 0,05, permite concluir pela rejeição da hipótese nula.

6. DISCUSSÃO

O presente capítulo propõe realizar a discussão dos resultados obtidos por este trabalho, empenhando-se em analisar os dados obtidos e comparar com resultados de trabalhos anteriormente produzidos. Além disso, procura enfatizar os principais pontos dos resultados para possibilitar uma visão geral dos impactos identificados.

6.1 UHE MANSO

6.1.1 Parâmetros significativamente alterados

De acordo com os resultados obtidos, ocorreu alteração no regime hidrológico do rio Manso comparando-se o período de pré-impacto com o período de pós-impacto.

Em relação aos padrões anuais de alteração hidrológica, pode-se identificar que houve uma predominância do aumento das vazões nos períodos de seca e redução das vazões nos períodos de maiores índices pluviométricos. Esse comportamento está relacionado com a grande capacidade de armazenamento do reservatório da UHE Manso, cuja regularização anual é de 96,32%. A grande capacidade de regularização, segundo Vogel et al. (2007), é fator preponderante para alteração de condições hidrológicas a jusante de reservatórios.

De acordo com Zeilhofer e Moura (2009), as principais alterações hidrológicas ocorridas após a barragem de Manso iniciar a operação foi: aumento das vazões durante a estação seca, diminuição das altas no início da estação chuvosa e diminuição das vazões altas no período de inundação. Essas conclusões vão ao encontro das alterações identificadas no presente trabalho, quanto à variabilidade encontrada nos meses do ano.

A alteração significativa nos 10 meses do ano, com aumento significativo nos meses de estiagem e redução significativa nos meses chuvosos, era uma tendência esperada, pois, segundo Magilligan e Nislow (2005), essa característica de alteração é comum de reservatórios localizados em regiões com marcante sazonalidade climática. De acordo com Cruz (2012), esse padrão de alteração é

proveniente de reservatórios de grandes volumes, como no caso do reservatório da UHE Manso que possui volume máximo de 7337 hm³.

A elevada capacidade de regularização da UHE Manso foi preponderante para obtenção do elevado número de parâmetros significativamente alterados. De acordo com Rocha (2010), as principais modificações estão relacionadas à regulação das vazões estabelecidas pela operação de grandes reservatórios implantados na bacia hidrográfica.

As vazões máximas e mínimas foram alteradas nas vazões de curta duração (1 a 7) e de longa duração (30 a 90), essas alterações são as mais comumente alteradas pela operação de reservatórios. Os resultados indicaram aumento das vazões mínimas e redução das vazões máximas, que são tendências apresentadas por Costigan e Daniels (2012).

As vazões máximas apresentaram direção da alteração que era esperada, com variação negativa da alteração nas menores durações (1 a 7 dias) e nas maiores durações (30 a 90). Tal efeito é atribuído ao grande volume do reservatório, capaz de amortizar grandes ondas de cheia, retendo a água excedente e reduzindo a magnitude das vazões de curta duração. Além disso, o resultado apresenta a concepção original de Manso que é agir como um regulador de inundações periódicas urbanas das cidades à jusante do empreendimento.

As alterações ocorridas nas vazões de elevada magnitude e intensidade são as que devem ser alvo de maior atenção, pois durante o período em que os rios estabelecem-se na fase de águas altas, são verificadas as modificações mais rápidas e significativas no ecossistema, tanto no aspecto geomorfológico e no contexto humano (perda de cultivos agrícolas, destruição de residências e estabelecimentos comerciais). As alterações nas vazões máximas podem causar instabilidade ambiental e econômica. Diante desse contexto, a redução das vazões máximas pode propiciar a redução de consequências e efeitos indesejáveis na bacia do rio Manso.

As vazões mínimas apresentaram direção da alteração que era esperada, com variação positiva da alteração nas menores durações (1 a 7 dias) e nas maiores durações (30 a 90). Esse resultado corrobora com um dos objetivos estabelecidos para o reservatório de Manso que é regularizar a vazão nos períodos de seca, propiciar o devido abastecimento de água e manter o nível necessário para desempenho de outras atividades no reservatório.

A alteração positiva das vazões mínimas de longo prazo e curto prazo variaram de 100% a 200% de aumento, taxas estas que vão ao encontro das considerações realizadas por Asfora e Cirilo (2005), de que as vazões a jusante de reservatórios passam a apresentar comportamentos distintos no que se refere à garantia das disponibilidades, acarretando uma elevação da vazão mínima disponível, que tende a se aproximar do valor da vazão média de longa duração.

O número de pulsos altos e baixos sofreu redução em relação ao período pré-impacto, com maior alteração para a diminuição de pulsos baixos, essas alterações também foram identificadas por Magilligan e Nislow (2005) e Costigan e Daniels (2012) no qual as regiões estudadas indicaram uma redução no número de pulsos baixos e altos. A redução no número de pulsos está relacionada com as reduzidas manobras operacionais para atendimento das variações de curto prazo da demanda energética. Embora o número de pulsos altos acima do percentil 75% tenha reduzido, a duração média (em dias) aumentou no período, este pode ser um reflexo da capacidade de manter constantes as vazões defluentes por determinados períodos de tempo.

Os 26 parâmetros hidrologicamente relevantes identificados neste trabalho são considerados um elevado número de parâmetros se comparado com outros trabalhos que realizaram a aplicação dos indicadores hidrológicos. Todavia, autores como Costigan e Daniels (2012), Magilligan e Nislow (2005) obtiveram número de alterações da ordem de 28 parâmetros hidrologicamente relevantes para um nível de significância de 5% e 1%, respectivamente.

Em relação à taxa de ascenção e recessão, ocorreu uma redução significativa nos parâmetros. Na mesma direção, os estudos de Costigan e Daniels (2012) identificaram redução significativa nas taxa de ascenção e recessão em 6 de 10 sistemas estudados. A redução nas taxas está relacionada com o potencial de homogeneizar as vazões, reduzindo a alteração de vazão durante o dia (Poff et al. 2007).

A ocorrência de alteração significativa na data juliana mínima do dia juliano 241 (correspondente a 29 de agosto) para o dia juliano 291 (correspondente a 18 de outubro), refere-se a mudança do período de ocorrência da vazão mínima anual. A ocorrência de vazões mínimas anuais foi obtida da posição (1 a 366 correspondentes ao dia Juliano) em que se encontram tais vazões nas séries de dados.

6.1.2 Análise das Curvas de Permanência de Vazões (CPV)

Os resultados obtidos das Curvas de Permanência de Vazões (CPV) indicaram que o reservatório da UHE Manso impactou de forma significativa o regime hidrológico de jusante do rio Manso para o período estudado. A alteração ocorrida entre as curvas é considerada significativa, pois o valor de Kolmogorov-Smirnov foi duas vezes superior ao valor obtido por Cruz (2012), e, também, duas vezes superior ao valor obtido para o rio Passo Fundo, estudado neste trabalho.

A acentuada diferença entre as curvas das vazões naturais e defluentes podem ser percebidas pelas formas, inclinações, magnitudes, redução da duração das vazões excedidas em 30% e aumento da duração das vazões que excedem 60% ou mais. Desta forma, a característica das curvas foi alterada para as vazões de elevada magnitude e vazões de baixa magnitude para os períodos distintos. Pode-se perceber que o reservatório altera o regime de vazões naturais de jusante.

O impacto do reservatório pode ser intensificado caso as vazões máximas de montante apresentem elevados valores, pois o efeito regularizador do reservatório propiciará uma constância nos valores de jusante da barragem. Tal análise pode ser feita nos períodos hidrológicos de vazões baixas, no qual será evidenciada uma permanência constante das vazões médias de jusante.

6.1.3 Impacto no ecossistema a jusante da UHE Manso

Os resultados deste estudo indicaram que a vazão média de 10 meses do ano, as vazões máximas (1, 3, 7, 30 e 90 dias), a data juliana mínima, o número de pulsos altos e baixos, taxa de ascenção e recessão e as vazões mínimas (1, 3, 7, 30 e 90 dias) foram significativamente alterados após a implantação e operação do reservatório da UHE Manso. Os pulsos altos e baixos alterados refletem significativamente na planície de inundação da bacia de jusante.

Em relação à redução das vazões máximas, um dos impactos mais preocupantes da redução dos picos de inundação é a queda da conectividade entre o canal principal e as águas da planície de inundação, o que acarreta vários impactos diversos, como declínio na abundância dos peixes.

As alterações constatadas podem influenciar na quantidade disponível de habitat na maior parte do tempo, na diversidade e número dos rios. Todavia, o

aumento das vazões mínimas anuais pode ser benéfico para diversos organismos, que dependem da conectividade dos ecossistemas para seu estabelecimento, pois a temperatura e disponibilidade de oxigênio dissolvido podem ser fontes de grande pressão para muitos organismos durante as vazões extremas baixas. A modificação na frequência e duração dos períodos de cheias pode eliminar a desova, as indicações migratórias para os peixes ou reduzir o acesso a zonas de reprodução (RICHTER et al., 1997).

As alterações identificadas na magnitude das vazões mensais e nas vazões máximas e mínimas anuais podem influenciar na disponibilidade de habitat, conectar e desconectar habitats e alterar seus atributos, tais como área molhada, volume de habitat, além da posição do lençol freático em relação a áreas úmidas ou raízes da vegetação ripária associada ao rio (RICHTER et al., 1996; Poff et al., 1997).

Os impactos ocorridos no número de pulsos altos e baixos, que estão relacionados aos eventos de estiagem e cheia por ano, têm implicações nos eventos produtivos ou de mortalidade para várias espécies, influenciando a dinâmica populacional e na renovação de ciclos de vida (RICHTER et al., 1996; Poff et al., 1997).

As implicações ecológicas com a mudança do dia juliano de vazão mínima anual estão relacionadas com os requisitos específicos de cada fase de vida dos organismos, nos quais podem conduzir ao estresse ou mortalidade associados a condições hídricas extremas (RICHTER et al., 1996).

Os impactos relacionados às mudanças das taxas de ascensão e recessão, relacionados ao gradiente de vazões, podem influenciar a conexão entre rio e área ripária ou lagos marginais, ou a capacidade de raízes manterem contato com o lençol freático. Podem também levar ao aprisionamento de organismos em planícies de inundação, estresse de organismos de baixa mobilidade nas margens dos rios (RICHTER et al., 1996).

As alterações resultantes nas vazões baixas, ocasionado pelo efeito regularizador do reservatório, podem ser benéficas para diversos organismos, pois durante determinado período de seca podem ser estressantes para muitos organismos, devido às condições químicas da água, temperatura e oxigênio dissolvido, a ponto de causar considerável mortandade (FREDERICE, 2014).

6.2 UHE PASSO FUNDO

6.2.1 Parâmetros significativamente alterados

De acordo com os resultados obtidos, ocorreu alteração no regime hidrológico do rio Passo Fundo comparando-se o período de pré-impacto com o período de pós-impacto.

Em relação aos padrões anuais de alteração hidrológica, pode-se identificar que não ocorreu aumento significativo das vazões nos períodos de seca e redução das vazões nos períodos de maiores índices pluviométricos. Esse comportamento pode estar atrelado ao fato do reservatório não ser projetado para regularizar períodos de seca e cheia do rio Passo fundo.

As vazões mínimas foram alteradas nas vazões de curta duração (mínima de 1 dia) e de longa duração (mínimas de 30 e 90 dias), essas mudanças são as mais comumente alteradas pela operação de reservatórios. Os resultados indicaram redução das vazões mínimas na ordem de 3 m^3/s. O aumento das vazões mínimas de longa duração são tendências apresentadas por Costigan e Daniels (2012), esse aumento reflete na tendência do reservatório de regularizar as vazões mínimas de longa duração.

As vazões máximas apresentaram direção da alteração que era esperada, com variação negativa da alteração nas menores durações (1, 3 e 7 dias) e na vazão máxima de longo prazo (30 dias). Tal efeito é atribuído ao grande volume do reservatório, capaz de amortizar grandes ondas de cheia, retendo a água excedente e reduzindo a magnitude das vazões de curta duração.

As modificações identificadas nas vazões de elevada magnitude e intensidade são as que devem ser alvo de maior atenção, pois durante o período em que os rios estabelecem-se na fase de águas altas, são verificadas as modificações mais rápidas e significativas no ecossistema, tanto no aspecto geomorfológico e no contexto humano (perda de cultivos agrícolas, destruição de residências e estabelecimentos comerciais). As alterações nas vazões máximas podem causar instabilidade ambiental e econômica, diante desse contexto a redução das vazões máximas pode propiciar a redução de consequências e efeitos indesejáveis na bacia do rio Passo Fundo.

A alteração positiva das vazões mínimas de longo prazo variaram 63% para mínima de 30 dias e 24% na mínima de 90 dias, estes resultados vão ao encontro das considerações realizadas por Asfora e Cirilo (2005), de que as vazões a jusante de reservatórios passam a apresentar comportamentos distintos no que se refere à garantia das disponibilidades, acarretando uma elevação da vazão mínima disponível, que tende a se aproximar do valor da vazão média de longa duração.

O número de pulsos altos e baixos sofreu aumento em relação ao período pré-impacto, com redução da duração dos pulsos baixos, essas alterações também foram identificadas por Chen et al. (2010). O aumento da frequência dos pulsos está relacionado às manobras operacionais para atendimento da demanda energética. Frederice (2014) obteve em suas análises um aumento nas taxas de ascensão e recessão das vazões, o que vai ao encontro dos resultados obtidos por esta dissertação.

Os 10 parâmetros hidrologicamente relevantes identificados neste trabalho seguem a tendência de outros estudos realizados na área. Olden e Poff (2003) e Yang et al. (2008) identificaram seis parâmetros hidrologicamente significantes (vazões mínimas, taxa de ascenção, número de reversões, máxima de 3 dias, mínimo de 7 dias e vazão de maio); Gao et al. (2009) identificaram oito parâmetros significativos (vazões de novembro, fevereiro, março e junho, 30 dias de mínima, 7 dias de máxima, duração do pulso de alta e taxa de ascensão).

6.2.2 Análise das Curvas de Permanência de Vazões (CPV)

Os resultados obtidos das Curvas de Permanência de Vazões (CPV) indicaram que o reservatório da UHE Passo Fundo alterou de forma significativa o regime hidrológico de jusante do rio Passo Fundo para o período analisado. A alteração ocorrida entre as curvas se aproximou dos valores obtidos por Cruz (2012), que obteve o valor do teste de Kolmogorov-Smirnov com D = 0,28.

A acentuada diferença entre as curvas naturais e regularizadas podem ser percebidas pelas formas, inclinações, magnitudes, redução da duração das vazões excedidas em 10% e aumento da duração das vazões que excedem entre 30% e 80%. Desta forma, a característica das curvas foi alterada para as vazões de elevada magnitude para os períodos distintos. Pode-se concluir que o impacto do reservatório altera o regime naturalizado de jusante.

O impacto do reservatório pode ser intensificado caso as vazões máximas de montante apresentem valores extremos, pois o potencial efeito de regularização do reservatório de Passo Fundo pode desempenhar uma constância nos valores de jusante da barragem. Esta análise pode ser feita nos períodos hidrológicos de vazões baixas, no qual será evidenciada uma permanência constante das vazões médias de jusante.

6.2.3 Impacto no ecossistema a jusante da UHE Passo Fundo

Os resultados deste estudo indicaram que as vazões máximas (1, 3, 7 e 30 dias), o número de pulsos altos e baixos e as vazões mínimas (1, 30 e 90 dias) foram significativamente alterados após a implantação e operação do reservatório da UHE Passo Fundo. Os pulsos altos e baixos alterados podem refletir significativamente no ciclo natural de inundação da bacia de jusante.

Em relação à redução das vazões máximas, um dos impactos mais preocupantes da redução dos picos de inundação é a queda da conectividade entre o canal principal e as águas de inundação, o que acarreta vários impactos diversos, como declínio na abundância dos peixes. A redução das vazões altas pode implicar na proliferação de plantas terrestres (Rebellato e Cunha, 2005) e, desta forma, diminuir a riqueza e distribuição das plantas aquáticas, limitando a futura germinação através de seus bancos de sementes no solo (Pagotto et al. 2011). Acrescenta-se que a diminuição das vazões máximas pode limitar a colonização de muitas espécies de peixes, que utilizam as lagoas como locais de alimentação e reprodução (Tondato et al. 2011).

A redução das vazões máximas à jusante do rio pode mudar a disponibilidade do habitat, o regime de vazões predominante e a amplitude da área molhada, que pode alterar negativamente várias espécies, incluindo os ecossistemas aquáticos de plantas, de invertebrados e peixes. A manutenção de uma vazão residual adequada deve ser necessária para proteger a ecologia do corpo hídrico, por meio das variações ocorridas nas diferentes vazões sazonais (Carvalho, 2014).

Os impactos identificados no número de pulsos altos e baixos, que estão relacionados aos eventos de estiagem e cheia por ano, têm implicações nos eventos produtivos ou de mortalidade para várias espécies, influenciando a dinâmica

populacional e na renovação de ciclos de vida (RICHTER et al., 1996; Poff et al., 1997).

A diminuição ocorrida do volume de água a jusante, decorrente da alteração hidrológica, pode desencadear uma mudança na comunidade aquática, podendo resultar na extinção de espécies endêmicas e na diminuição da biodiversidade (Souza et al. 2002).

Mesmo diante de poucos parâmetros hidrológicos significativamente alterados, se comparado com os resultados da UHE Manso, a alteração do regime hidrológico pode acarretar ausência de períodos sazonais de cheia e seca, desta forma muitas espécies vegetais e animais podem ter seu ciclo de crescimento, reprodutivo e adaptativo alterados, o que acarreta aos ecossistemas locais impactos que podem comprometer sua continuidade.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A revisão da literatura indicou que a presença e operação de empreendimentos hidrelétricos podem alterar o regime hidrológico a jusante dos reservatórios, que os impactos provocados podem ser intensificados à medida que o número de reservatórios aumenta e que as alterações são respostas da capacidade de regularização do reservatório, gerando efeitos em escala local, regional e global.

A literatura pertinente permitiu entender que é necessário propiciar um melhor entendimento dos desafios nos quais (a) permitir a manutenção de uma vazão residual adequada para proteger a ecologia do corpo hídrico, por meio das variações ocorridas nas diferentes vazões sazonais, (b) identificar e quantificar os impactos no regime hidrológico e (c) permitir com que a gestão dos recursos hídricos possa ser realizada de forma a reduzir os efeitos ocasionados pelos empreendimentos.

Ainda de acordo com a revisão da literatura, o *IHA* apresenta-se como ferramenta fundamental no avanço e no desenvolvimento de estudos que analisam a alteração de regimes hidrológicos proveniente de alguma interferência ocorrida no regime de vazões. A possibilidade de diagnosticar as condições de vazão natural e facilitar a análise das mudanças provocadas pelo homem nas condições naturais de vazão são alguns atributos que permitiram a ampla utilização do *software* em diversos trabalhos e no desenvolvimento deste estudo, gerando resultados coerentes com as literaturas abordadas.

As análises realizadas no regime hidrológico a jusante do reservatório da UHE Manso permitem inferir que ocorram alterações resultantes da presença e operação do empreendimento, este que tem o potencial de afetar o regime de vazões na planície de inundação da bacia do rio Manso, e, também, potencial de influenciar as bacias adjacentes.

Dentre os parâmetros dos Indicadores de Alteração Hidrológica, o reservatório da UHE Manso alterou significativamente 26 parâmetros hidrológicos, sendo eles: Vazão médias mensais (outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, maio, junho, julho, agosto e setembro), as máximas de curto prazo (1, 3 e 7 dias) e longo prazo (30 e 90 dias), data juliana mínima, número de pulsos altos e baixos, duração dos pulsos altos (dias), taxa de ascenção e recessão, as mínimas de curto prazo (1, 3 e 7 dias) e longo prazo (30 e 90 dias). O elevado número de

parâmetros significativamente alterados pode estar atrelado à elevada capacidade de regularização do reservatório, que atua como reservatório de aproveitamento múltiplo com objetivo de produzir eletricidade, controle de cheia, abastecimento de água e agricultura.

As análises baseadas nas Curvas de Permanência de Vazões anuais propiciaram identificar alteração significativa do regime hidrológico do rio manso após a construção e operação de Manso. As alterações foram mais intensas na redução das vazões máximas e aumento das vazões mínimas.

Os resultados obtidos para a UHE Manso permitem subsidiar novos estudos e projetos, com o objetivo de entender o impacto que novos empreendimentos com elevada capacidade de regularização podem acarretar em bacias hidrográficas com marcante regime hidrológico, como é o caso da planície de inundação do pantanal. Sabe-se que a manutenção do funcionamento ecológico do Pantanal está baseada na manutenção dos pulsos de inundação dos rios que o compõem, com interdependência entre as fases de cheia e seca, ora contribuindo para a produtividade do sistema terrestre (qualidade e diversidade das pastagens), ora para a produtividade do sistema aquático (quantidade e diversidade de peixes).

As modificações no regime hidrológico da UHE Passo Fundo demonstram o potencial deste reservatório de regularização plurianual de alterar alguns parâmetros do regime hidrológico do rio Passo Fundo. As alterações podem ser provenientes tanto da presença da barragem quanto dos procedimentos de operação do reservatório para atendimento das demandas.

Dentre os parâmetros dos Indicadores de Alteração Hidrológica, o reservatório da UHE Passo Fundo alterou de forma significativa 10 parâmetros hidrológicos, sendo eles: as vazões máximas de curto prazo (1, 3 e 7 dias) e longo prazo (30 dias), número de pulsos altos e baixos, duração dos pulsos baixos (dias), as mínimas de curto prazo (1 dia) e longo prazo (30 e 90 dias). Os parâmetros significativamente alterados pelo reservatório seguem as alterações que são comumente encontradas em estudos hidrológicos e podem ser potencializadas pelo aumento do número de empreendimentos com capacidade de regularização na bacia do rio Passo Fundo.

Os resultados baseados nas Curvas de Permanência de Vazões anuais permitiram identificar alteração significativa do regime hidrológico do rio Passo Fundo após a construção e operação da UHE Passo Fundo. As modificações

indicadas nas curvas podem influenciar a adoção de novas regras e parâmetros para definição de vazões ambientais na bacia à medida que os efeitos de regularização são intensificados.

Diante dos resultados obtidos o potencial de alteração pode estar atrelado ao nível de regularização exercido pelos empreendimentos estudados. A adoção de novas estratégias no setor hidrelétrico pode reduzir os efeitos negativos ocasionados pela regularização como a implantação de usinas à fio d' água, regras operacionais que observem as exigências de vazões ambientais que minimizem os efeitos negativos e estudos ambientais para avaliar os potenciais efeitos da instalação de novas hidrelétricas. Melhores práticas de gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas que permitem que os reservatórios de regularização tenham uma vazão defluente próxima à vazão natural são altamente desejáveis para minimizar os efeitos negativos (Poff et al., 1997).

A magnitude e o número de alterações identificadas nesta dissertação tem grande implicação para compreensão das alterações que podem ocorrer na ecogeomorfologia de sistema hidrológicos de bacias hidrográficas.

Mesmo diante das alterações hidrológicas que têm o potencial de impactar negativamente o ecossistema e as vazões ambientais, as regularizações exercidas pelos reservatórios da UHE Manso e UHE Passo Fundo podem minimizar os efeitos das enchentes e secas das bacias locais e garantir a produção de energia para os beneficiários do suprimento energético.

Os resultados provenientes desta dissertação podem servir de base para futuros estudos hidrológicos que têm como objetivo avaliar a influência de reservatórios de regularização no regime hidrológicos de bacias hidrográficas, auxiliando no melhoramento das tomadas de decisões dentro da gestão de recursos hídricos de bacias hidrográficas. O melhoramento no conhecimento dos potenciais impactos de reservatórios de usinas hidrelétricas é importante para adoção de vazões ambientais a serem mantidas para a preservação, restauração e melhoramento dos componentes de ecossistemas fluviais.

Por conta dos diversos indicadores de alteração hidrológica disponíveis para análise dos gestores de recursos hídricos, recomenda-se que sejam determinados os indicadores que melhor representem o conjunto destes, permitindo com que as decisões sejam facilitadas e mais rapidamente analisadas para a adoção de qualquer medida preventiva e corretiva dos impactos ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABASSI, T.; ABASSI, S. A. **Small hydro and the environmental implications of its extensive utilization.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.15, p. 2134-2143, 2011.

Agência Nacional de Águas – ANA. **Monitoramento especial do Rio Doce - 2015.** Disponível em: http://www2.ana.gov.br/Paginas/Riodoce/default_old.aspx. Acesso em: 09 ago. 2017.

Agência Nacional de Águas (ANA). **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**. Disponível em: < http://sar.ana.gov.br/MedicaoSin >. Acesso: 10 out. 2017.

Agência Nacional de Águas (Brasil). **Boletim de Monitoramento da Bacia do Alto Paraguai**. Brasília, v. 1, n. 8, p. 1-20, 2006.

ANA (Agência Nacional de Águas). **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos** 2013/ Agência Nacional de Águas – ANA, Brasília: 2013.

ANDRADE, A. L. **A Viabilidade Ambiental de Usinas Hidrelétricas e a Aplicação da Avaliação Ambiental Estratégica no Brasil.** Tese (doutorado) - UFRJ/ COPPE, Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, 2017.

ANDRADE, J.S. de O. **Pequenas centrais hidrelétricas: análise das causas que impedem a rápida implantação de PCH's no Brasil**. Dissertação (M.Sc.) – Universidade Salvador – UNIFACS – Curso de Mestrado em Regulação da Indústria de Energia. Salvador, 2006.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Ministério de Minas e Energia. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** Disponível em:<http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689>. Acesso em: 29 junho de 2017.

ASFORA, M.C.; CIRILO, J.A. Reservatórios de regularização: alocação de água para usos múltiplos com diferentes garantias. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v.2, p 27-38, 2005.

Balanço Energético Nacional (BEN) 2016: Ano base 2015 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2016. 292 p.: 182 ill.

Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2015. 292 p.: 182 ill.

BRAGA, R. S.; ROCHA, V. F.; GONTIJO, E. A. **Revisão das séries de vazões naturais nas principais bacias hidrográficas do Sistema Interligado Nacional**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18, 2009, Campo Grande. Anais... Porto Alegre: ABRH, 2009.

BRASIL. **Diretrizes ambientais para projeto e construção de barragens e operação de reservatórios.** Ministério da Integração Nacional, Secretaria de Infraestrutura Hídrica, Unidade de Gerenciamento do Pro-água/Semiárido. – Brasília: Bárbara Bela Editora Gráfica e Papelaria Ltda., 112p. 2005.

BRASIL. **Lei nº 13.097, de 19 de janeiro de 2015**. Reduz a zero as alíquotas da Contribuição para o PIS/PASEP, da COFINS, da Contribuição para o PIS/Pasep-Importação e da Cofins-Importação incidentes sobre a receita de vendas e na importação de partes utilizadas em aerogeradores. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 227, 20 jan. 2015. Seção 1, p. 1.

BRASIL. **Lei nº 13.360, de 17 de novembro de 2016.** Altera a Lei nº 5.655, de 20 de maio de 1971, a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, a Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998, a Lei nº 12.111, de 9 de dezembro de 2009, a Lei nº 12.783, de 11 de janeiro de 2013, a Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995, a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989, a Lei nº 9.491, de 9 de setembro de 1997, a Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, a Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, a Lei nº 11.488, de 15 de junho de 2007, a Lei nº 12.767, de 27 de dezembro de 2012, a Lei nº 13.334, de 13 de setembro de 2016, a Lei nº 13.169, de 6 de outubro de 2015, a Lei nº 11.909, de 4 de março de 2009, e a Lei nº 13.203, de 8 de dezembro de 2015; e dá outras providências. Disponível em:< http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2016/Lei/L13360.htm#art9>. Acesso em: 23 dez 2017.

BRAVO, J. M., **Subsídios à operação de reservatórios baseada na previsão de variáveis hidrológicas.** Tese de Doutorado - Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2010.

BUBA, H.; ARAUJO, A. N.; OLIVEIRA, A. G. de. Avanços no monitoramento da operação de reservatórios da Copel. **Revista Técnica do Instituto de Engenharia do Paraná**. Ano I – número 3, 2011.

BURKE, M.; JORDE, K.; BUFFINGTON, J. M. Application of a hierarchical framework for assessing environmental impacts of dam operation: Changes in streamflow, bed mobility and recruitment of riparian trees in a western North American river. J. **Environ. Manage**. v. 90, p. S224-S236, 2009.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: Princípios e Aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003.

CARVALHO, N. B. **Avaliação dos Impactos Sinérgicos e Cumulativos de Pequenas Centrais Hidrelétricas Construídas em Sequência**. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, 2014.

CAVINATTO, V., et al. **Caracterização Hidrográfica do Estado de Mato Grosso**. PRODEAGRO/SEPLAN/FEMA, Cuiabá, 1995.

CENDRETTI, E. C.; SANTOS, E. M.; BIONDI, A. E. C. **Análise dos impactos socioambientais da construção de uma PCH: estudo de caso da Usina Paulista Queluz Energia S.A**. Monografia de Pós-Graduação em Educação Ambiental. Faculdades Integradas de Cruzeiro, Cruzeiro-SP, 2009.

CHEN, Q.; X. ZHANG, Y.; CHEN, Q.; LI, L.; QIU, M. L. **Downstream effects of a hydropeaking dam on ecohydrological conditions at sub-daily to monthly time scales**. Ecological Engineering, v. 77, p. 40-50, 2015.

COMISSÃO MUNDIAL DE BARRAGENS (WCD). **Estudo de caso brasileiro**, UHE-Tucuruí, Relatório Final, 2000.

CRABB, P. **Murray Darling Basin Resources, Canberra**. Murray Darling Basin Commission. 1997.

CRUZ, I.F. **Efeitos da formação e operação de um reservatório de pequena regularização da alteração da qualidade da água e do regime hidrológico na planície de inundação do Pantanal.** 85f . Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, RS-BR, 2012.

CRUZ, J.C.; TUCCI, C.E.M. Estimativa de disponibilidade hídrica através da curva de permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, nº 1, p. 111-124, 2008.

ELEY, T. J.; WATKINS, T.H. '**In a Sea of Trouble - The Uncertain Fate of the Pacific Salmon**', in Wilderness: 20-26, 1991.

ENGIE. **Ficha Técnica – UHE Passo Fundo**. Disponível em: <http://www.tractebelenergia.com.br/wps/portal/internet/parquegerador/usinashidreletricas/uhe-passo-fundo>. Acesso em: 17 ago. 2017.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano decenal de expansão de energia 2024**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2015.

EPE. **Balanço Energético Nacional – BEN relativo ao ano de 2015**. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <http://<www.epe.gov.br>. Acesso em: 14 ago. 2017.

ESTEVES, F.A. **Fundamentos de Limnologia.** Rio de Janeiro: 2. ed., Interciência, 1998.

FALCETTA, F. A.M. **Evolução da capacidade de regularização do sistema hidrelétrico brasileiro.** Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, São Paulo, 2015.

FREDERICE, A. **Análise do impacto do Sistema Cantareira sobre o regime de vazões na bacia do rio Piracicaba.** 110 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

FREITAS, C. **Uso de técnicas de classificação de dados na operação de sistemas de reservatórios de usinas hidrelétricas durante cheias. Tese (Doutorado)** – UFPR/ PPGERHA/ Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Curitiba, 2016.

FRIEDL, G.; WÜEST, A. Disrupting biogeochemical cycles - Consequences of damming. **Aquatic Sciences**, 64, 55–65, 2002.

FURNAS. Furnas Centrais Elétricas S. A. **Aproveitamento Múltiplo Manso** – Memória técnica. Rio de Janeiro – RJ. 2002.

GAO, Z. L; FU, Y. L; LI, Y. H; LIU, J. X; CHEN, N; ZHANG, X. P. Trends of streamflow, sediment load and their dynamic relation for the catchments in the middle reaches of the Yellow River over the past five decades. **Hydrology and Earth System Sciences**. v.16, n.9, p.3219-3231, 2012.

GENZ, F.; LUZ, L. D. Avaliação das alterações hidrológicas no baixo trecho do Rio São Francisco. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídri**cos, 2009.
GIRARD, P. **Efeito cumulativo das barragens no pantanal: mobilização para conservação das áreas úmidas do Pantanal e Bacia do Araguaia.** Campo Grande, MS: Instituto Centro Vida, 2002. 28 p. Relatório. Disponível em: <http://www.riosvivos.org.br/dowloads/Efeito_cumulativo_barragens_Pantanal.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2017.

GRAF, W. L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. **Geomorphology**, v. 79, n. 3-4, p. 336-360, 2006.

HAHN, L.; CÂMARA, L.F.; REIS, R.; VOTTO, A. G. **Monitoramento Limnológico e Ictiofaunístico no Reservatório da Usina Hidrelétrica de Passo Fundo,** Gerasul, RS. In: XVI SNPTEE, Informe técnico GIA 18, 2001.

HARISH KUMARA, B.K.; SRIKANTASWAMY, S. Environmental flow requirements in Tungabhadra river, Karnataka, India. **Natural Resources Research**, v.20, nº. 3, p.193-205, 2011.

IUCN, V. **Environmental Flows: Rapid Environmental Flow Assessment for the Huong River Basin, Central Vietnam**. IUCN Vietnam, Hanoi, Vietnam, 82 pp, 2005. Acesso em 16 ago. 2017.

JUNK, W. J.; MELLO, J. A. S. N. **Impactos ecológicos das represas hidrelétricas na bacia amazônica brasileira**. São Paulo, v. 4, n. 8, p. 126-143, 1990. Disponível em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104014199000010001 0&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 16 Agos. 2017.

LATINI, J. R.; PEDLOWSKI, M. A. **Examinando as contradições em torno das Pequenas Centrais Hidrelétricas como fontes sustentáveis de energia no Brasil.** Desenvolvimento. Meio Ambiente, v. 37, p. 73-90, maio 2016 - Edição Especial Nexo Água e Energia, 2016.

Leotti, V. B; A. R. Birck ; J. Riboldi. **Comparação dos Testes de Aderência à Normalidade Kolmogorov-smirnov, AndersonDarling, Cramer–Von Mises e Shapiro-Wilk por Simulação.** 11º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica e a 50ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS). Anais. Londrina, PR, Brasil, 2005.

LEVINE, D.M.; STEPHAN, D.; KREHBIEL, T.C.; BERENSON, M.L. **Estatística - Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2005.

LIMA, C. H. P; GENZ, F.; LUZ, L.D.; FONTES, A.S.; OLIVEIRA-ESQUERRES, K. P. **Avaliação da influência da mudança de variáveis de projeto de barragens sobre as alterações hidrológicas e componentes do regime de vazão natural.** RBRH vol. 20, nº 3, Porto Alegre. p. 785 – 794, 2015.

LIMA, C.H.P. **Avaliação das alterações hidrológicas a jusante de barragens por meio de análise de sensibilidade à variação de variáveis de projeto.** Dissertação (mestrado), Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2014.

LIMA, E. B. N. R. **Modelagem Integrada para Gestão da Qualidade da Água na Bacia do Rio Cuiabá**. Tese de Doutorado pelo Programa de Engenharia Civil: COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2001.

MAGILLIGAN, F. J; KEITH, H. N. **Changes in Hydrologic Regime by Dams,** Journal of Hydrology, Geomorphology, 71(1-2), pp. 61-78, 2005.

MAIA, A. G. **As consequências do assoriamento na operação de reservatórios formados por barragens.** Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MANTEL, S. K.; HUGHES, D. A.; MULLER, M. W. K. **Ecological impacts of small dams on South African rivers Part 1: Drivers of change – water quantity and quality.** Water SA, 36(3), 351-360, 2010.

MANTEL, S. K; HUGHES, D. A; MULLER, N. W.J. Ecological impacts of small dams on South African rivers Part 1: drivers of change - water quantity and quality. **Water SA**. vol.36, n.3, pp.351-360. ISSN 1816-7950, 2010.

MATHEWS, R.; RICHTER, B. D. Application of the Indicators of Hydrologic Alteration *Software* in Environmental Flow Setting. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 43, p. 1400-1413, 2007.

MCMANAMAYA, R. A.; ORTHA, D. J.; DOLLOFFB, C. A. Revisiting the homogenization of dammed rivers in the southeastern US. **Journal of Hydrology**. 424-425: 217-237. DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.01.003. 2012.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Caderno da Região Hidrográfica do Paraguai.** Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília, 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Caderno da Região Hidrográfica do Uruguai.** Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília, 2006.

MME. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. Secretaria de Energia Elétrica | Departamento de Monitoramento do Sistema Elétrico. 2017.

NAGHETTINI, M.C.; PINTO, E.J.A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 552p. 2007.

NAHAS, R.L.L. PCH's: **viabilidade e inventário hidrelétrico.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação). Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

NASCIMENTO, A. Q.; VASCONCELOS, L. C. S.; MOREIRA, M. C.; KLEMP, S. M.; ROSSETTO, O. C. **Situação atual das famílias atingidas pela construção da usina hidrelétrica de manso - Chapada dos Guimarães, Mato Grosso**. III Simpósio Nacional de Geografia Agrária. Presidente Prudente, 2005.

OKAWA, C.M.P. **Em busca do hidrograma ecológico para a planície de inundação do alto rio Paraná: considerações iniciais**. Tese (Doutorado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais) - Universidade Estadual de Maringá, São Paulo, 2009.

OLDEN, J. D.; POFF, N. L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. **River Research and Applications**, 13 January, 19: p. 101–121. 2003.

ONS, Operador Nacional do Sistema. **Diretrizes para as regras de operação de controle de cheias – bacia do rio Paraná até porto São José (ciclo 2009 – 2010)**. Rio de Janeiro, 191 p., 2009.

OPPERMAN, J. **Indicators of Hydrologic Alteration Analysis for the Patuca River.** 2006b.

OPPERMAN, J. **Preliminary *IHA* analysis for the Middle Fork Willamette River at Jasper OR**, 2006a.

PAULA, M. **Análise de viabilidade de projetos de pequenas centrais hidrelétricas: pontos críticos de sucesso a partir de estudos de caso no estado de Santa Catarina.** Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Energia – EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

PETTITT A. N. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. ***Applied Statistics***, 28, p.126-135, 1979.

PINTO, E. J. A.; AZAMBUJA, A. M. S.; FARIAS, J. A. M.; SALGUEIRO, J. P.B.; PICKBRENNER, K. (Coords.). **Atlas pluviométrico do Brasil: isoietas mensais, isoietas trimestrais, isoietas anuais, meses mais secos, meses**

mais chuvosos, trimestres mais secos, trimestres mais chuvosos. Brasília: CPRM, 2011.

PINTO, N. L. S., HOLTZ, A. C. T., MARTINS, J. A., GOMIDE, F. L. S **Hidrologia Básica**, São Paulo, Edgard Blücher, Rio de Janeiro, Fundação Nacional de Material Escolar, 1976.

Plano Decenal de Expansão de Energia (PDEE) 2019. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2010.

Plano Energético do Rio Grande do Sul 2016/2025. Secretaria de Minas e Energia do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS. 2016.

Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce – PIRH Doce. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e planos de ações para as unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da bacia do Rio Doce** Consórcio Ecoplan - Lume Volume I. Relatório final. 2010.

POFF N.L.; ZIMMERMAN J.K.H. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the sciense and manegement of enviromental flow. **Freshwater biology**. 2010.

POFF, N. L.; ALLAN, J. D.; BAIN, M. B.; KARR, J. R.; PRESTEGAARD, K. L.; RICHTER, B. D.; SPARKS, R. E.; STROMBERG. J. C. The Natural Flow Regime: A paradigm for river conservation and restoration. **BioScience**, December, Vol. 47, n° 11, p. 769-784, 1997.

POFF, N. L.; MATTHEWS, J. H. Environmental flows in the Anthropocene: past progress and future prospects. Current Opinion Environ. **Sustainability**, v. 5, nº. 6, p. 667-675, Nov. 2013.

POFF, N.L et al. Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. **Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America**, 104(14): 5732-5737, 2007.

REBELLATO, L.; CUNHA C.N. Efeito do "fluxo sazonal mínimo da inundação" sobre a composição e estrutura de um campo inundável no Pantanal de Poconé, MT, Brasil. **Acta Botânica Brasílica** 19:789-799. 2005.

RENÖFALT, B.M; JANSSON, R.; NILSSON, C. Effects of hydropower generation and opportunities for environmental flow management in Swedish riverine ecosystems. **Freshwater Biology**. V. 55, p. 49 – 67, 2010.

RICHTER, B.D., BAUMGARTNER, J.V., POWELL, J., AND BRAUN, D.P. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. **Conservation Biology**, 10(4), p.1163-1174, 1996.

RICHTER, B.D.; BAUMGARTNER, J.V.; BRAUN, D.P.; AND POWELL, J. **A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. Regulated Rivers: Research & Management, v.** 14, p. 329-340, 1998.

RICHTER, B.D.; BAUMGARTNER, J.V.; WIGINGTON, R.; BRAUN, D.P. How much water does a river need?. **Freshwater Biology**, 37, 231-249, 1997.

ROCHA, P. C. Indicadores de Alteração Hidrológica no Alto Rio Paraná: Intervenções Humanas e Implicações na Dinâmica do Ambiente Fluvial. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, 22 (1): 191-211, 2010.

RODRIGUES, L.H.R. et al. Modelagem estatística de distribuição de peixes migradores como subsídio ao licenciamento de barramentos na bacia Camaquã, RS. **Revista de Gestão de Água da América Latina**. 8 . 10.21168/rega.v8n2.p31-41. 2011.

ROSENBERG, D. M., BERKES, F., BODALY, R. A., HECKY, R. E., KELLY, C. A., RUDD, J. W. M. Large-scale impacts of hydroelectric development. Global-scale environmental effects of hydrological alterations: introduction. **BioScience**, v. 50, p. 746-751. 1997.

SABINO, A.A. **Efeitos hidrológicos da operação da barragem da PCH São Lourenço no regime hidrológico do rio São Lourenço.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2016.

SANTOS, J. W. M. C.; OLIVEIRA, S. M. L.; SOUZA, W. P. Uso do solo e dinâmica dos nutrientes nas águas do reservatório da Hidrelétrica de Manso no Estado de Mato Grosso, Brasil Central. **Revista franco-brasileira de Geografia**, v.18, p. 1-22, 2013.

SANTOS, M. T. et al . Factors structuring the spatial distribution of Chironomidae larvae community in the floodplain of the northern Pantanal, Brazil. **Acta Limnol. Bras**., Rio Claro , v. 25, n. 2, p. 131-139, 2013. Acesso em 24 Out. 2017. http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2013000200004.

SEMA. Bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul. Disponível em <http://www.sema.rs.gov.br/bacia-hidrografica-do-rio-passo-fundo>. Acesso em: 17 ago. 2017.

SOUZA, C.F. **Vazões ambientais em hidrelétricas: Belo Monte e Manso**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2009.

SOUZA, P. A. P.; FELICIDADE, N.; MAUAD, F. F.. 2002. **Planejamento e gestão ambiental integrada quando da implantação de pequenas centrais hidrelétricas (PCH's)**. II Simpósio de Recursos Hídricos do Centro Oeste Campo Grande (2002).

STEVAUX, J. C.; MARTINS, D. P.; MEURER, M. Changes in a large regulated tropical river: The Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil. **Geomorphology**, Volume 113, Issues 3–4, 15 , p. 230–238, 2009.

THE NATURE CONSERVANCY – TNC. Indicators of Hydrologic Alteration. Version7.1. User's Manual, 2009.

TOLMASQUIM, M.T. et al. **Matriz energética brasileira: uma prospectiva.** CEBRAP - Novos Estudos, 79 (2007), pp. 47-69. 2007.

TRUFFER, B., BRATRICH, C., MARKARD, PETER, J.A., WÜEST, A.; WEHRLI, B. Green Hydropower: The contribution of aquatic science research to the promotion of sustainable electricity**. Aquatic Sciences**, 65(2), 99–110, 2003.

TUNDISI, J. G. et al. Theoretical basis for reservoir management. In: TUNDISI, J. G.; STRASKRABA, M. (Ed.) Theoretical reservoir ecology and its applications. s. l.: IIE, BAS, **Backhuys Publishers**. p.505-28, 1999.

UMETSU, R. K. **Efeito da barragem de Manso sobre a inundação em matas ripárias na bacia do Rio Cuiabá.** 51 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Conservação da Biodiversidade) - Instituto de Biociências, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá. 2004.

USACE. EM 1110-2-3600: **Management of Water Control Systems.** [S.l.], p. 184. 1987.

VASCO, A. N. **Indicadores de alteração hidrológica: O declínio das vazões no baixo rio São Francisco.** São Cristóvão: UFS. (Tese – Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), 2010.

VON SPERLING, E. Profundidade Média de Lagos e Represas Brasileiras e sua Influência na Qualidade da Água. In: **20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro, 1999.

YEH, W. W. G. Reservoir management and operation models: a state-of-the-artreview. **Water Resour. Res**., v. 21, p. 1797 - 1818, 1985.

ZERLOTTI, P. **Cenários Pantaneiros- Hidrelétricas na Bacia do Alto Paraguai.** Campo Grande, MS: ECOA, p. 32, 2011.

ZUO, Q; LIANG, S. Effects of dams on river flow regime based on *IHA*/RVA. **Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources** (IAHS Publ. 368, 2015). In: Proceedings RSHS14 and ICGRHWE14, Guangzhou, China, 2014.