

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Walker Matheus Ferreira da Silva

**REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA ÁGUA DE VAZÃO ECOLÓGICA EM
USINAS HIDRELÉTRICAS**

Belo Horizonte

2022

Walker Matheus Ferreira da Silva

**REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA ÁGUA DE VAZÃO ECOLÓGICA EM
USINAS HIDRELÉTRICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Carlos Barreira Martinez

Coorientador: Edna Maria Faria de Viana

Belo Horizonte
2022

S586r Silva, Walker Matheus Ferreira da.
Reaproveitamento energético da água de vazão ecológica em usinas hidrelétricas [recurso eletrônico] / Walker Matheus Ferreira da Silva. - 2022.
1 recurso online (102 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Carlos Barreira Martinez.
Coorientadora: Edna Maria de Faria Viana.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 90-101.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Usinas hidrelétricas - Teses. 3. Vazão ecológica - Teses. 4. Usinas hidrelétricas - Teses. I. Martinez, Carlos Barreira. II. Viana, Edna Maria de Faria. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU:621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA ÁGUA DE VAZÃO ECOLÓGICA EM USINAS HIDRELÉTRICAS

WALKER MATHEUS FERREIRA DA SILVA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Carlos Barreira Martinez (Orientador – Universidade Federal de Minas Gerais), Dra. Edna Maria de Faria Viana (Coorientadora - Departamento de Engenharia Hidráulica e de Recursos Hídricos/UFMG), Dr. Frederico Fábio Mauad (Escola de Engenharia de São Carlos/USP) e Dr. Matheus Pereira Porto (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Energia e Sustentabilidade**".

Dissertação aprovada no dia 08 de março de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Barreira Martinez, Usuário Externo**, em 11/04/2022, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edna Maria de Faria Viana, Professora do Magistério Superior**, em 12/04/2022, às 18:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Frederico Fabio Mauad, Usuário Externo**, em 18/04/2022, às 16:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Matheus Pereira Porto, Servidor(a)**, em 18/04/2022, às 18:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1333088** e o código CRC **A344CC91**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que nele encontrei forças e inteligência suficiente para superar todos os obstáculos. A minha família, principalmente meus pais, pelo incentivo, esforço e força para se desdobrar em poder me ajudar a ser quem sou.

Todos meus amigos e conhecidos, que diretamente ou indiretamente me influenciaram positivamente nessa caminhada, pois sem essa ajuda conjunta não teria chegado até aqui.

Aos docentes e funcionários da faculdade que sempre incentivaram a obter o maior êxito possível, dando forças e sábias palavras para que o sonho não deixasse de ser realizado, sempre com paz, respeito e compreensão.

RESUMO

No Brasil, a matriz de geração elétrica é majoritariamente renovável, com destaque à geração hidrelétrica, que é responsável por aproximadamente 65% da capacidade instalada. Portanto, pequenas perdas relativas a essa fonte podem impactar significativamente na capacidade de geração. Apresenta-se neste trabalho um estudo sobre o impacto da manutenção da vazão ecológica na geração de Usinas Hidrelétricas (UHE's) instaladas no Brasil a partir de um estudo de caso de duas UHE's implantadas em Estados da Federação que possuem legislações distintas sobre o tema. Em um dos casos é exigida a manutenção de vazões sanitárias superiores a 70% da Q7,10 e no outro em 70% da Q95. Para tanto, fez-se uma análise do balanço de vazões turbinadas e vertidas para ambas as UHE's e se obteve como resultado que a redução de geração variou de 0,25% a 2,75%, sendo fortemente influenciada por parâmetros devidos à Legislação e a existência ou não de reservatórios de regularização. Ao final, conclui-se preliminarmente que a redução da geração pode ser considerada pequena e que possíveis ajustes no despacho de carga podem minimizar ainda mais essa perda. Sugere-se que sejam desenvolvidos novos estudos envolvendo um maior número de centrais e que se leve em consideração a possibilidade de incluir regras no despacho de carga contemplando as exigências ambientais de forma a minimizar ainda mais essa perda.

Palavras-chaves: Perdas de geração, Vazão Ecológica, Usinas Hidrelétricas.

ABSTRACT

In Brazil, the power generation matrix is mostly renewable, with emphasis on hydropower, which is responsible for approximately 65% of installed capacity. Therefore, small losses related to this source can have a significant impact on the generation capacity. This paper presents a study on the impact of the maintenance of the ecological flow in the generation of hydroelectric power plants (HPP's) installed in Brazil from a case study of two HPPs installed in the States of the Federation that have distinct laws on the subject. In one of them, it is required to maintain ecological flows higher than 70% of Q7.10 and in the other 70% of Q95. For this purpose, an analysis of the turbined and spilled flow balance was made for both HPPs and it was obtained as a result that the generation reduction ranged between 0,25% and 2,75%, being highly influenced by parameters due to the Regulation and the existence or not of reservoirs storages. In the end, it is preliminarily concluded that the generation decrease can be considered small and that possible adjustment in load dispatching can minimize even more this loss. It is suggested that new studies involving a larger number of plants be developed and that the possibility of including rules in the load dispatch contemplating environmental requirements be considered to minimize even more this loss.

Keywords: Generation Losses, Ecological Flow, Hydroelectric Power Plants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz elétrica no Brasil	18
Figura 2: Representação da bacia hidrográfica de um curso d'água	22
Figura 3: Característica de um relevo de uma bacia hidrográfica	23
Figura 4: Diagrama das metodologias para estimativa de vazões de enchente.....	24
Figura 5: Perfil esquemático de usina hidrelétrica.....	29
Figura 6: Níveis e volumes característicos em reservatório	32
Figura 7: Tomada d'água em torre	34
Figura 8: Turbina Pelton	37
Figura 9: Seção interna da Turbina Francis	38
Figura 10: Corte esquemático da Turbina Kaplan	39
Figura 11: Turbina Bulbo	40
Figura 12: Desenho esquemático de funcionamento da turbina Sifão	41
Figura 13: Desenho esquemático do funcionamento da turbina S	42
Figura 14: Ábaco de seleção de turbinas por queda e vazão.....	43
Figura 15: Fluxo de caixa hipotético do investimento	47
Figura 16: Distribuição de frequência.....	74
Figura 17: Curva de permanência	74
Figura 18: Localização da usina hidrelétrica Retiro Baixo	79
Figura 19: Localização da UHE Serra do Facão	80
Figura 20: Histograma de vazões UHE Retiro Baixo.....	82
Figura 21: Curva de permanência UHE Retiro Baixo	82
Figura 22: Histograma de vazões UHE Serra do Facão	84
Figura 23: Curva de permanência UHE Serra do Facão	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Período crítico de referência do setor elétrico brasileiro.....	27
Tabela 2: Velocidade específica das turbinas	44
Tabela 3: Legislações para outorga de água nos estados	62
Tabela 4: Metodologias hidrológicas	66
Tabela 5: Metodologias hidráulicas	67
Tabela 6: Metodologias de habitat	69
Tabela 7: Métodos holísticos.....	70
Tabela 8: Metodologias de vazão ecológica e proporções relativas no mundo	71
Tabela 9: Recomendação de vazões QMLT	73
Tabela 10: Vazões de outorga vigentes e legislações referentes	75
Tabela 11: Características da UHE Retiro Baixo.....	78
Tabela 12: Características da UHE Serra do Facão	79
Tabela 13: Acompanhamento de vazões usina de Retiro Baixo	81
Tabela 14: Acompanhamento de vazões usina Serra do Facão	83
Tabela 15: Vazões médias mínimas móveis de 7 dias anuais com tempo de recorrência de 10 anos.....	87
Tabela 16: Estimativa das vazões da UHE Retiro Baixo – perda de geração	88
Tabela 17: Estimativa de vazões da UHE Serra do Facão – perda de geração.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

η - Eficiência

AAGISA - Agência de Águas, Irrigação e Saneamento do Estado da Paraíba

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AD - Área de drenagem

ADASA - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal

AGUASPARANÁ - Instituto das Águas do Paraná

Ah – Ampère-hora

ANA - Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima

BBM - Building Block Methodology

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

CERH - Conselho Estadual de Recursos Hídricos

CGH - Central de Geração Hidrelétrica

CONERH - Conselho de Recursos Hídricos do Ceará

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica

DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

EP – Energia Potencial

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FEMARH - Fundação Estadual de Meio Ambiente, Ciência e Tecnologia

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental

H - Desnível

h - Hora

ha - Hectares

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais

IFIM - Instream Flow Incremental Methodology

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas

IGARN - Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte

IMAC - Instituto do Meio Ambiente do Acre

IMAP - Instituto do Meio Ambiente do Amapá

IMASUL - Instituto do Meio Ambiente do Mato Grosso do Sul
INEMA - Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Bahia
IPAAM - Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas
km² - Quilômetros quadrados
kW/m²/dia – quilo Watt por metro quadrado por dia
m – Metro
m³/s - Metros cúbicos por segundo
MVA - Mega-volt-ampère
MW – Mega-Watt
NA - Nível de água
NATURATINS - Instituto Natureza do Tocantins
PBHs - Planos de Bacias Hidrográficas
PCH - Pequena central hidrelétrica
PERH - Plano Estadual de Recursos Hídricos
Q7,10 - Vazão média mínima de 7 dias com taxa de recorrência de 10 anos
Q85 - Vazão com 85% de permanência no tempo
Q90 - Vazão com 90% de permanência no tempo
Q95 - Vazão com 95% de permanência no tempo
Q98 - Vazão com 98% de permanência no tempo
Qe - Disponibilidade hídrica
QL - Vazões de Longo Termo
QMLT - Vazões Médias de Longo Termo
Qreg95 - Vazão regularizada com 95% por cento de garantia
Qsanitária - Vazão sanitária (ambiental/ecológica)
R\$ - Real brasileiro
rpm - Rotações por minuto
SAR - Sistema de Acompanhamento dos Reservatórios
SDS - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável
SECIMA - Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Goiás
SEDAM - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental
SEGIRH - Sistema Estadual de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos
SEMA - Secretaria de Estado do Meio Ambiente
SEMARH - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos

SEPLANTEC - Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia

SERH - Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SERLA - Superintendência Estadual de Rios e Lagoas

SIGMRH - Sistema Integrado de Gerenciamento e Monitoramento dos Recursos Hídrico

SRH - Secretaria de Recursos Hídricos

TR - Taxa de recorrência

TVR - Trecho de vazão reduzida

TWh - Tera-Watt-hora

UHE – Usina hidrelétrica

US\$ - Dólar americano

US\$/kWh – Dólares por quilo-Watt-hora

V – Volts (Tensão)

W – Watts (Potência)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo geral	17
1.2	Objetivo específico	17
1.3	Justificativa	17
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	18
2.1	Contextualização nacional	18
2.2	Energia hidráulica	19
2.2.1	Disponibilidade de recursos hidráulicos	19
2.2.2	Principais fatores hidrológicos	21
2.2.3	Vazões de Cheia de Projeto	23
2.3	Energia Firme e Energia Secundária	25
2.4	Energia Secundária e Ponta Garantida	27
2.5	As Centrais Hidrelétricas	28
2.6	Tipos de Centrais Hidrelétricas	30
2.7	Estruturas da Usina Hidrelétrica	31
2.7.1	Barragem	31
2.7.2	Reservatórios	31
2.7.3	Sistemas de captação de água	33
2.7.4	Vertedouro	35
2.7.5	Casa de força	36
2.7.6	Turbinas Hidráulicas	36
2.7.7	Geradores	45
2.7.8	Canal de fuga	45
2.8	Análise econômica: custos e receitas	46
3	CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS E VAZÕES	48
3.1	Legislação Brasileira e Outorgas de Vazões	48
3.1.1	Acre	49
3.1.2	Alagoas	50
3.1.3	Amapá	50
3.1.4	Amazonas	51
3.1.5	Bahia	52
3.1.6	Ceará	52

3.1.7 Distrito Federal	52
3.1.8 Espírito Santo	53
3.1.9 Goiás	53
3.1.10 Maranhão.....	54
3.1.11 Mato Grosso	54
3.1.12 Mato Grosso do Sul	54
3.1.13 Minas Gerais.....	55
3.1.14 Pará	55
3.1.15 Paraíba	56
3.1.16 Paraná	56
3.1.17 Pernambuco	57
3.1.18 Piauí.....	57
3.1.19 Rio de Janeiro.....	58
3.1.20 Rio Grande do Sul	58
3.1.21 Rio Grande do Norte.....	59
3.1.22 Rondônia	59
3.1.23 Roraima	59
3.1.24 Santa Catarina.....	60
3.1.25 São Paulo	60
3.1.26 Sergipe	60
3.1.27 Tocantins	61
3.2 Estudo das Vazões: Vazões Naturais e Vazões Ecológicas	63
3.2.1 Metodologia Hidrológica	65
3.2.2 Metodologia hidráulica	66
3.2.3 Metodologias de Habitat	68
3.2.4 Metodologia Holística.....	69
3.3 Metodologias para cálculo de vazões de referência no Brasil	71
3.3.1 Vazão mínima de sete dias com período de recorrência de dez anos	71
3.3.2 Tennant/Montana com base em vazão média de longo termo	72
3.3.3 Análise de curva de permanência.....	73
4 METODOLOGIA.....	75
4.1 Determinação da potência e energia.....	76
5 ESTUDO DE CASO.....	78
5.1 Descrição da Usina Hidrelétrica Retiro Baixo	78

5.2	Descrição da Usina Hidrelétrica Serra do Facão	79
5.3	Estudo das vazões das usinas de Retiro Baixo e Serra do Facão	80
5.3.1	UHE Retiro Baixo.....	81
5.3.2	UHE Serra do Facão.....	83
5.4	Procedimentos experimentais.....	85
5.4.1	Procedimento geral.....	85
5.4.2	Determinação de vazão de projeto para as UHEs Retiro Baixo e Serra do Facão	85
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
6.1	Usina de Retiro Baixo.....	87
6.2	Usina Serra do Facão	88
7	CONCLUSÃO.....	90
8	BIBLIOGRAFIA.....	91

1 INTRODUÇÃO

De acordo com (EPE, 2020) o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável representando aproximadamente 83% da oferta interna de energia elétrica, com destaque para a fonte hídrica que responde por 64,9%. Mesmo com grande potencial hidrelétrico, existe um grande desafio em acompanhar o baseado em energia renovável de origem hidráulica, isso se deve aos investimentos necessários para a construção de Usinas Hidrelétricas (UHE) e de seus sistemas de transmissão de energia, além da questão de investimento, esse tipo de conversão de energia, depende principalmente da meteorologia (períodos de cheia e de seca), no qual pode ocasionar problemas de abastecimento, estes que intervêm diretamente na vazão disponível, que além de influenciar na geração de energia, também influencia em relação a manutenção da vida dependente, (fauna, flora, ictiofauna, entre outros), onde, esta vazão disponível para manter a manutenção da vida é comumente chamada de vazão ecológica, sanitária ou de preservação ambiental. Portanto, analisar as vazões e seus efeitos, tem aberto espaço para desenvolvimento de novas tecnologias de geração de energia, trazendo em pauta, sistemas de reaproveitamento energético, entre outros meios para aumentar a geração hidrelétrica e, mesmo com a tecnologia disponível, considerada consolidada ainda se convive com problemas ambientais e sociais severos, tais como, composição morfológica dos rios, degradação da qualidade hídrica, mudanças de parâmetros dos rios, emissão de gases, fragmentação de habitat (terrestre e aquático), entre outros, mesmo com uma quantidade de impactos consideráveis, muitos empreendedores têm questionamentos em relação a manutenção da vazão residual, pois alegam que essa representa uma redução na disponibilidade do bloco de energia, considerando principalmente em épocas de baixas afluências de vazão. Então, o estudo de reaproveitamento energético através da vazão ecológica é uma alternativa para aumentar a disponibilidade de energia hidrelétrica com baixo impacto ambiental e se constitui no foco central dessa investigação melhorando a eficiência energética de toda a instalação.

1.1 Objetivo geral

O objetivo principal desse trabalho será investigar as estratégias utilizadas para manutenção da vazão ecológica, e verificar a possibilidade de usá-la como fonte geradora de energia.

1.2 Objetivo específico

- Desenvolver metodologias para quantificação do bloco de energia no sistema de manutenção de vazão ecológica e, se considerar metodologia para análise de viabilidade técnica e econômica do sistema de reaproveitamento de energia.

1.3 Justificativa

Nas últimas décadas o Brasil optou por implantar UHE a fio d'água abrindo mão da capacidade de regularização dos reservatórios que possibilitam um ganho energético significativo. A redução da vazão média disponível teve como resultado a diminuição da capacidade instalada das usinas e o conseqüente aumento do custo unitário da energia gerada. Além disso a falta de regularização expõe os empreendimentos a uma situação de baixas afluências de vazão nos períodos de seca o que reduz o escoamento aproveitável pela UHE. A par disso a legislação Brasileira impõe a manutenção de uma vazão residual mínima que varia em função das leis locais (Estaduais). Essa vazão ecológica muitas vezes é inferior a mínima vazão possível de ser turbinada pelas turbinas o que força o empreendedor (ou concessionário) a despachar uma vazão ecológica pelas válvulas dispersoras ou pelo vertedor. Essa vazão não é transformada em energia e se constitui em uma perda de geração diminuindo o bloco de energia gerado pela UHE. Esta investigação se justifica em função da possibilidade de aproveitamento energético dessa vazão que pode ser utilizada para gerar um bloco de energia marginal mas que representa uma quantidade de energia renovável evitando a emissão de carbono quer pela queima de derivados de petróleo em centrais termelétricas ou pela necessidade de se implantar centrais geradoras do tipo solar ou eólica que apesar de serem conversoras de energia renovável necessitam de matérias primas que impactam o meio ambiente.

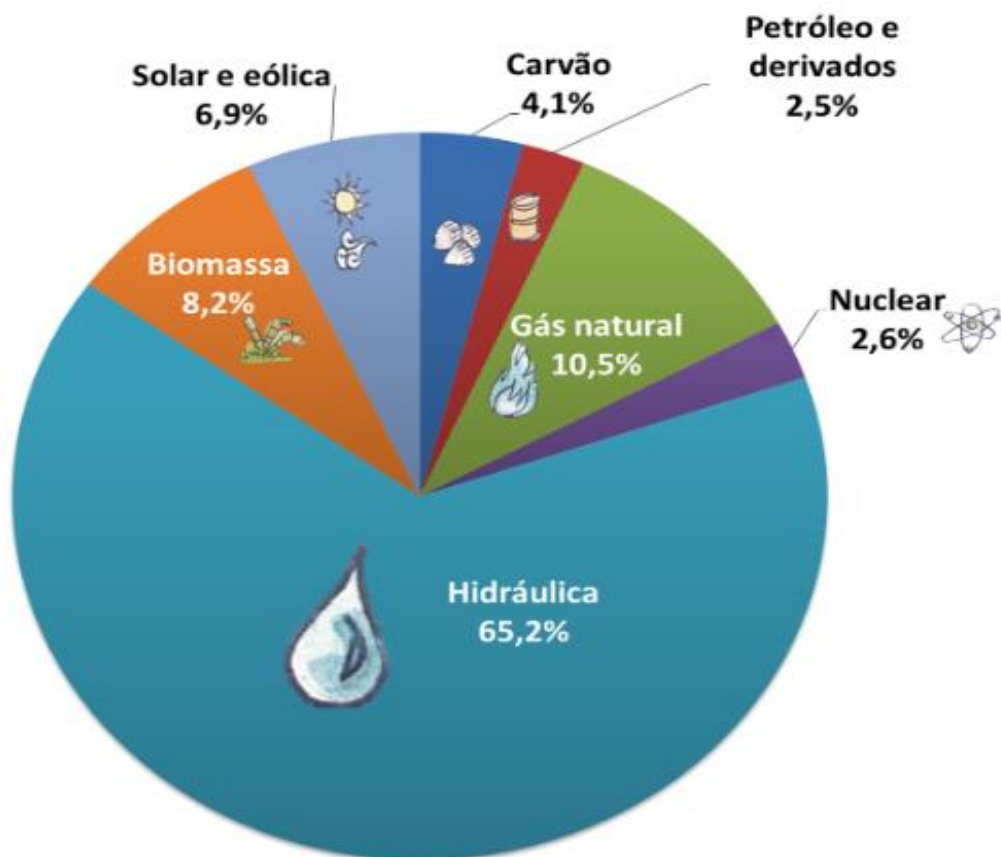
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Contextualização nacional

No Brasil, a matriz elétrica é majoritariamente renovável, e grande parte da energia é gerada através de usinas hidrelétricas, além disso, outras fontes renováveis para energia seguem em expansão, tal como, biogás, energia solar, energia eólica, entre outras. O Brasil, atualmente em tem aproximadamente 83% de sua matriz elétrica derivada de fontes renováveis, contribuindo aspecto tecnológico e ambientalmente sustentável, para uma redução maior da emissão de gases de efeito estufa, com valores compatíveis com os compromissos firmados para geração de energia renovável, e também pelas questões socioeconômicas locais, com a geração de emprego e renda para a população (BRASIL).

A figura 1 a ilustra a matriz elétrica no Brasil:

Figura 1: Matriz elétrica no Brasil



Fonte: EPE, 2018.

2.2 Energia hidráulica

A energia hidráulica, também conhecida como energia hídrica ou hidrelétrica, se utiliza de um fenômeno conhecido como ciclo hidrológico que parte da captação da irradiação solar e da energia potencial gravitacional, que provocam a evaporação, condensação e precipitação da água sobre a superfície terrestre (Helerbrock, 2020). A energia hidráulica é considerada uma fonte de energia renovável, ou seja, com baixa emissão de gases de efeito estufa, e hoje, representa uma parcela significativa da matriz energética mundial possuindo tecnologia consolidada e amplamente difundida no mundo. Atualmente, é a principal fonte geradora de energia elétrica para diversos países, e corresponde por cerca de 17% de toda a eletricidade gerada no mundo (EPE, 2020).

2.2.1 Disponibilidade de recursos hidráulicos

Uma primeira estimativa da quantidade de energia hidráulica disponível poder ser feita pela aplicação da equação para cálculo da energia potencial, em função de massa em kg, gravidade em m/s² e desnível em metros. (ANEEL, 2008):

$$EP = m * g * h \quad (1)$$

Essa equação origina a equação de cálculo de potência. Assim pode-se considerar que a potência instalada de uma usina hidrelétrica “ P_{inst} ” em KW, é função do peso específico da água “ γ ”, da vazão de projeto “ Q ”, do desnível existente no local “ H ” em metros, da aceleração da gravidade “ g ” em m/s² e do rendimento percentual global da instalação “ η ”, (Doland, 1954) e (Schreiber, 1977), calculada em equação 2:

$$P_{inst} = \gamma * g * Q * H * \eta \quad [W] \quad (2)$$

O peso específico da água pode ser considerado como sendo em torno de 9806 Nm⁻³. Dessa forma pode-se reescrever essa equação da seguinte forma (Equação 3):

$$P_{inst} = g * Q * H * \eta \quad [kW] \quad (3)$$

Na prática, não há como aproveitar toda energia disponível, primeiramente por conta da inacessibilidade à parte desse volume, da reevaporação da água antes da mesma chegar ao sistema; em segundo lugar, porque há perdas de energia devido ao atrito, a turbulência, e também durante a conversão na geração. Estima-se, que apenas um quarto do referido volume de água precipitada esteja efetivamente

disponível para aproveitamento hidráulico. Desse modo, a energia hidráulica disponível na Terra é de aproximadamente 50.000 TWh por ano, o que corresponde, ainda assim, a cerca de quatro vezes a quantidade de energia elétrica gerada no mundo atualmente (ANEEL, 2008).

A disponibilidade hídrica local pode ser obtida a partir da análise de dados de estações fluviométricas. Devido às limitações da rede brasileira de monitoramento hidrológico existe alguma dificuldade em conseguir esses dados (Piol, Reis, Caiado, & Mendonça, 2019). Assim é comum se utilizar a técnica de transferência de dados entre pontos onde há um posto fluviométrico para outro ponto onde não existe (Rao & Srinivas, 2006), respeitando-se a similaridade de fatores físicos, climáticos, biológicos, geológicos e até mesmo antrópicos. Apesar de alguns autores considerarem essa técnica válida e segura outro a consideram muito subjetiva e difícil de ser feita (Bobee & Rasmussen, 1995); (Hosking & Wallis, 1997). (Fill, 1987) considera que essa técnica de regionalização de vazões pode ser entendida como qualquer processo de transferência de informações das estações hidrométricas para outros locais sem observações e cita que os métodos mais usados são os que utilizam a “transferência de equações e parâmetros relacionados com a estatística” (ELETROBRÁS S.A., 1985) e metodologias que utilizam técnicas automáticas em ambiente de sistemas de informações geográficas (Wolff, et al, 2014); (Tucci, 2009); (Silva Junior, et al, 2003).

Outros autores afirmam que a regionalização pode também ser usada para verificar a consistência da série hidrológica e identificar a necessidade de instalação de um posto fluviométrico em um determinado local, dentro da bacia hidrográfica”. (Naghetinni & Pinto, 2007). Recomenda-se que a construção do modelo regional obedeça às seguintes etapas: (i) definição dos limites da área a ser estudada; (ii) determinação da variável dependente e possíveis variáveis explicativas; (iii) seleção dos dados e cálculo de variáveis; e (iv) definição das áreas com comportamento hidrológico semelhante e estimação das relações regionais (Tucci, 2009); (Hosking & Wallis, 1997) cita que os métodos para se definir uma região homogênea são: i) localização contígua das bacias; ii) agrupamento subjetivo baseado na similaridade de características locais; iii) agrupamento objetivo baseado em um conjunto de características homogêneas dos locais; iv) e análise de *clusters* onde um vetor de dados é associado a cada local de acordo com a similaridade dos locais. Pessoa (2015) alerta que a qualidade dos dados deve ser boa de forma que o processo de regionalização, não se apresente tendencioso e com resultados inadequados. Uma

das informações de grande importância para regionalização das vazões são as curvas de permanência ou de duração, que fornecem dados de disponibilidade hídrica do local. Essa curva correlaciona a vazão (eixo das ordenadas) com a porcentagem do tempo em que ela é igualada ou superada no histórico de vazões analisado (eixo das abscissas). Essa curva não representa a probabilidade de vazões em cada ano, mas sim a probabilidade de ocorrência em um horizonte de longo prazo. Atribui-se a Clemens Herschel, por volta de 1880, o primeiro uso da representação da característica local a partir de um fluviograma (Foster, 1934 *apud* Fennessey e Vogel, 1990). (Raldieres, 2020) cita em sua dissertação de mestrado que:

“A técnica de obtenção dessa curva está descrita em livros clássicos de hidrologia e consiste em definir classes ordenadas de vazões em função de sua amplitude, fazendo-se a frequência de ocorrência das vazões e posteriormente acumulando-as e depois pilotando-as em um gráfico onde a ordenada representa a vazão e a abcissa, a porcentagem de ocorrência dessas vazões (CRUZ, 2008; TUCCI, 2000; BRUSA, 2014)”.

Assim os estudos hidrológicos realizados através de estimativas e cálculos baseados nos levantamentos topográficos, hidrografia local, modelagens matemáticas e estudos laborais são de suma importância para prevenir e mitigar impactos negativos provenientes de grandes inundações, então, a partir dessa premissa de estudos, os aspectos hidrológicos são características fundamentais para um projeto de aproveitamento hidrelétrico, no qual estimativas gerais de vazões, pode-se considerar o parâmetro mais importante no dimensionamento hidrológico.

Os *Aspectos Hidrológicos* se caracterizam nos seguintes conceitos:

- Características físicas (geografia/geologia/topografia);
- Precipitações (chuvas e características);
- Vazões (vazão de cheia/projeto);
- Metodologias para mensuração da hidrologia local projetada.

2.2.2 Principais fatores hidrológicos

O *Ciclo Hidrológico* é o primeiro fenômeno global da circulação da água entre a atmosfera, superfície terrestre e o solo, e são considerados os seguintes elementos para análise:

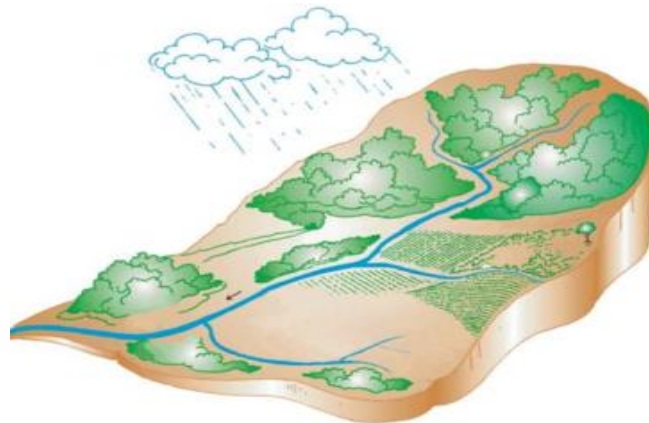
- Precipitação (chuva) – P`;
- Escoamento na superfície – ES;
- Infiltração no solo – I;
- Evaporação e evapotranspiração – EV.

Então, de forma geral, considera que o volume precipitado (chuvas), resulta em parcelas de escoamento superficial, escoamento subterrâneo (infiltração), e por fim em ciclos de evaporação e evapotranspiração, considerando fenômenos conhecidos, as enchentes são provocadas por parcelas de escoamentos superficiais e intensidade de precipitações, ou também, são consideradas como ocorrências naturais extremas, e pode-se afirmar de forma genérica, que o quanto menor for o potencial de retenção de água dessa superfície, maior será a parcela de escoamento na superfície, portanto segue abaixo uma equação para demonstrar o volume e suas parcelas (DAEE, 2005):

$$P = ES + I + EV \quad (5)$$

A “*Área de Drenagem*” é definida como sendo uma área de contribuição da bacia hidrográfica, ou seja, uma região de captação natural da água de precipitação, onde converge-se escoamentos superficiais e subterrâneos em um único ponto de saída. É expressa em hectares (ha) ou em quilômetros quadrados (km²), no geral o divisor da bacia pode ser definido em um parâmetro no qual separa as águas pluviais entre duas vertentes, numa carta topográfica, é uma linha que corta perpendicularmente curvas de nível e não cruza nenhum nível d’água a não ser em seções definidas. A figura 5 mostra a representação da bacia hidrográfica de um curso d’água:

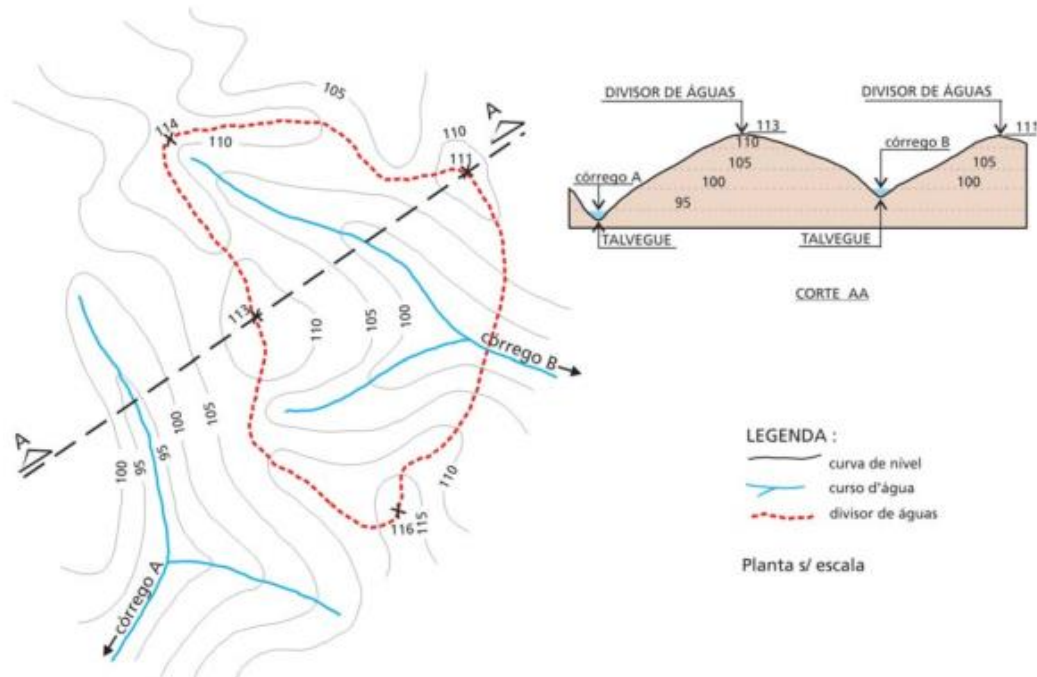
Figura 2: Representação da bacia hidrográfica de um curso d’água



Fonte: Adaptado de DAEE, 2005.

Além de outros fatores, existe o *Talvegue* (figura 3), que é a linha que determina a interseção dos planos de vertentes, também denominado como o canal mais profundo de um curso d'água (DAEE, 2005).

Figura 3: Característica de um relevo de uma bacia hidrográfica



Fonte: DAEE, 2005.

Os *Parâmetros Pluviométricos*, consideram a precipitação, neste caso sinônimo de chuva, e a altura pluviométrica. São obtidos mediante a medição da altura da água contida em um recipiente sem infiltração. Para a obtenção dos dados, utiliza-se equipamentos simples que são constituídos de um recipiente simples com uma saída inferior conhecidos com pluviômetros. Também são utilizados equipamentos mais sofisticados, os pluviógrafos, que registram dados de volumes captados e os representam graficamente, mantendo assim uma base de dados para longos períodos (DAEE, 2005) (Méllo & Bonnacarrere, 2010).

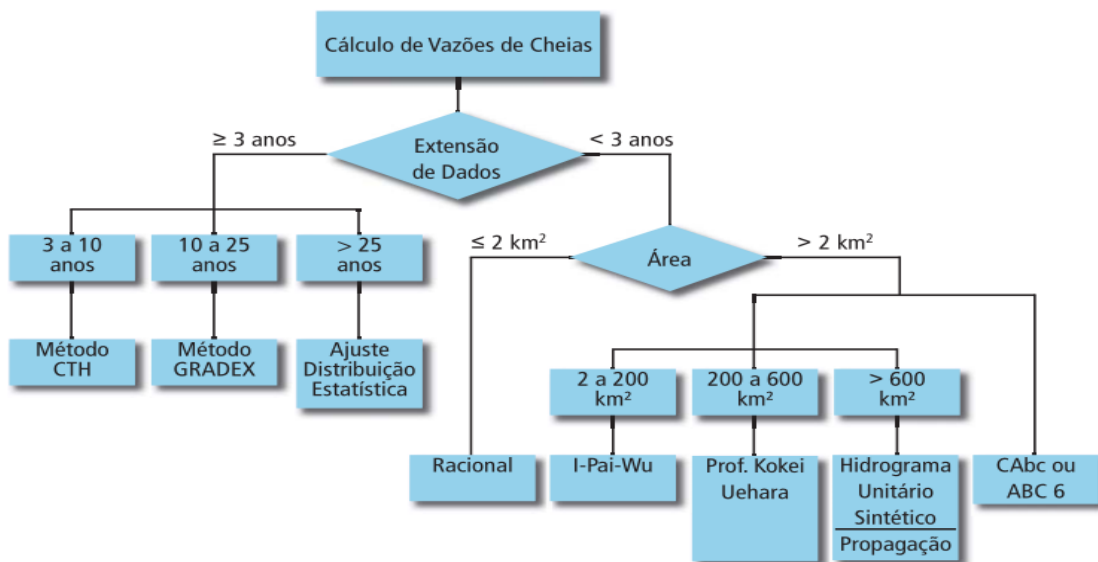
2.2.3 Vazões de Cheia de Projeto

Considera-se vazão de cheia de projeto, uma vazão de enchente em um determinado curso d'água, vinculado a coeficientes de segurança de obra hidráulica, associando a probabilidade de um evento de cheia excepcional em um ano qualquer. Esse dado é obtido a partir de uma estimativa de acordo com dados históricos para

bacia de contribuição delimitada pela seção de aproveitamento do projeto (DAEE, 2005).

E para cálculo dessa vazão de projeto, utiliza-se metodologias diversas, porém em comum é considerada a mesma variável de importância, que é a extensão histórica de dados fluviométricos existentes e suas variáveis de importância, e se necessário, áreas de drenagem (AD) da bacia. Normalmente as metodologias são separadas em grupos de acordo com os dados fluviométricos existentes (DAEE, 2005). A figura 4 apresenta o diagrama das metodologias para estimativa de vazões de enchente.

Figura 4: Diagrama das metodologias para estimativa de vazões de enchente



Fonte: DAEE, 2005.

- Método CTH (3 a 10 anos): empírico, utiliza-se da técnica do hidrograma unitário;
- Método Gradex (10 a 25 anos): correlaciona o resultado da análise de frequência de dados de precipitações intensas e vazões máximas;
- Método Estatísticos (acima de 25 anos): emprega análise estatística com ajuste de distribuição de probabilidade em relação a série de dados aferidos.

Extensão de série de dados fluviométricos inferior a 3 anos:

- Método Racional (Área de drenagem inferior a 2km²);
- Método I-PAI-WU (Área de drenagem entre 2 e 200 km²);

- Método Professor Kokei Uehara (Área de drenagem entre 200 e 600 km²);
- Hidrograma Unitário de Propagação (Área de drenagem superior a 600 km²);
- Métodos matemáticos de simulação de ondas de cheias – Cabc ou ABC6 (Área de drenagem superior a 2km²).

2.3 Energia Firme e Energia Secundária

Em uma usina hidrelétrica, a energia disponível é diretamente proporcional a vazão que flui pelo trajeto do rio e do desnível existente. O desnível pode variar ao longo do tempo em função do nível do reservatório e do canal de fuga da UHE. A vazão apresenta uma variabilidade natural que pode apresentar diferenças significativas entre as estações do ano. Para minimizar essa variação de vazão, reservatórios são construídos ao longo do rio, garantindo a vazão contínua necessária e a geração de energia de modo uniforme (Filho, 2003).

No entanto o reservatório contém capacidade limitada, e em períodos de grande estiagem, a manutenção de níveis de geração por vazão afluente pode proporcionar o esvaziamento do sistema. Define-se como energia firme à geração que “corresponde à máxima produção contínua de energia que pode ser obtida, supondo a ocorrência da sequência mais seca (período crítico) registrada no histórico de vazões do rio onde o aproveitamento está instalado”. Esse tempo é o limitador da produção de energia e varia em função da afluência natural de vazões e da existência ou não de reservatórios (ANEEL, 2005) (EPE, 2008).

No cenário atual, opta-se pelo conceito probabilístico de Energia Assegurada, no qual utiliza-se séries de energias afluentes vinculadas a um índice de confiabilidade estatística, por exemplo, afirmar que um aproveitamento tem Energia Assegurada, de 1MW, com confiabilidade de 90 ou 95 %, significa dizer que 90 ou 95 % do tempo a usina consegue atender uma demanda sintética simulada através das séries, esta também chamada de Q95. Nesta proposição utiliza-se o conceito de Energia Firme como a energia garantida para a operacionalidade plena do empreendimento devido a simplificação dos cálculos, facilitando dimensionamentos de aproveitamentos de cogeração de energia, obtida pela equação abaixo:

$$E_{firme} = P_{inst.} \cdot T_{op. med.} \quad (6)$$

Onde, E_{firme} – Energia firme;

$P_{inst.}$ – Potência instalada; e

$T_{op. med.}$ – Tempo médio de operação da instalação (mês ou ano).

Considera-se hipoteticamente que usinas que trabalham com vazão garantida em 95% de permanência no tempo ($Q_{95\%}$), opera com característica de usina a fio d'água, 365 dias por ano, 24 horas por dia.

Nos casos em que a capacidade de engolimento (ou turbinamento) das turbinas, é maior do que a Vazão “ $Q_{95\%}$ ”, tem-se uma produção de energia proporcional à vazão afluenta a instalação. Nesse caso, a vazão de engolimento varia em função da época do ano, descontando-se proporção da vazão ecológica em períodos de baixa afluência de vazão.

A energia disponível no sistema dependerá da vazão de engolimento do desnível existente no local (H), descontadas as perdas de carga, que resulta na altura líquida “ H_{Liq} ”. A perda de carga pode ser determinada em função da velocidade da água, da extensão da tubulação existente e do fator de perda de carga. A energia gerada então é obtida em função da disponibilidade hídrica “ Q_e ” e da queda disponível “ H_{Liq} ”, do rendimento dos equipamentos hidro eletromecânicos, da aceleração da gravidade “g” e do período considerado [h / ano].

O cálculo pode ser feito a partir da simulação da operação da central, conectada no sistema elétrico e sob a hipótese de a mesma inserir toda energia gerada, nesse sistema, assim, a partir de um histórico de vazões afluentes ao local, pode-se fazer uma simulação da operação da usina de forma a se quantificar a energia obtida ao longo de um período, demonstrado na equação abaixo:

$$E_{firme} = (P_{inst} = g Q H_{liq} \eta) \cdot T_{op. med.} \quad (7)$$

A queda disponível “ H_{liq} .” pode ser obtida a partir da altura bruta “H”, subtraindo-se as perdas hidráulicas De acordo com (Ardizzon, G., Cavazzini G., Pavesi. G., 2014) a “ E_{firme} ”, pode ser obtida também pela equação apresentada a seguir:

$$E_{firme} = \int_0^t P_t dt = \int_0^t \frac{\rho g Q(t) h(t) \eta_{hid(t)} \eta_{mec(t)} \eta_{el(t)}}{1000} dt \quad (8)$$

Onde:

P_t – Potência [kW] obtida pela instalação no instante “t”;

ρ – Massa específica da água;

$Q_{(t)}$ – Vazão engolida no instante “t”;

$\eta_{hid(t)} \eta_{mec(t)} \eta_{el(t)}$ – São os rendimentos hidráulicos, mecânicos e elétricos no instante “t”.

Assim, vê-se que a energia disponível é função tanto da vazão disponível (descontada a vazão ecológica) quanto do desnível existente no local, descontadas as perdas de carga. A disponibilidade hidrológica tem um comportamento sazonal. Isso se constitui em uma das grandes incógnitas para a determinação da energia disponível em um aproveitamento hidrelétrico. Devido a isso é pertinente se fazer uma estimativa da redução percentual da geração de energia, em função do despacho da vazão ecológica bem como pesquisar a pertinência de se recuperar essa energia. Sugere-se, no caso brasileiro, a adoção do período crítico recomendado por (Kelman, Kelman, & Pereira M, 2004) e (Oliveira, et al., 2005), representado na tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Período crítico de referência do setor elétrico brasileiro

Configuração	Tolerância %	Período Crítico
Longo prazo	1.5	Junho/1948 a novembro/1956
Médio prazo	1.5	Maior/1949 a novembro/1956
Curto prazo	1.5	Maior/1951 a novembro/1955

Fonte: (KELMAN, J., KELMAN, R., PEREIRA, M, V, F., 2004), (Oliveira, et al., 2005).

Conforme a tabela acima, devido à avaliação da redução da energia firme em um horizonte temporal compatível com o tempo de concessão, sugere-se adotar o período crítico de curto prazo, que corresponde aos meses de maio de 1951 a novembro de 1955.

2.4 Energia Secundária e Ponta Garantida

A energia secundária, é considerada um produto de energia no qual não possui garantias de suprimento, no entanto, boa parte do tempo as centrais hidrelétricas trabalham com gerações afluentes superiores as vazões do período crítico, portanto ao longo do histórico de geração de uma determinada usina, considera-se que a geração média da central é maior do que a energia firme gerada. E define-se por convenção que a energia secundária é a diferença entre a geração média e a energia firme. Porém, devido às incertezas de disponibilidade de energia secundária seu valor econômico é inferior, sendo indicado analisar com cautela devido a sua variação

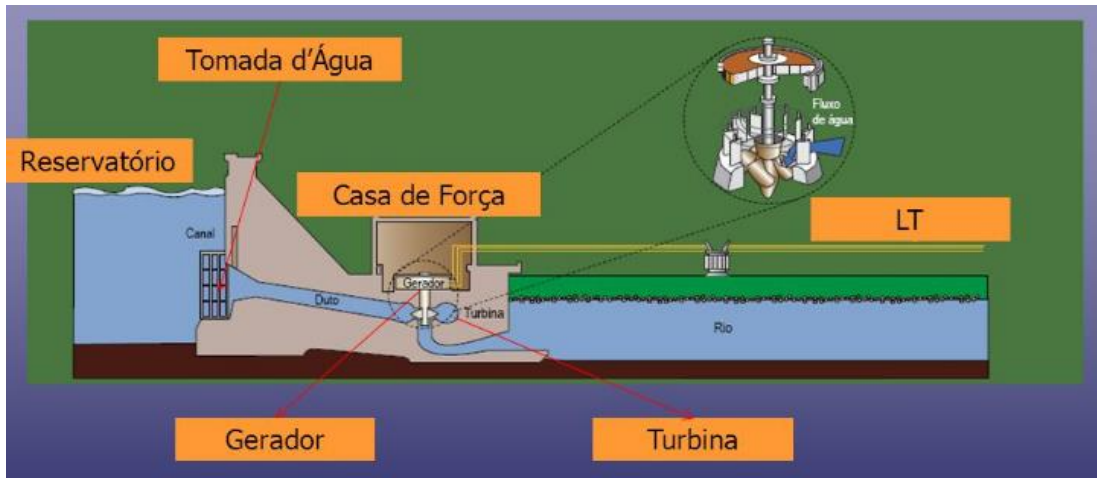
sensível de acordo com o tempo, e em períodos de estiagem, torna-se nula, onde em alguns casos específicos de demanda, é implantado um parque termoelétrico em anexo a central hidrelétrica, que tem por objetivo para “firmar” a energia secundária complementar em períodos de estiagem. (Filho, 2003).

As usinas hidrelétricas são dependentes da disponibilidade de água do reservatório, ou seja, a potência máxima da mesma, é obtida quando o reservatório está cheio, mas dependendo das condições operativas, os reservatórios se esvaziam, trazendo como consequência, a diminuição da potência máxima. Sabendo dessas variabilidades, se faz necessário cálculos e simulações, para obter parâmetros no qual expressem a potência máxima gerada fornecida na maior parte do tempo, ou então, determinação da potência nas piores situações operativas, no qual compreende os períodos de seca, onde, normalmente são utilizados estudos de simulação de operação, além de determinar a Energia Firme e Secundária, e têm como resultado complementar, definições das potências máximas ao longo de um tempo, no qual cria-se uma curva de permanência ao longo de um *Período Crítico*, definindo-se a Ponta ou Potência Garantida (Filho, 2003).

2.5 As Centrais Hidrelétricas

(Ramage & Everett, 1996) cita que uma UHE é um arranjo de obras e equipamentos que tem por finalidade produzir energia elétrica através do aproveitamento potencial de energia hidráulica. Essa conversão se dá através da turbina devidamente acoplada em um gerador, ou das turbinas a geradores elétricos. Estas turbinas apresentam grande variedade de formas, tamanho e diferentes faixas de quedas que se classificam em grandes, médias ou baixas. As UHE são compostas por barragem/reservatório, sistema de captação e adução de água, casa de força, vertedouro e o sistema de restituição, que funcionam em conjunto e de maneira integrada, conforme indicado na figura 5:

Figura 5: Perfil esquemático de usina hidrelétrica



Fonte: ANEEL, 2008.

Segundo a Agência Nacional das Águas (ANA, 2020), e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2020), as estruturas possuem finalidades distintas, porém dependentes umas das outras para o funcionamento pleno da usina hidrelétrica, sendo elas abaixo:

- **Barragem:** São as estruturas físicas que represam um curso de água, onde tem por objetivo permitir a formação do reservatório;
- **Reservatório:** Tem por finalidade, além de reter grandes volumes de água, também permitem a formação do desnível necessário para a configuração da energia hidráulica, a captação da água em volume adequado e a regularização da vazão dos rios (vazão ecológica) em períodos de chuva ou estiagem;
- **Sistema de captação e adução de água:** Tem por função ligar o sistema de armazenamento (reservatório), ao sistema de geração de energia (casa de força), podendo ser através de túneis, canais ou condutos metálicos;
- **Casa de força:** Estrutura no qual contempla o sistema de geração de energia elétrica, nesta instalação estão as turbinas, geradores, e por fim, todo o sistema de controle da usina hidrelétrica;
- **Vertedouro:** Sua função principal, é permitir a saída da água sempre que os níveis do reservatório ultrapassam os limites recomendados, sendo eles por motivo de cheia (chuva), ou por necessidade de abertura devido ao armazenamento e/ou geração de energia, além de prevenir enchentes na região de entorno da usina.

- **Canal de Fuga:** Mecanismo para devolução da água utilizada para a geração de energia de forma a minimizar efeitos danosos sobre o bioma e biota local.

A água captada, é conduzida a casa de força através do sistema de adução. Na casa de força, a energia hidráulica é transformada em energia elétrica através de uma turbina acoplada a um gerador elétrico. Na sequência a energia gerada é transportada através de cabos ou barras condutoras até os sistemas de transmissão de energia (FURNAS, 2014).

De acordo com as agências reguladoras, a energia potencial acumulada depende da diferença entre o nível do reservatório e do canal de fuga, portanto, a produção de energia elétrica depende da vazão e de altura da queda d'água (ANEEL, 2008) (EPE, 2020).

2.6 Tipos de Centrais Hidrelétricas

A Lei 9648, de 1998 juntamente com a Lei 13097, de 2015 classifica os tipos de centrais geradoras de eletricidade (ANEEL, 2018) e (Ramos & Grimoni, 2012) de acordo com o apresentado a seguir:

1) Forma de utilização da vazão:

- **Fio d'água:** Essas centrais geram energia com o fluxo de água do rio, ou seja, pela vazão com mínimo ou nenhum acúmulo do recurso hídrico;
- **Acumulação:** Geralmente localizados na cabeceira dos rios, em locais de altas quedas d'água. Dado o seu grande porte permitem o acúmulo de grande quantidade de água e funcionam como estoques a serem utilizados em períodos de estiagem. Além disso, como estão localizados a montante das demais hidrelétricas, regulam a vazão da água que irá fluir para elas, de forma a permitir a operação integrada do conjunto de usinas.

2) Capacidade Instalada:

A potência instalada determina o porte da usina geradora de energia, classificadas como: Microcentral geradora hidrelétrica (até 1 MW de potência instalada), minicentral geradora hidrelétrica (entre 1 e 5 MW de potência instalada), pequena central hidrelétrica (entre 5 e 30MW de potência instalada), e Usina hidrelétrica (acima de 30MW de potência instalada) (ABRAGEL, 2020). Porém, de acordo com Agência Nacional de Águas os aproveitamentos são

classificados como: PCH's (entre 1 e 30 MW e área inferior a 3km²), e UHE's (acima de 30 MW) (ANEEL, 2008).

3) Queda Bruta:

Não há consenso sobre classificações de medidas de queda d'água, porém adotam-se por conveniência: baixíssima queda (menor que 15 metros), baixa queda (entre 15 e 50 metros), média queda (entre 50 e 150 metros) e alta queda (acima de 150 metros) (ABRAGEL, 2020).

4) Tipo de captação:

- **Leito de rio ou barramento:** Através de represas e canais de adução ligados diretamente ao leito dos rios, e/ou barragens.
- **Desvio ou derivação:** Desvio do curso do rio, ou derivação de parte do leito do rio para um canal de adução.

2.7 Estruturas da Usina Hidrelétrica

2.7.1 Barragem

Uma barragem hidrelétrica é uma estrutura de engenharia projetada para não sofrer modificações em suas estruturas, de acordo com as características principais no projeto, a barragem tem como principal finalidade, represar e armazenar água, matéria-prima para a produção de energia hidrelétrica. Também é função da barragem obter o desnível necessário para girar as turbinas das unidades geradoras.

Por sua própria natureza, as barragens hidrelétricas tem função, características técnicas e níveis de confiabilidade e segurança definidos desde o seu projeto básico e passam sempre por manutenção adequada para preservá-las construção e operação (ANA, 2016). Contam com estruturas extravasoras (ou também chamadas de vertedouros), projetadas para suportar vazões geradas por chuvas extremas, controlando o nível do reservatório, garantindo as condições de projeto e evitando o galgamento ("transbordamento") da barragem (ELETROBRAS, 2000) (ANA, 2020).

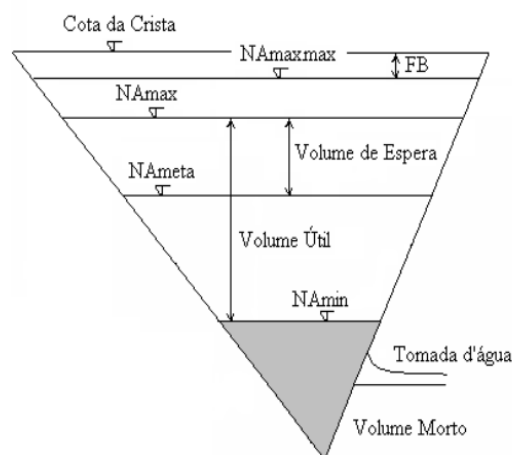
2.7.2 Reservatórios

A função do reservatório é acumular parte da água disponível em períodos chuvosos, exercendo a regularização das vazões naturais dos rios. Em geral, são formados por meio de barragens implantadas em cursos d'água, e suas características de armazenamento dependem sobretudo do caráter topográfico no qual está inserido o mesmo (Lopes & Santos, 2002). No geral, um reservatório pode

ser descrito por níveis e volumes característicos, elementos que serão enumerados a seguir e apresentados na figura 9:

- **Nível d'água mínimo operacional:** Corresponde à cota mínima necessária para operação do reservatório, no geral se encontra acima da estrutura de tomada d'água.
- **Nível d'água máximo operacional:** Corresponde à cota máxima permitida para operação adequada do reservatório, no geral define o limite superior do volume útil.
- **Nível d'água máximo maximorum:** Corresponde a sobrelevação máxima do nível d'água, também disponível para passagem de ondas de cheia.
- **Volume morto:** Corresponde em parcela inativa do volume do reservatório ou indisponível para captação de água.
- **Volume útil:** Corresponde ao volume aferido entre níveis d'água máximo e mínimo operacional, no qual consiste no volume efetivo para os limites do deplecionamento para operação do reservatório.
- **Volume de espera ou controle:** Corresponde em parcela do volume útil para controle das restrições de vazão de jusante, e amortecimento de ondas de cheia.
- **Crista do barramento:** Corresponde a partir de uma sobrelevação adicional do nível d'água maximorum, destinada a impedir que ondas ultrapassem a crista da barragem e, segurança adicional a eventuais galgamentos sobre a crista em condições especiais.

Figura 6: Níveis e volumes característicos em reservatório



Fonte: Lopes, 2002.

Em relação a capacidade de produção da energia existem dois métodos operativos:

- **Com acumulação:** Onde opera-se com deplecionamento e níveis d'água máximos e mínimos, e com estimativas de volume útil.
- **Sem acumulação ou fio d'água:** Onde o nível d'água permanece constante, ou seja, mínimo e máximo operacional são os mesmos.

Para determinar de forma quantitativa esses volumes, os métodos para dimensionamento podem ser classificados, ou quanto à forma e apresentação de dados e resultados, exemplificado abaixo:

- **Método estocástico:** Aquele que propicia cálculos de probabilidades gerais;
- **Método determinístico:** Aquele que se baseia e trata o resultado de forma única, por exemplo, baseando historicamente na característica topográfica do local de interesse.

Além de todas as funções operacionais apresentadas, o reservatório também funciona como bacias de contenção de sedimentos devido a diminuição da velocidade da água. Em consequência disso quando esses sedimentos alcançam a tomada d'água considera-se que o reservatório esgotou sua vida útil. Uma medida usual para se tratar o problema de assoreamento, é destinar uma parcela do volume do reservatório como depósito de sedimentos. A estimativa do depósito de sedimentos é realizada com base na taxa de aporte sólido e eficiência de retenção do reservatório (Lopes & Santos, 2002).

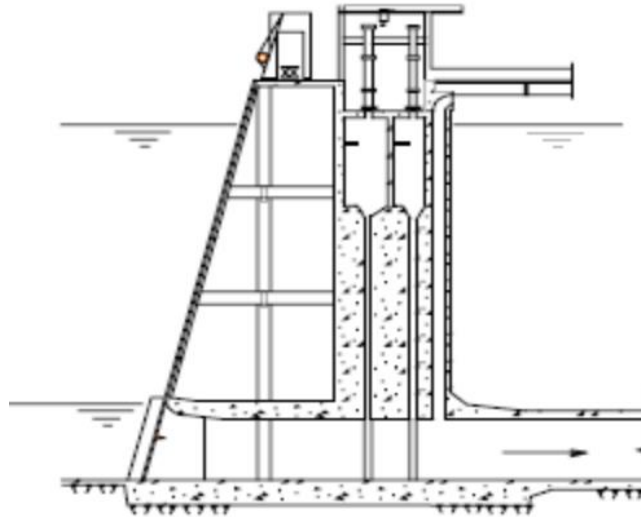
Outros parâmetros importantes para o projeto do reservatório, é determinar a quantidade de perdas por evaporação, estimadas para o período crítico de depleção do reservatório (ONS, 2000).

2.7.3 Sistemas de captação de água

Tem por função transportar a água do reservatório até as turbinas localizadas na casa de força (ELETROBRAS, 2020). A captação da água no reservatório é feita por meio da tomada d'água. A seguir faz-se a apresentação de alguns comuns de tomada d'água:

- **Torre:** Empregada em aproveitamentos onde se utiliza túnel ou galeria de desvio também para adução (figura 10).

Figura 7: Tomada d'água em torre



Fonte: ELETROBRAS, 2020.

- **Gravidade:** Com ou sem integração a barragem, utilizadas em aproveitamentos equipados com turbinas tipo Francis, Kaplan ou Pelton.
- **Gravidade Aliviada:** Apoiada em maciço rochoso, onde a adução é realizada por túneis, sejam eles forçados ou não.
- **Integrada a casa de força:** Estrutura recomendada para aproveitamentos que utiliza turbinas tipo Bulbo ou Kaplan.

No sistema de adução, ainda sob aspecto hidráulico, pode-se, se necessário a instalação, a utilização de uma chaminé de equilíbrio que tem por função garantir a estabilidade de pressão no conduto reduzindo as variações de pressão que se propagam ao longo de uma tubulação, além de garantir a segurança operacional caso haja parada brusca na central geradora (Oliveira B. , 2017).

Em alguns tipos de aproveitamentos existe uma câmara de carga que interliga o canal adutor ao conduto forçado e que atende os seguintes aspectos: i) garantir que não haja ar no conduto forçado e que tenha volume útil equivalente a vazão zero e a vazão máxima, e; ii) garantir a estabilidade funcional de todos os sistemas, geralmente com um extravasor lateral, quando necessário, para verter o volume adjacente devido a parada brusca na central geradora (Encina,2006), (Oliveira B. , 2017).

2.7.4 Vertedouro

Os vertedouros, ou extravasores, são estruturas que tem por finalidade principal descarregar as cheias para manutenção do nível d'água de um reservatório até atingir uma cota de volume desejável. Normalmente são adotadas vazões de projeto considerando um período de recorrência de 10.000 anos. A escolha do tipo vertedouro é ligada diretamente a concepção do arranjo, tipo de desvio e características geológicas do local, que normalmente determinam também a localização do mesmo (ELETROBRAS, 2020). Os tipos comumente utilizados em vertedouros e suas características são:

- **Vertedouro de superfície livre:** Aplicação típica em usinas a fio d'água, cuja barragem pode ter soleira vertente, que acarreta em sobrelevação no reservatório. Outros tipos de vertedouros de superfície livre, tais como tipo tulipa e sifão, são pouco utilizados e tem vazão de vertimento baixa.
- **Vertedouro de superfície livre/controlada e ogiva alta:** São estruturas compostas por uma soleira vertente, controlada ou não por comportas do tipo seguimento, e também um dissipador de energia, normalmente utilizados em aproveitamentos com barragens de altura média, e servem também como estruturas de desvio, com adufas em seu corpo.
- **Vertedouro de superfície livre/controlada com ogiva baixa:** É uma estrutura composta por uma soleira vertente baixa, controlada ou não por comportas tipo segmento e dissipador de energia. Normalmente utilizada em aproveitamentos com barragens baixas e também servem como estrutura de desvio do fluxo do rio.
- **Vertedouro de superfície livre/controlado de encosta:** Estrutura composta por soleira vertente, seguida de uma calha e dissipador de energia, podendo ser controlado ou não por comportas tipo segmento, em geral, são utilizadas em aproveitamentos de barragens altas de aterro fechando a totalidade da seção do vale e com desvio em túneis ou galerias, e também são colocadas numa das ombreiras ou eventualmente em sela, aproveitando ou não a existência de uma volta do rio.

2.7.5 Casa de força

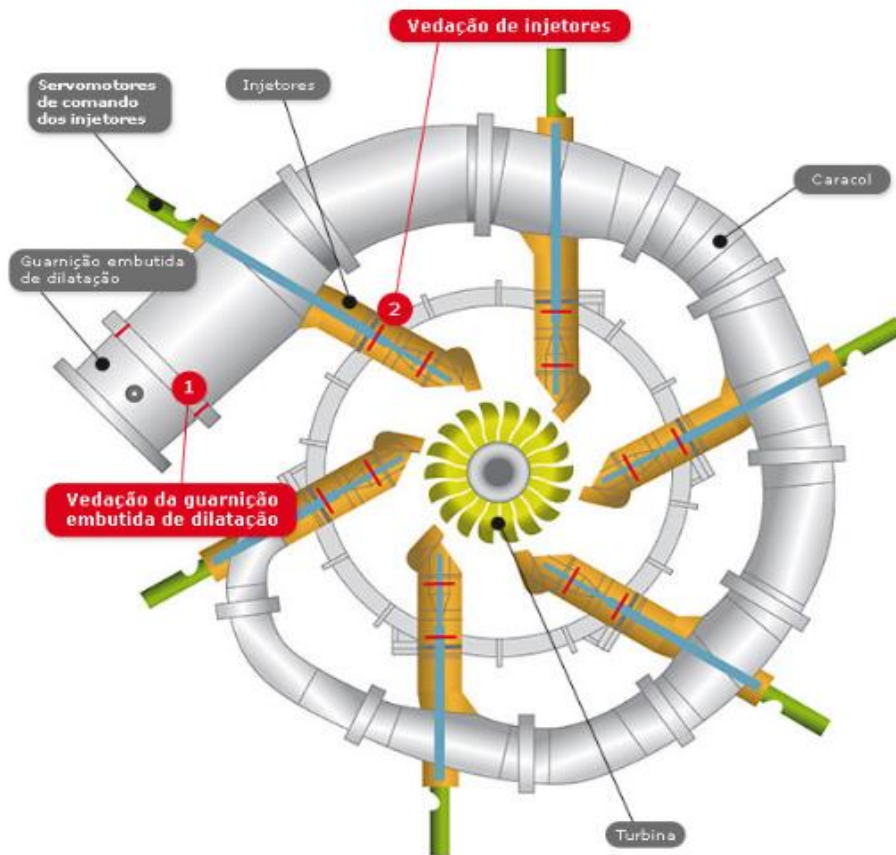
É nesta instalação que estão instaladas as turbinas hidráulicas. Durante o seu movimento giratório, ocorre a conversão de energia potencial em energia mecânica rotacional e posteriormente em energia elétrica por meio dos geradores que produzem a eletricidade (ANEEL, 2008). O rendimento dessa transformação é da ordem de 90 à 93% (Júnior, 2000), (Encina, 2006). Além de todos os parâmetros operacionais, o aproveitamento da casa de força também se classifica através da estrutura de arranjo ou superestrutura que pode ser do tipo subterrânea, externo e aberto, semi abrigada e abrigada (Oliveira B. , 2017) e (Eletrobras, 2020).

2.7.6 Turbinas Hidráulicas

As turbinas hidráulicas apresentam rendimentos máximos em grandes turbinas, em percentual, entre 88 e 96% (Encina, 2006). Os tipos de turbinas normalmente usadas em centrais hidrelétricas são: Turbinas Bulbo, Francis, Kaplan ou Pelton, Analisando as turbinas hidráulicas comumente usadas nos aproveitamentos temos:

- **Turbina Pelton:** É uma turbina de impulsão ou ação, que tem como característica principal ser impulsionada por jatos de água que transmitem energia cinética para as conchas (pás) transformando essa energia em trabalho mecânico. Podem desenvolver velocidades rotativas elevadas (até 1800 rpm). Esse tipo de turbina trabalha em altas quedas, normalmente entre 350 e 1100m. Também pode ser aplicada para micro geração com quedas menores que 20m. Pode ter sua instalação com eixo horizontal ou vertical. Alcança rendimentos superiores a 90% (Júnior, 2000). A turbina Pelton não sofre influência da elevação do nível do canal de fuga. Um problema típico desta turbina é que, devido à alta velocidade que a água incide sobre as conchas, é comum aparecer erosão por efeito abrasivo (ELETROBRAS, 2020). A figura 8 apresenta uma turbina Pelton de eixo vertical e seis jatos.

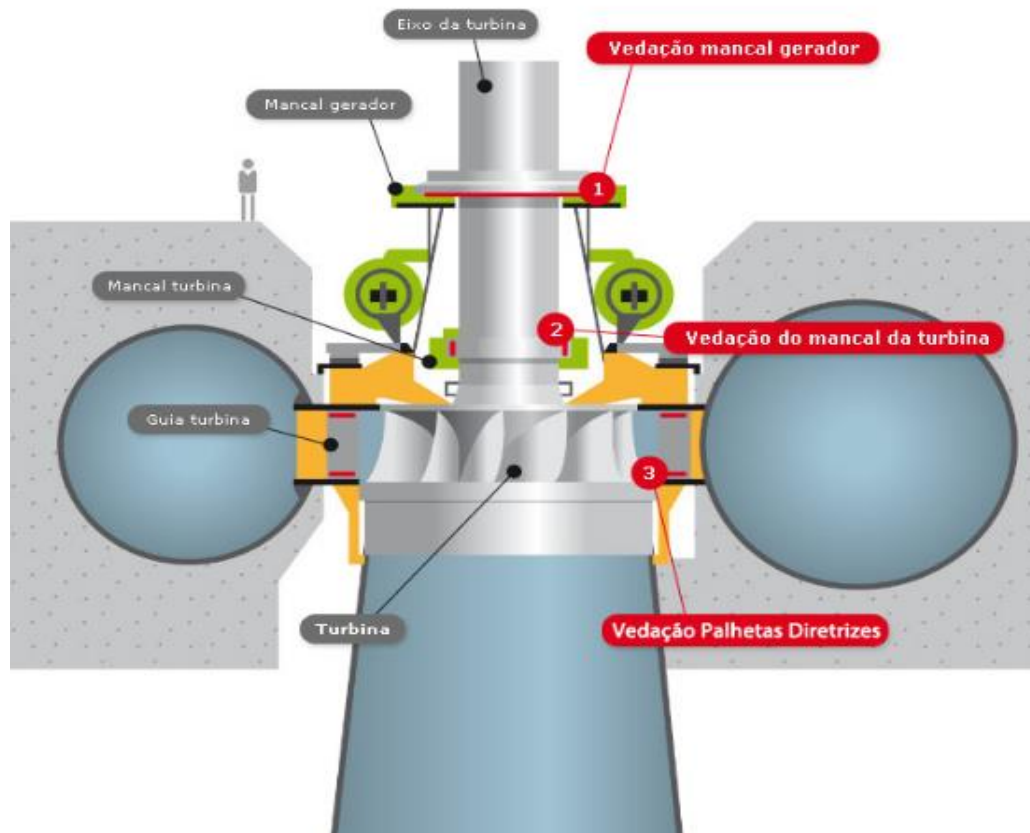
Figura 8: Turbina Pelton



Fonte: PXL Seals, 2020.

- Turbina Francis:** É uma turbina de reação, que recebe água sob pressão em direção radial e descarrega em direção axial, havendo transformação de energia cinética e potencial em trabalho. É caracterizada por ter um rotor formado por coroa de aletas fixas no qual se constituem em canais hidráulicos para direcionamento do fluxo de água. A entrada de água nessa turbina ocorre simultaneamente por comportas de admissão dispostas ao redor da roda (distribuidor), e o trabalho é exercido sobre todas aletas ao mesmo tempo para fazer a turbina se movimentar (Júnior, 2000). Normalmente as turbinas Francis são utilizadas em aproveitamentos com quedas de água entre 40 e 400m, e possuem uma grande adaptabilidade a diferentes condições técnicas e operacionais, também possuem um rendimento elevado, maiores velocidades e menores dimensões (ELETROBRAS, 2020). A figura 9 apresenta um corte de uma turbina Francis

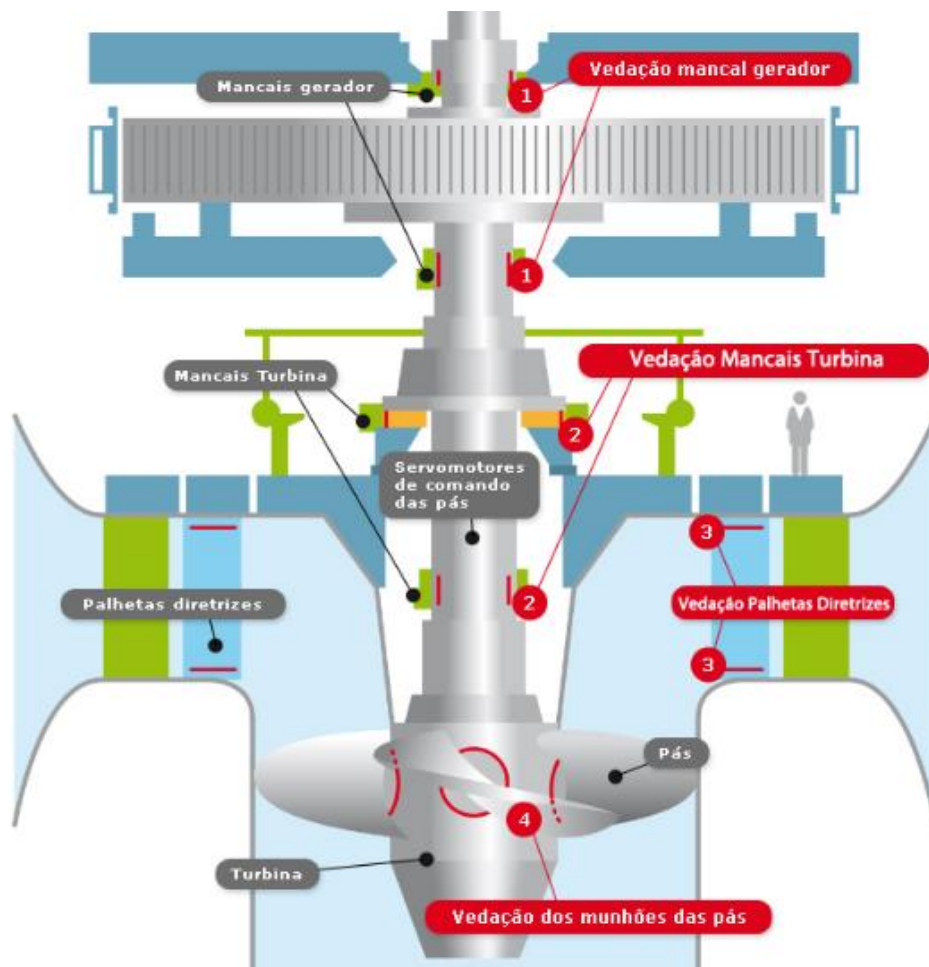
Figura 9: Seção interna da Turbina Francis



Fonte: PXL Seals, 2020.

- Turbina Kaplan:** É uma turbina de reação, adaptada a quedas baixas e caudais elevados, é constituído por uma câmara de entrada aberta ou fechada por distribuidor, e uma roda com pás em formato de hélice, assemelhando-se a um propulsor de navio, podendo ser com duas a seis pás móveis (ELETROBRAS, 2020) e (Júnior, 2000). Essa turbina é regulada através da ação desse distribuidor e com auxílio da variação do ângulo das pás do rotor, que garante uma grande variabilidade de aplicação e capacidade de regulação, operando comumente entre 70 e 350 rpm, além disso, em instalações de baixa queda, a casa de força é integrada as estruturas de tomada d'água, ou localizada em pequenas distâncias, facilitando a aplicabilidade desse tipo de turbina. A figura 10 apresenta uma turbina Kaplan de eixo vertical.

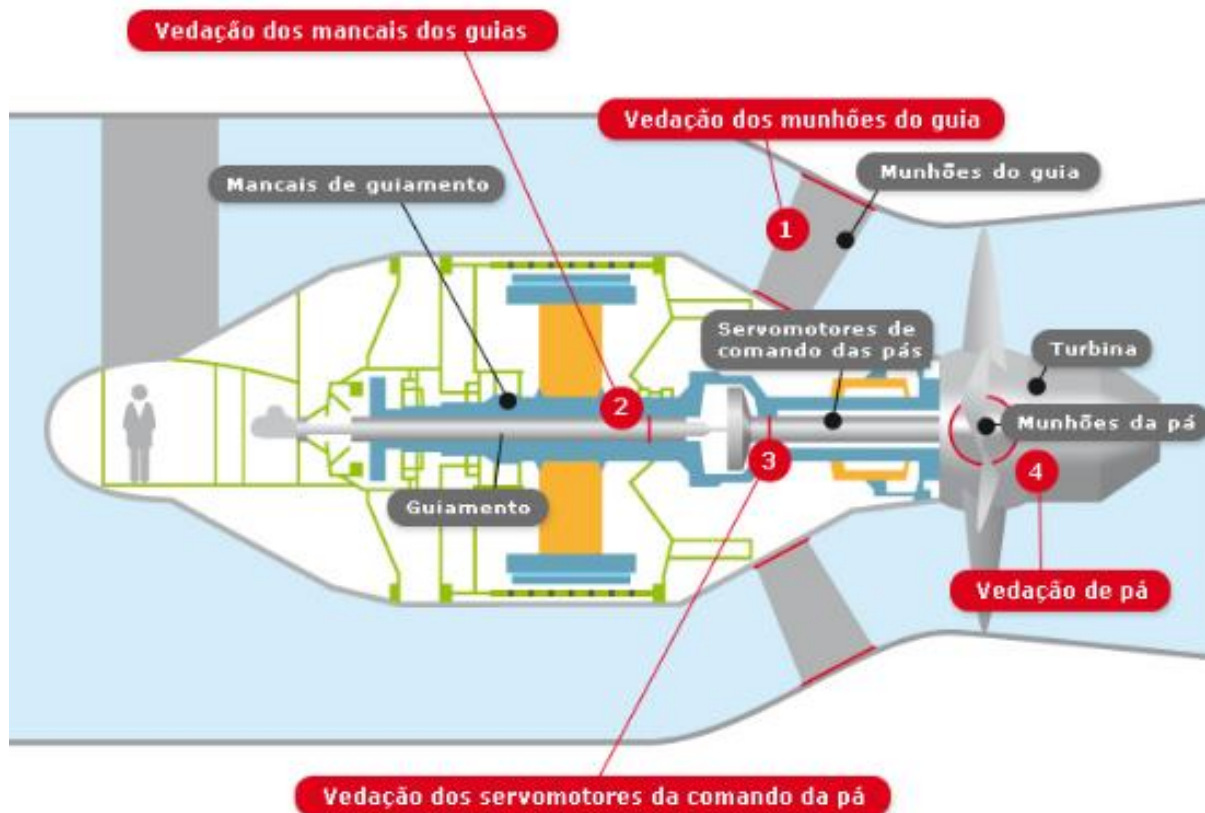
Figura 10: Corte esquemático da Turbina Kaplan



Fonte: PXL Seals, 2020.

- Turbina Bulbo:** É um tipo de turbina semelhante a turbina Kaplan (figura 14). Porém devido ao tipo de aplicação, o gerador hidráulico encontra-se em um Bulbo por onde a água flui ao seu redor antes de chegar as pás da turbina. (ELETROBRAS, 2020). Essas turbinas podem ser usadas para pequenas basicamente em aproveitamentos de baixa queda e quase sempre em centrais a fio d'água.

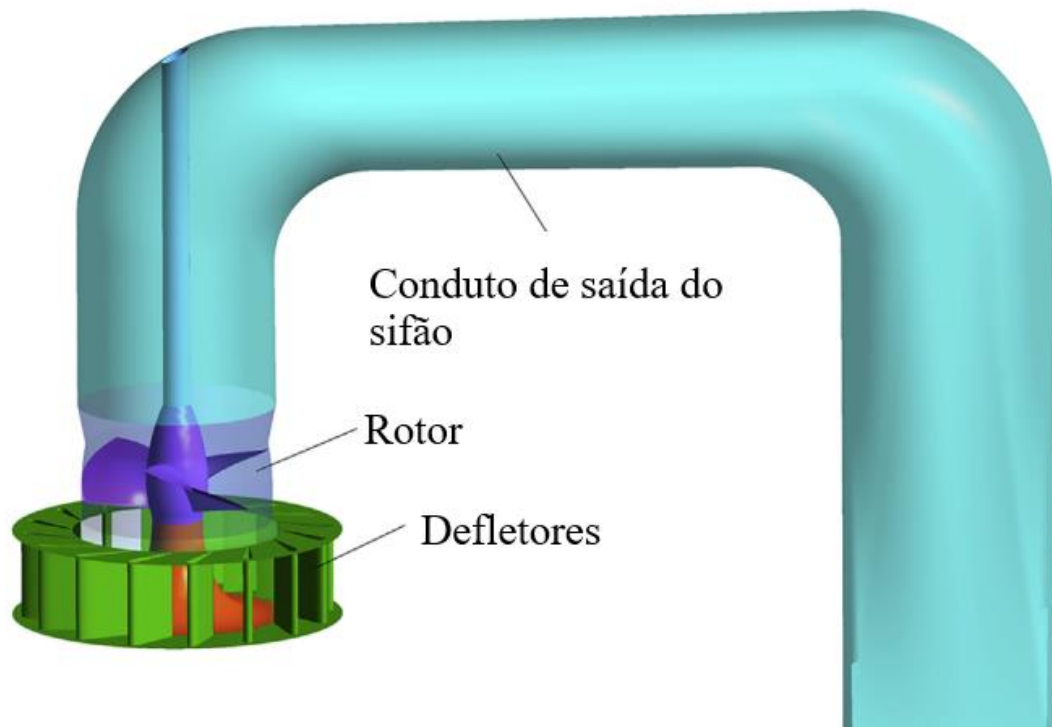
Figura 11: Turbina Bulbo



Fonte: PXL Seals, 2020.

- Turbina Sifão:** É uma turbina de concepção simples (figura 12). Normalmente é fabricada em chapas de aço calandradas e soldadas, ou mesmo parcialmente imersas em concreto. Pode ser instalada acima dos níveis de montante e jusante da água. Nesse caso a partida do grupo é realizada a partir de uma bomba de vácuo, criando um fluxo de água contínuo no interior do conduto. Para a parada completa, faz-se a admissão de ar no Sifão interrompendo o fluxo. Normalmente aplica-se em aproveitamentos inferiores a 5m de queda d'água, podendo-se reduzir custos com obras civis em até 15%, quando comparáveis com outros conjuntos eletromecânicos (Júnior, 2000), (ELETROBRAS, 2020).

Figura 12: Desenho esquemático de funcionamento da turbina Sifão



Fonte: Zhou, et al., 2019.

- **Turbina S:** É uma turbina axial, aplicada em projetos de pequenos aproveitamentos e apresenta caráter construtivo que facilita o acesso e a manutenção, além de ser de simples montagem, normalmente é empregada em quedas d'água de 5 à 20m (figura 13). Pode-se dimensionar esse tipo de equipamento de acordo com a necessidade da operação, dependendo somente das variações de altura de queda e vazão. Os principais componentes são: distribuidor móveis e rotor de pás móveis, distribuidor fixo e rotor de pás fixas, distribuidor móvel e rotor de pás fixas, e por último, distribuidor fixo e rotor de pás fixas (Júnior, 2000).

Uma outra característica a ser considerada na especificação de uma turbina é a rotação específica, que se configura o número de rotações por minuto de uma turbina, (ELETROBRÁS S.A., 1985).

Normalmente o critério para a escolha da turbina, considera a facilidade em instalação, operação e manutenção e o custo final da mesma. Assim o critério para escolha de uma turbina deve contemplar a melhor eficiência operativa (operação e

manutenção), e que tenha alto rendimento na conversão de energia (Polli & Reis, 2015). Há necessidade de as turbinas hidráulicas serem instaladas com uma altura de sucção adequada. A altura de sucção (equação 9) é medida sempre do nível de jusante até o eixo para turbinas de eixo horizontal e até a linha média do distribuidor para o eixo vertical, e altura máxima de sucção segue a equação (Souza, Santos, & Bortoni, 2018):

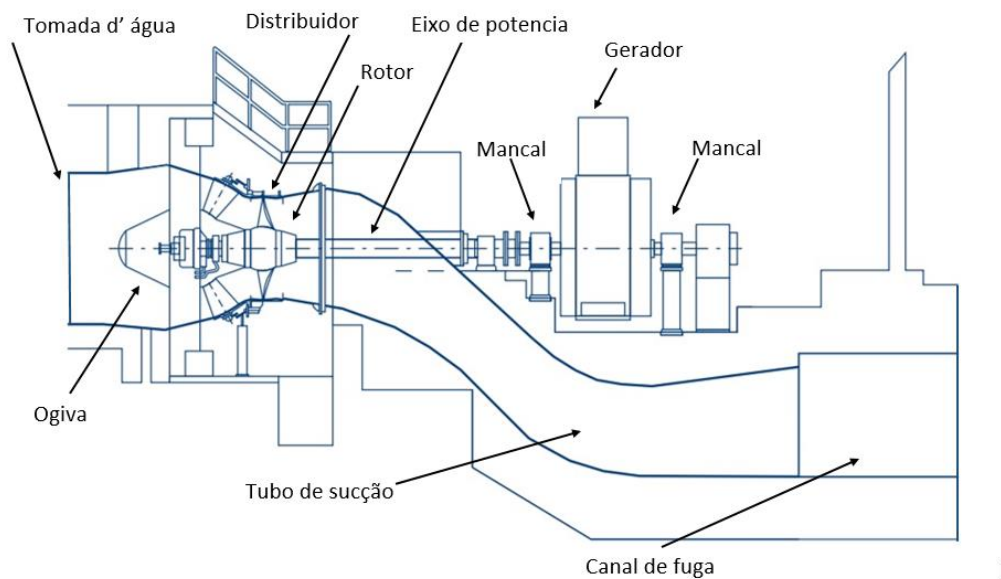
$$H_s = 10 - 0,00122z_b - \sigma H \quad (9)$$

Onde: z_b : Altitude de nível mínimo de jusante;

σ : Coeficiente de cavitação;

H : Altura de projeto de sucção.

Figura 13: Desenho esquemático do funcionamento da turbina S

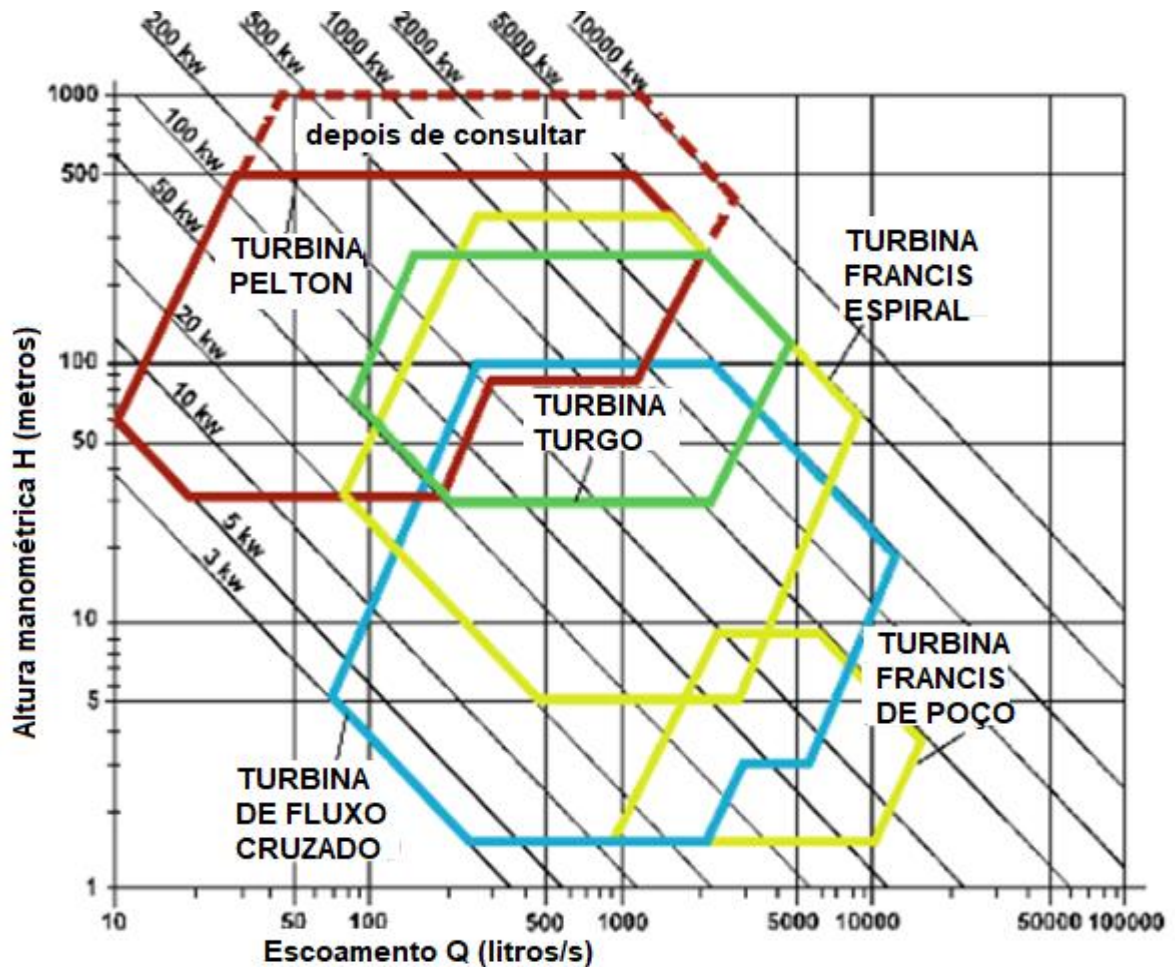


Fonte: Adaptado de Voith Hydro Holding GmbH & Co, KG, 2021.

A cavitação, é uma formação e subsequente colapso de um líquido em movimento, de bolhas ou cavidades preenchidas em grande parte por vapor, este fenômeno causa golpes concentrados repetitivos, causam desprendimento de material por fadiga, ocasionando pequenas crateras que se caracterizam a erosão por cavitação, que além dos efeitos destrutivos gerais, há decaimento de potência, redução de vida útil de toda a instalação (Henn, 2012) (Souza, Santos, & Bortoni, 2018).

Cada tipo de turbina é adequado para determinada faixa de vazão volumétrica e altura de queda, as turbinas são escolhidas para atender quedas. A figura 14 apresenta um ábaco de escolha para turbinas hidráulicas.

Figura 14: Ábaco de seleção de turbinas por queda e vazão



Fonte: Adaptado de Henn, 2012.

A turbina é escolhida para atender parâmetros operacionais diversos, estas dependentes de condições geográficas, topográficas, hidrográficas, entre outros, e correlacionando essas variáveis e analisando os gráficos pode-se obter a turbina ideal para o aproveitamento. Para operação, é comumente empregado, no mínimo, um par de turbinas (Fadigas, 2015).

Para cálculo da velocidade específica das turbinas pode-se usar a equação 10 a seguir:

$$n_s = \frac{n\sqrt{P_{mcv}}}{H_{TOP}^{\frac{4}{3}}\sqrt{H_{TOP}}} \quad (10)$$

Onde:

P_{mCV} : Potência mecânica em cavalo-vapor

n : Velocidade rotacional em RPM;

H_{Top} : Altura de queda em metros;

Pode-se observar que é possível construir turbinas para diversas velocidades, vazões e alturas de queda. Entretanto existem limitações práticas que restringem a sua aplicação e se empregam apenas aquelas que apresentam bons rendimentos operacionais. Alguns autores afirmam que o custo operacional da turbina e instalação diminui em função do aumento da altura de queda e da redução da velocidade específica, variando entre limites considerados, tal como (Fadigas, 2015) e (Eduardo, 2018):

- Velocidade específica elevada pode reduzir drasticamente as dimensões da turbina, contribuindo para o fenômeno de cavitação;
- Velocidades específicas elevadas para quedas também elevadas aumentam o custo de construção e instalação, que devem estar operando em equilíbrio;
- Velocidades reduzidas para quedas pequenas encarecem o custo de geração

Pode-se usar a tabela 2 para se ter uma orientação acerca das velocidades específicas recomendadas em função da altura disponível para o aproveitamento

Tabela 2: Velocidade específica das turbinas

Velocidade específica (RPM)	Tipo de turbina	Altura disponível do aproveitamento (m)
Até 18	Pelton – 1 injetor	Até 800
18 a 25	Pelton – 1 injetor	400 a 800
26 a 35	Pelton – 1 injetor	100 a 400
26 a 35	Pelton – 2 injetores	400 a 800
36 a 50	Pelton – 2 injetores	100 a 400
51 a 72	Pelton – 4 injetores	100 a 400
55 a 70	Francis lentíssima	200 a 400
70 a 120	Francis lenta	100 a 200
120 a 200	Francis média	50 a 100
200 a 300	Francis veloz	25 a 50
300 a 450	Francis ultraveloz	15 a 25
400 a 500	Hélice veloz	Até 15
270 a 500	Kaplan lenta	15 a 50
500 a 800	Kaplan veloz	5 a 5
800 a 1100	Kaplan velocíssima	Até 5

Fonte: Adaptado de Fadigas, 2015; adaptado de Eduardo, 2018.

2.7.7 Geradores

O dimensionamento do gerador, considera as características tais como: número de polos, potência, tensão, rendimento, sistemas de excitação e aterramento, e o controle de velocidade é realizado por um regulador de velocidade ou válvulas de cargas, que controlam a potência gerada pela turbina mesmo com variáveis de cargas solicitadas pelo sistema gerador (Balarim, 1996).

No geral, o gerador é dimensionado em função da potência disponível no eixo da turbina, através da equação 11 apresentada a seguir (ELETROBRAS, 2020):

$$P_G = P_T \frac{\eta_G}{\cos\phi} \quad (11)$$

Onde: P_G : Potência do gerador (kW);

P_T : Potência no eixo da turbina (kW);

η_G : rendimento do gerador;

$\cos\phi$: Fator de potência do gerador;

O fator de potência é definido em função de necessidades do sistema elétrico ao qual o gerador será conectado. O rendimento, caso não indicado pelo fabricante, considera-se (Gomes, 2010):

- 96% para geradores até 1MW;
- 97% para geradores até 10MW;
- 98% para geradores acima de 10MW.

2.7.8 Canal de fuga

É a estrutura que realiza a condução da água ao rio após a passagem pela turbina hidráulica, e tem a função de reduzir a energia cinética da água a valores que evitem a erosão da região de descarga (Souza, Santos, & Bortoni, 2018), (ELETROBRÁS S.A., 1985).

Existem casos em que é necessário instalar soleiras afogadoras na saída do tubo de sucção, com objetivo principal de elevar o nível d'água de restituição de forma a minimizar o efeito de cavitação (Polli, 2015). A restituição pode ser feita por:

- Canal aberto, quando a casa de força for externa;
- Túnel operando à superfície livre, em casas de força subterrâneas equipadas com turbinas Pelton, necessariamente ou Francis, opcionalmente.

- Túnel em carga, em casas de força subterrâneas equipadas com turbinas Francis.

2.8 Análise econômica: custos e receitas

A análise econômica pode ser simplificada resumida um conjunto de cálculos que agregam os custos do empreendimento e as receitas estimadas de operação. Essa análise visa quantificar um fluxo contínuo de investimentos (saídas) e de receitas (entradas) de um empreendimento hidrelétrico (Filho, 2003).

Os custos de uma UHE são obtidos por meio de contas e podem ser resumidos da seguinte forma:

- **Custo construtivo:** Referentes aos custos de construção das obras civis incluindo barragens, vertedores e demais estruturas;
- **Aquisição de terras:** Custo potencial de áreas alagadas e entornos e que são devidos a aquisição de terras, realocações, e/ou gastos decorrentes da construção do reservatório;
- **Geradores, turbinas e acessórios:** Valores relacionados a geradores e turbinas e demais componentes da UHE;
- **Custo de operação e manutenção:** Normalmente expresso através de uma equação que depende apenas da potência nominal da usina, p_m em MW, por $C_m(p_m)$, em 10^3 US\$, e calculado através da Equação 12:

-

$$C_m(P_m) = ap_m^{b+1} \quad (12)$$

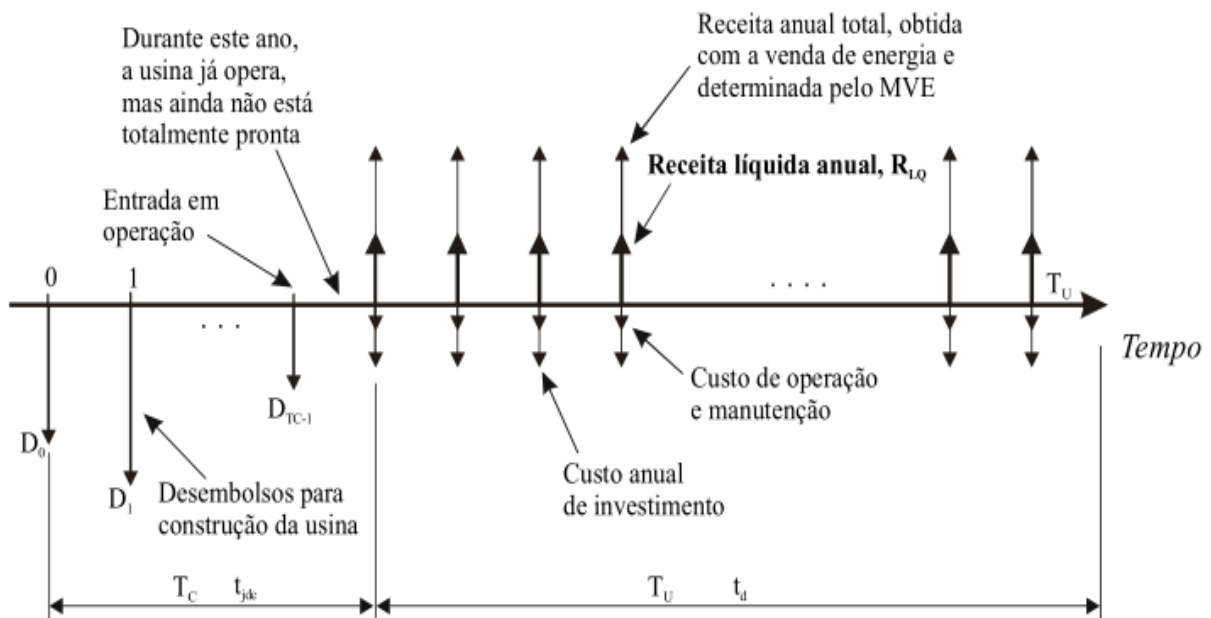
$$\begin{cases} a = 118,94 \text{ e } b = -0,6064, \text{ para } p_m \leq 146,71 \text{ MW} \\ a = 10,94 \text{ e } b = -0,1281, \text{ para } p_m \geq 146,71 \text{ MW} \end{cases}$$

- **Investimento, obras e vida útil da usina (I_T , T_C , T_U):** Indica o capital a ser investido, tempo de construção e obras concomitantes, e por último, o número de anos em que a usina opera, essencial para análise de benefícios econômicos;
- **Desembolsos e taxas (D_J , t_{jdc} , t_d):** Consiste em frações do investimento total a serem desembolsadas durante a construção do empreendimento, no qual se analisa taxas anuais de juros. Representa o custo de oportunidade, e

por fim, a taxa de desconto utilizada para recebimentos e custos futuros ao valor presente.

Todos os parâmetros são necessários para se constituir um fluxo de caixa, e neste tipo de empreendimento, serve para demonstração econômica que permite visualizar todos os custos e receitas ao longo do tempo, onde observa-se custos operativos, operação e manutenção e também receitas provenientes a venda de energia, para analisar a atratividade econômica do empreendimento, utiliza-se como referência a receita líquida anual ao longo de uma vida útil da usina, fracionado em várias partes, tal como apresentado na figura 15 (Filho, 2003).

Figura 15: Fluxo de caixa hipotético do investimento



Fonte: Adaptado de Filho, 2003.

Para analisar todos os parâmetros econômicos, deve-se considerar também os mecanismos de geração de receita, no geral, caracterizados como benefícios energéticos, uma vez simulados em estudo, já é possível parametrizar cálculos para realizar análise econômica de viabilidade e benefícios energéticos são transformados em benefícios econômicos (receitas) (Filho, 2003).

3 CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS E VAZÕES

A relação entre as usinas hidrelétricas e as questões ambientais são controversas e se constituem em um dos maiores entraves relacionados à expansão hidrelétrica (Luz, Amorin, Proença, & Pires, 2004). O setor elétrico tem como orientação que é necessário que as usinas sejam construídas com objetivo de minimizar os impactos socioambientais, ou seja, a usina além de produzir energia suficiente para o crescimento econômico ela deve causar um baixo impacto no meio ambiente (ANEEL, 2008). Para a identificação e avaliação dos impactos ambientais, o meio ambiente pode ser representado por um elemento denominado “componente-síntese” que abrange: Ecossistemas Aquáticos, Terrestres, Modos de Vida, Organização Territorial e Economia Local, entre outros (Pelissari, V. B.; Sarmiento, R.; Teeixeira, R. L., 2001) (ELETROBRAS, 2020).

3.1 Legislação Brasileira e Outorgas de Vazões

No Brasil, cada Estado adotava uma metodologia para determinação quantitativa e qualitativa de vazões ecológicas (Buenaga, 2019). O extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), antecessor da ANEEL, criou normativas excepcionais para determinar vazões mínimas para projetos de exploração de recursos hídricos. Estas consideravam e fixavam valores de acordo com séries históricas com extensões mínimas de 10 anos. Para casos de pequenos empreendimentos, a vazão fixada não poderia ser inferior a vazão mínima média mensal, que tem pressuposto calculado de acordo com observações anuais na localização de empreendimentos/objetos de estudo (DAEE, 2005) (Buenaga, 2019).

Em 1997, instituiu-se a Política Nacional de Recursos Hídricos e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, através da Lei nº 9433 que tem como parâmetro instrumentar a outorga de direitos de uso de recursos hídricos, assim como garantir o exercício de direitos de acesso a água no país (BRASIL, 2000).

Segundo (Santilli, 2007), no Brasil, a outorga é um pressuposto para garantia de qualidade e quantidade de água, para minimizar efeitos conflitantes do uso não controlado dos recursos hídricos e constitui-se como uma importante ferramenta para o gerenciamento dos recursos hídricos.

A Agência Nacional das Águas – ANA, enumera os critérios que serão levantados de acordo com as características dos recursos hídricos que serão

explorados, portanto, de acordo com (ANA, 2020) a outorga tem como objetivo assegurar o controle quantitativo e qualitativo de uso da água, bem como o efetivo exercício dos direitos de acesso aos recursos hídricos, abaixo, demonstra-se listadas os tipos de empreendimentos e utilização de recursos hídricos, que dependem dessas outorgas:

- Derivação, captação ou extração de água superficial ou subterrânea para qualquer finalidade;
- Lançamento em corpo de água de esgotos e demais resíduos líquidos para diluição;
- Intervenções de macrodrenagem;
- Uso dos recursos hídricos para aproveitamento hidrelétrico.

De acordo com (Benetti, Lanna, & Cobalchini, 2003) (Facuri, 2004) e (Gasques, Neves, Santos, Mauad, & Okawa P, 2018), a concessão da outorga com fundamentação sólida de disponibilidade hídrica é de suma importância. A análise qualitativa e quantitativa implica diretamente em relação a dependência de um ecossistema, além de que se deve manter a integridade da vazão outorgada para atender de forma sustentável todas as demandas recorrentes da necessidade de utilização dos recursos hídricos.

Analisando a nível federal, os Estados estabelecem seus critérios de outorga de direito de uso de água definindo de forma indireta, suas concepções de tratamento das vazões ecológicas. (Benetti, Lanna, & Cobalchini, 2003) (Collischonn, Agra, Freitas, & Priante, 2006). De acordo com (Vestena, Oliveira, Cunha, & Thomaz, 2012), basicamente, no Brasil, os critérios para definição de outorga de utilização de água são fundamentados em dados históricos privilegiando, na maioria das vezes, as metodologias hidrológicas. Entretanto, sabe-se que é possível determinar critérios de vazão ecológica utilizando mais de um método, trazendo uma utilização racional e mais correta em relação a disposição dos recursos hídricos de uma determinada região (Vestena, Oliveira, Cunha, & Thomaz, 2012).

3.1.1 Acre

No estado do Acre, o Instituto do Meio Ambiente do Acre – IMAC, estabelece os critérios para determinação da disponibilidade hídrica de cada corpo d'água, no geral, no âmbito de geração hidrelétrica, tem-se os seguintes critérios para outorga (IMAC, 2010):

- a) Balanço hídrico quantitativo na bacia hidrográfica onde se situa a captação;
- b) Cálculo da vazão de referência, a partir de estudos de regionalização disponíveis, contemplando a análise estatística de séries históricas de vazão do curso d'água em causa, quando estas existirem. Estes estudos, baseiam-se em características estatísticas, utilizando regressões, métodos simplificativos, hipóteses baseadas em séries históricas, entre outros.
- c) Vazão máxima outorgável do curso de água na seção de interesse.

Porém, o IMAC dispensa outorga em utilizações consideradas insignificantes. No âmbito de geração de energia, são dispensadas de análise os usos de água para geração de energia elétrica em Central de Geração Hidrelétrica (CGH), com potência instalada de até 1MW (um megawatt), porém o critério de utilização dos recursos hídricos na geração de energia, deverá ser cadastrado no sistema de Cadastro Estadual de Usuários de Recursos Hídricos – CEURH.

3.1.2 Alagoas

Em Alagoas, de acordo com o Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CERH, as outorgas são necessárias onde se entende que há potencial de interferência sobre os recursos hídricos gerais de forma a não manter a normalidade de um ecossistema como um todo. Nesse Estado para todos os potenciais de geração de energia são necessárias outorgas e/ou direito de uso de recursos hídricos. São solicitadas para outorga (SEMARH, 2001):

- a) Descarga regularizada anual com garantia de 90% (noventa por cento) da curva de permanência,
- b) A soma dos volumes d'água outorgados numa determinada bacia não poderá exceder a nove décimos da vazão regularizada anual, com noventa por cento de garantia.

3.1.3 Amapá

O Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CERH, pertencente a Secretaria Estadual do Meio Ambiente, de acordo com a regulamentação dos direitos de utilização dos recursos hídricos, respeitando a disponibilidade hídrica, o uso sustentável da água, e o cumprimento de todas as normas vigentes exige as seguintes particularidades para empreendimentos hidrelétricos (IMAP, 2017):

- a) Balanço hídrico local;
- b) Cálculo de vazões de referência, através de estudos de regionalização disponível, ou, através de avaliação de séries históricas, quando existirem;
- c) Vazão máxima necessária no curso de interesse;

No Estado do Amapá é necessário o cadastro de todo empreendimento gerador de energia. Entretanto o CERH não descreve diretamente uma vazão de referência padronizada, mas utiliza-se de múltiplas hipóteses, a serem avaliadas pelo referido Conselho para obter o melhor ponto de interferência do empreendimento, minimizando efeitos para com o ecossistema dependente.

3.1.4 Amazonas

Os critérios técnicos a serem utilizados e validados para concessão de outorgas e direitos de uso dos recursos hídricos são feitos através do Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas – IPAAM. De acordo com o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SERH, é necessário estabelecer as seguintes normatizações complementares e direcionadas para outorgas de vazões (IPAAM, 2016).

- a) A vazão adotada como referência para a outorga do direito de uso das águas superficiais é a vazão com garantia de permanência num certo período de tempo em que 95% (noventa e cinco por cento) do volume da mesma for igual ou superior à vazão solicitada, levando em consideração a bacia de contribuição no ponto de captação e os dados de referência estabelecidos pelas estações pluviométricas instaladas nas bacias.
- b) Nos casos de ausência de informações hidrológicas necessárias ao cálculo da vazão de referência adotada, será utilizado como vazão de referência a menor vazão medida no local, realizada preferencialmente no período de estiagem e com equipamentos de precisão, sendo que para a vazão medida fora do período de estiagem adotar-se-á um coeficiente de redução com base em séries históricas fluviométricas da bacia hidrográfica;
- c) A soma das vazões máximas outorgadas na bacia, limitada pela seção transversal, não poderá exceder a 75% (setenta e cinco por cento) da vazão de referência (Q95);

Para empreendimentos inferiores a 1MW de geração de energia, são utilizados critérios de outorga de obras hidráulicas, no qual considera-se de forma dinâmica as intervenções realizadas num determinado curso d'água, e traz critério de acordo com a particularidade do mesmo.

3.1.5 Bahia

De acordo com Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Bahia - INEMA, a outorga de recursos hídricos utilizados a geração de energia elétrica deve seguir as seguintes recomendações (INEMA, 2014):

- a) A soma das vazões máximas outorgadas na bacia, limitada pela seção transversal, não poderá exceder a 80% (oitenta por cento) da vazão de referência (Q90);
- b) E para usos individuais a soma das vazões não podem exceder a 20% (vinte por cento) da vazão de referência (Q90).

3.1.6 Ceará

O Conselho de Recursos Hídricos do Ceará – CONERH, condiciona a outorga de recursos hídricos de acordo com as premissas estabelecidas pela Secretaria de Recursos Hídricos – SRH, onde são incluídos os objetivos, princípios, diretrizes e principais planos de exigência de outorga, além dos planos, para critérios de utilização de águas superficiais, sendo para captação ou derivação para geração de energia. Assim tem-se que a soma das vazões máximas outorgadas na bacia, limitada pela seção transversal, não poderá exceder a 90% (oitenta por cento) da vazão de referência regional (Q90) (SRH, 1994).

3.1.7 Distrito Federal

No Distrito Federal, utiliza-se a regulamentação instituída pela Política de Recursos Hídricos, o qual tem por objetivo, assegurar a utilização disciplinar, controle quantitativo e qualitativo, além de assegurar a todos o direito de uso de água, e garantir a disponibilidade para utilização presente e futura.

Para geração de energia elétrica, utiliza-se o critério de outorga condicionado a obras hidráulicas, estas que são tratadas como capazes de alterar o regime natural das águas, e/ou, também as condições quantitativas e qualitativas da mesma, de acordo com a regulamentação, os critérios de vazão são adotados de formas que a

soma das vazões máximas outorgadas na bacia, limitada pela seção transversal, são dependentes da região, podendo ser adotada as metodologias de vazão de referência (Q7,10 ou Q90), e somadas as vazões, as mesmas não podem exceder a 80% (oitenta por cento) da vazão de referência adotadas (ADASA, 2001).

3.1.8 Espírito Santo

Os critérios de outorga no Espírito Santo, são atrelados ao Sistema Integrado de Gerenciamento e Monitoramento dos Recursos Hídricos – SIGMRH, estes em conformidade com a competência da Política Estadual de Recursos Hídricos do estado, tem por finalidade, estabelecer metodologias visando assegurar, de forma harmônica, todos os usos da água no estado. Nesse Estado adota-se que a soma das vazões máximas outorgadas na bacia, limitada pela seção transversal, são dependentes da região, adotada a vazão de referência igual ou menor a (Q7,10), e somadas as vazões, as mesmas não podem exceder a condição de seca do curso d'água adotado para o empreendimento (AGERH, 2005).

3.1.9 Goiás

Em Goiás a Secretaria de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos – SEMARH, exige que sejam respeitados parâmetros de vazões de referência de acordo com as informações existentes sobre determinado curso d'água do empreendimento. A vazão adotada como referência para a outorga do direito de uso das águas de domínio do Estado de Goiás é a vazão com garantia de permanência em 95% (noventa e cinco por cento) do tempo (Q95), considerando a bacia de contribuição no ponto de captação, onde esta informação estiver disponível, sendo que a soma das vazões outorgadas na bacia, limitada pela seção transversal em estudo, não poderá exceder a 70% (setenta por cento) da vazão de referência (Q95). Também admite a utilização de metodologias conservadoras com parâmetros iguais ou inferiores a 50% (cinquenta por cento) da vazão de referência (Q95) definida em curso d'água estudado para implantação do empreendimento. Nos casos que não existirem as informações hidrológicas necessárias ao cálculo da vazão de referência adotada, será utilizada como vazão de referência a menor vazão medida no local, realizada preferencialmente no período de estiagem e com equipamentos de precisão, sendo que para a vazão medida fora do período de estiagem adotar-se-á um coeficiente de

redução com base em séries históricas fluviométricas da bacia hidrográfica (SECIMA, 2005).

3.1.10 Maranhão

No Maranhão o Sistema Estadual de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos - SEGIRH, é o órgão Gestor do Meio Ambiente e Recursos Naturais. Ele emite outorgas preventivas de uso de recursos hídricos com a finalidade de declarar a disponibilidade de água para os usos requeridos, observando os usos múltiplos, o enquadramento dos corpos de água e a manutenção de condições adequadas ao transporte aquaviário, quando for o caso. Para gerações hidrelétricas, considera-se que até que se estabeleçam as diversas vazões de referência na Bacia Hidrográfica, se adote, como vazão de referência para os processos de outorga, o valor residual mínimo do fluxo, no corpo hídrico, a ser mantido a jusante das derivações o valor de 80% da Q90 (vazão associada à permanência de 90% no tempo) (SEMA, 2011).

3.1.11 Mato Grosso

A Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SEMA regulamenta o regime de outorgas e estabelece critérios para outorga superficial de rios do domínio no Estado de Mato Grosso. Para autorização do uso potencial da energia hidráulica necessita-se de outorga prévia, e para empreendimentos com geração inferior a 1MW, usando-se a metodologia de vazões médias de longo termo (QMLT). Estas são consideradas num tempo de recorrência indicado de acordo com as características da bacia, e na ausência de informações, as vazões somadas, considera-se o potencial vazão de referência de 95% (noventa e cinco por cento), e as derivações são determinadas pelo Conselho da SEMA, mas no total as somas não deverão exceder ao (Q95) (SEMA, 2007).

3.1.12 Mato Grosso do Sul

No Mato Grosso do Sul, a outorga de água é regida pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Mato Grosso do Sul – CERH, e suas entidades vinculadas. Estas têm por finalidade definir critérios de outorga, captações, acumulações, derivações e lançamentos considerados insignificantes para os corpos de água superficiais de domínio do Estado do Mato Grosso do Sul. Para a análise de disponibilidade hídrica dos corpos hídricos superficiais adota como vazão de

referência, a Q95 (vazão com permanência de 95% do tempo). Particularmente, tem-se (IMASUL, 2014):

- a) A vazão máxima outorgável para usos consuntivos será de 70% (setenta por cento) da vazão de referência (Q95), para um trecho do corpo hídrico considerado;
- b) Fica estabelecido o limite máximo individual de 20% (vinte por cento) da vazão de referência Q95;

3.1.13 Minas Gerais

A formulação de parâmetros relacionados a bacias hidrográficas, em Minas Gerais, fica a cargo do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SERGH, onde integram os órgãos e entidades com propriedades em gerenciamento dos recursos hídricos do estado, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, é órgão gestor das outorgas relacionadas aos direitos de uso em empreendimentos hidrelétricos. E para análise superficial dos recursos hídricos, Minas Gerais adota o critério de vazão de referência no qual considera a vazão mínima de 7 dias de duração e 10 anos em tempo de recorrência (Q7,10) onde considera-se (IGAM, 2001):

- a) A vazão máxima outorgável para usos consuntivos será de 30% (trinta por cento) da vazão de referência (Q7,10), para o curso de água a fio d'água considerado;
- b) Fica estabelecido o limite máximo de 70% (setenta por cento) da vazão de referência (Q7,10), quando se utiliza captações com reservatórios;

3.1.14 Pará

No Pará, o Conselho Estadual de Recursos Hídricos - CERH, gerencia a outorga para aproveitamento de potenciais hidrelétricos, e autoriza o empreendedor a utilizar recursos hídricos para fins de geração de energia. Este utiliza o padrão de vazão de referência para análise de disponibilidade hídrica superficial dos pedidos de outorga com vazão de 95% (noventa e cinco por cento) de permanência. Também exige as seguintes características na outorga de vazão (CERH, 2010):

- a) O somatório das vazões de captação, outorgadas e independentes de outorga devidamente cadastradas, ficará limitado a 70% (setenta por cento) da vazão de referência e será aplicado em corpos hídricos perenes e perenizados e a reservatórios implantados em corpos hídricos perenes e intermitentes;

- b) O somatório das vazões indisponíveis, outorgadas e independentes de outorga devidamente cadastradas, ficará limitado a 30% (trinta por cento) da vazão de referência e será aplicado em corpos hídricos perenes e perenizados;
- c) O limite máximo individual padrão de captação a ser outorgado é de até 20% (vinte por cento) da vazão de referência;
- d) O limite máximo individual padrão de captação a ser outorgado em reservatórios com regularização de vazão é de até 100% (cem por cento) da vazão regularizada com noventa e cinco por cento de garantia (Qreg95), desde que 70% da Q95 sejam garantidos no leito do rio a jusante do barramento, como descarga de fundo ou qualquer outro dispositivo.
- e) O limite máximo individual padrão de vazão indisponível é de 10% (dez por cento) da vazão de referência, calculado para cada parâmetro de qualidade outorgável;

3.1.15 Paraíba

De acordo com Agência de Águas, Irrigação e Saneamento do Estado da Paraíba – AAGISA, dependerá de prévia outorga da Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e Minerais, o uso de águas dominiais do Estado da Paraíba, que envolva a derivação ou captação de parcela de recursos hídricos existentes em um corpo d'água, para consumo final ou para insumo de processo produtivo de geração de energia, e a vazão de referência é considerada a de permanência de 90% (noventa por cento), Q90. De acordo com a resolução vigente, para outorga, tem-se que respeitar as características descritas a seguir (AESAs, 1997):

- a) A soma dos volumes de água outorgados numa determinada bacia não poderá exceder 9/10 (nove décimos) da vazão regularizada anual com 90% (noventa por cento) de garantia;
- b) Tratando-se de lagos territoriais ou de lagoas, o limite previsto no artigo será reduzido em 1/3 (um terço).

3.1.16 Paraná

A Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMA / Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CERH, detêm as competências relacionadas ao regime de outorga de direitos de uso. Estas têm por finalidade assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e disciplinar o

exercício dos direitos de acesso à água (AGUASPARANÁ, 2001) . Considera outorgáveis os usos de recursos hídricos para aproveitamento de potenciais hidrelétricos, com vazões regulamentadas descritas abaixo:

- a) Vazões correspondentes à energia assegurada;
- b) Vazão de engolimento máximo;
- c) Vazões de garantia a jusante,
- d) Vazões de projeto

No Paraná para se obter uma outorga é necessário fazer estudos de vazão distintos, onde as disponibilidades hídricas deverão estar associadas a uma probabilidade de garantia do suprimento hídrico, calculada por meio de estudos hidrológicos. É necessário o cálculo de balanço hídrico quando, por qualquer motivo não estejam registrados nos cadastros de usos de água do poder outorgante.

3.1.17 Pernambuco

De acordo com a Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, a vazão adotada como referência para a outorga do direito de uso das águas de domínio do Estado de Pernambuco é a vazão com garantia de permanência em 90% (noventa e cinco por cento) do tempo (Q90), considerando a bacia de contribuição no ponto de captação, onde esta informação estiver disponível. Deve-se levar em consideração que a soma das vazões outorgadas na bacia, limitada pela seção transversal em estudo, não poderá exceder a 90% (noventa por cento) da vazão de referência (Q90), definida em curso d'água estudado para implantação do empreendimento (APAC, 1998).

3.1.18 Piauí

O Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Piauí – CERH, estabelece critérios e procedimentos provisórios para emissão de outorga preventiva e de outorga de direito de uso de recursos hídricos, até a implantação de todo o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos, porém, de modo geral; a geração de energia através da conversão de energia hidráulica devem considerar que as vazões de referências a serem utilizadas, para cálculo das disponibilidades hídricas, e em cada local de interesse, deverão estar de acordo com os Planos de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas (SEMAR, 2004).

- a) Até que as vazões de referências sejam estabelecidas com maior precisão nos Estudos de Disponibilidade e de Demanda de água, nos Planos de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas, deverão ser adotadas como vazões de referência: para rios perenes ou perenizados, Q95 (vazão média mensal com 95% de garantia); e para reservatórios, Q90 (vazão regularizada com 90% de garantia).
- b) Nas outorgas de direito de uso para as derivações ou captações em corpo hídrico superficial deverá ser prevista uma vazão ambiental para jusante equivalente ao mínimo de 20% (vinte por cento) da vazão de referência, ou seja, deverão ser outorgados no máximo 80% (oitenta por cento) da Q95 para rios perenes ou perenizados, e no máximo 80% (oitenta por cento) da Q90 para reservatórios.

3.1.19 Rio de Janeiro

De acordo com a Superintendência Estadual de Rios e Lagoas - SERLA, a outorga de direito de uso dos recursos hídricos será conferida em conformidade com os respectivos Planos de Bacia, quando existentes, e estará condicionada à disponibilidade hídrica e ao regime de racionamento. Para fins de cálculo de disponibilidade hídrica será utilizada a vazão de referência (Q7,10), definida como a vazão mínima de 7 dias de duração e 10 anos de tempo de retorno, sendo a vazão ambiental mínima a ser mantida no corpo hídrico definida como 50% (cinquenta por cento) da Q7,10 (INEA, 2007).

3.1.20 Rio Grande do Sul

As águas de domínio do Estado do Rio Grande do Sul, superficiais e subterrâneas, somente poderão ser de uso após outorga, pelo Departamento de Recursos Hídricos da Secretaria das Obras Públicas, Saneamento e Habitação – DRH, e pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental – FEPAM, mediante estudos, licença de uso e autorização caso não haja definição de condições de vazão. Para geração hidrelétrica o DRH estabelece a vazão de referência para fins de outorga a Q90 (vazão média mensal com 90% de garantia). Os órgãos de Estado consideram que a vazão máxima outorgável é de 70% (setenta por cento) da Q90, devendo permanecer na bacia como vazão remanescente 30% (trinta por cento) da Q90,

abrangendo a vazão necessária para manutenção dos ecossistemas aquáticos (FEPAM, 1996).

3.1.21 Rio Grande do Norte

O Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte – IGARN, determina as características de outorga para utilização de recursos hídricos e considera a vazão de referência a fins de outorga a partir da vazão de permanência Q90 (vazão regularizada com 90% de garantia). Para geração de energia elétrica considera-se outorgáveis entre 80% (oitenta por cento) e 95% (noventa e cinco por cento) da Q90 (IGARN, 1997).

3.1.22 Rondônia

Em Rondônia, as outorgas e direitos de uso sobre recursos hídricos são expedidos pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental – SEDAM, e tem como premissa considerar os impactos causados pelas interferências conforme utilização dos recursos hídricos, considerando para cálculo de disponibilidade hídrica a vazão de referência (Q7,10), definida como a vazão mínima de 7 dias de duração e 10 anos de tempo de retorno, sendo a vazão ambiental mínima a ser mantida no corpo hídrico definida como 30% (trinta por cento) da Q7,10 (SEDAM, 2004).

3.1.23 Roraima

Em Roraima a vazão de referência para fins de concessão de outorga de direito de uso de água superficial deverá ser a Q7,10 (Vazão mínima de 7 dias com taxa de recorrência de 10 anos), ou Q90 (Vazão com permanência mínima de 90%) ou QL (Vazão ambiental de longo termo) e na falta de qualquer uma das vazões citadas, a Fundação Estadual de Meio Ambiente, Ciência e Tecnologia – FEMARH, poderá adotar os seguintes procedimentos para análise e emissão das respectivas outorgas (FEMARH, 2007):

- a) vazões instantâneas medidas pelo usuário pelo menos nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril que corresponde ao período seco do Estado.
- b) apresentação por parte do requerente de declaração de aceite dos usuários a jusante do ponto de captação ou que não existiu conflito pelo uso de águas superficiais no curso d'água nos últimos cinco anos;

3.1.24 Santa Catarina

Nesse Estado o Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CERH, é o órgão encarregado de estabelecer as diretrizes da política de recursos hídricos com vistas ao planejamento das atividades de aproveitamento e controle dos recursos hídricos, juntamente com a Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável – SDS, para emissão de outorga, utiliza a vazão de referência: Q98 (vazão igualada ou superada em 98% do tempo) determinada a partir das vazões médias mensais, onde a vazão outorgável: 50% (cinquenta por cento) da vazão de referência (Q98), subtraídos 10% (dez por cento) da vazão incremental no trecho, a título de reserva técnica. E considera-se que nas regiões críticas de disponibilidade não haverá reserva técnica disponível (SDS, 2006).

3.1.25 São Paulo

De acordo com o Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE, a implantação de qualquer empreendimento que demande utilização de recursos hídricos. A vazão de referência para fins de concessão de outorga de direito de uso de água superficial deverá ser a Q7,10 definida como a vazão mínima de 7 dias de duração e 10 anos de tempo de retorno, sendo a vazão máxima outorgável 50% (cinquenta por cento) da Q7,10, e limitada a 20% (vinte por cento) da utilização individual (DAEE, 1996).

3.1.26 Sergipe

Em Sergipe, os critérios de outorga são realizados pela Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia – SEPLANTEC, em articulação com a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Cabe à SEPLANTEC, juntamente com a Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMARH, decidir sobre a viabilidade da outorga solicitada, avaliando o impacto da inserção do aproveitamento hidrelétrico na bacia hidrográfica, tendo em vista a disponibilidade hídrica e a eventual mudança de regime fluvial e seus possíveis efeitos nos demais usuários e usos da bacia hidrográfica. O nível de garantia do volume de águas superficiais outorgado para cada usuário deve ser de, no mínimo, 85% (oitenta e cinco por cento) Q85, e, no máximo, 95% (noventa e cinco por cento) Q95, exceto quando o plano diretor da bacia hidrográfica adotar outros valores para o corpo hídrico, ou

quando o poder público outorgante, motivadamente, assim o decidir. Limitado a 30% (trinta por cento) por utilização individual (SEMARH, 1999).

3.1.27 Tocantins

A outorga de direito de uso dos recursos hídricos cabe ao Instituto Natureza do Tocantins – NATURATINS e é condicionada à disponibilidade hídrica e às prioridades expressas no Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH e nos Planos de Bacias Hidrográficas – PBHs.

No Tocantins, a vazão de referência para outorga segue as seguintes premissas:

I – Quando não houver barramento será calculada com base nas informações hidrológicas da bacia hidrográfica, para uma vazão de até 90% (noventa por cento) de permanência (Q90), com valores diários, enquanto não for aprovado pelo Plano de Bacia, ou este não apresentar definições sobre a vazão de referência para outorga;

II – Quando houver barramento será calculada por meio de balanço hídrico do reservatório, com uma garantia de 90% (noventa por cento) de atendimento das demandas definidas mensalmente, enquanto não for aprovado o Plano de Bacia e este não apresentar definições de valores diferentes desta proposição.

Os somatórios das vazões a serem outorgadas deverão seguir os seguintes limites para captação:

- a) a fio d'água, até 75% (setenta e cinco por cento) da vazão de referência do manancial;
- b) para captação em reservatório de barragem de regularização, até 90% (noventa por cento) da vazão de referência do manancial.

Nos casos de mananciais intermitentes, os limites poderão chegar a até 95% (noventa e cinco) dos valores de referência, definidos para cada mês em que haja escoamento nos rios. Havendo barramento, a vazão de descarga mínima a ser mantida escoando para jusante, por descarga de fundo ou por qualquer outro dispositivo que não inclua bombas de recalque, será de 25% (vinte e cinco%) da vazão de referência para captação a fio d'água. § 3o Nenhum usuário, individualmente, receberá autorização acima de 25% (vinte e cinco %) da vazão de referência, de um dado manancial, quando a captação for a fio d'água.

E em casos especiais, não havendo o respectivo Plano de Bacia aprovado, poderão ser fixados valores diferentes de vazões de referência para outorga, mediante

Portaria do NATURATINS, desde que solicitado pelo Comitê de Bacia e aprovado pelo Conselho Estadual De Recursos Hídricos - CERH (NATURATINS, 2005).

Abaixo, apresenta-se, de forma sucinta, as diversas legislações vigentes para outorga de utilização de água vazões máximas outorgáveis regulamentadas nos Estados:

Tabela 3: Legislações para outorga de água nos estados

Estado da Federação	Exigência para outorga
Acre – IMAC	a) Balanço hídrico b) Cálculo de vazão de referência utilizando séries históricas. c) Vazão máxima outorgável no curso de interesse
Alagoas – SEMARH	a) Descarga regularizada anual com garantia de 90% b) Soma dos volumes de água outorgados de uma bacia não poderá exceder nove décimos da vazão regularizada anual
Amapá – IMAP	a) Balanço hídrico local b) Cálculo de vazões de referência c) Vazão máxima necessária no curso de interesse
Amazonas – IPAAM	a) Vazão garantida de 95% por volume quando igual ou superior a vazão solicitada b) Quando há ausência de informações, adota-se menor vazão medida local em período de estiagem, sendo fora da estiagem adota-se coeficiente de redução c) Soma das vazões máximas não poderá exceder 75% da vazão de referência de 95% de garantia.
Bahia – INEMA	a) Soma das vazões máximas não poderá exceder 80% da vazão de referência de 90% de garantia b) Usos individuais não podem exceder 20% da vazão de referência de 90% de garantia.
Distrito Federal – ADASA	a) Dependendo da região adota-se Q7,10 ou Q90, e somadas vazões não podem exceder vazões com 80% de garantia.
Espírito Santo – AGERH	a) Vazão de referência menor ou igual a Q7,10 e não podem exceder vazão de período de seca do curso d'água.
Goiás – SECIMA	a) Soma das vazões não poderá exceder 70% da vazão de referência de 90% de garantia, admite-se metodologias conservadoras de 50% da vazão de referência.
Maranhão – SEMA	a) Vazão a jusante das derivações não poderá exceder 80% da vazão de referência de 90% de garantia.
Mato Grosso – SEMA	a) Soma das vazões máximas não poderá exceder a vazão de referência de 95% de garantia
Mato grosso do Sul – IMASUL	a) Vazão máxima outorgável será de 70% da vazão de referência com 95% de garantia b) Usos individuais não podem exceder 20% da vazão de referência de 95% de garantia.
Minas Gerais – IGAM	a) Vazão máxima de 30% da vazão de referência Q7,10 para curso d'água considerado b) Limite máximo de 70% da Q7,10 de referência quando se utiliza reservatórios
Pará – CERH	a) Somatório de vazões fica limitado a 70% da vazão de referência com 95% de garantia; b) O somatório de vazões indisponíveis fica limitado a 30% da vazão de referência com 95% de garantia

	<p>c) Limite máximo para captação com reservatórios é de 100% da vazão regularizada com 95% de garantia, desde que 70% sejam garantidos a jusante</p> <p>d) Limite máximo de captação individual é 20% da vazão de referência com 95% de garantia;</p> <p>e) Limite máximo de vazão indisponível é de 10% da vazão com 95% de garantia;</p>
Paraíba – AESA (AAGISA)	<p>a) A soma dos volumes não poderá exceder 9/10 da vazão regularizada anual com 90% de garantia;</p> <p>b) Em lagos ou lagoas, o limite reduz-se em 1/3.</p>
Paraná - AGUASPARANÁ	<p>a) Vazões correspondentes à energia assegurada;</p> <p>b) Vazão de engolimento máximo;</p> <p>c) Vazões de garantia a jusante;</p> <p>d) Vazões de projeto.</p>
Pernambuco – APAC	<p>a) Vazão outorgável não poderá exceder 90% da vazão de referência com 90% de garantia;</p>
Piauí – SEMAR	<p>a) Vazão para rios com vazão média mensal com 95% de garantia, e reservatórios com 90% de garantia;</p> <p>b) Para derivações e captações superficiais é previsto vazão ecológica de 20% da vazão de referência</p> <p>c) Outorga máxima de 80% da vazão com 95% de garantia para rios, e 80% da vazão com 90% de garantia para reservatórios;</p>
Rio de Janeiro – SERLA	<p>a) Vazão ambiental mínima de 50% da Q7,10 do curso d'água selecionado.</p>
Rio Grande do Sul – FEPAM	<p>a) Vazão máxima outorgável de 70% da vazão de referência com 90% de garantia;</p>
Rio Grande do Norte – IGARN	<p>a) Vazão outorgável entre 80 e 95% da vazão de referência com 90% de garantia;</p>
Rondônia – SEDAM	<p>a) Vazão outorgável de 70% da Q7,10 do curso d'água escolhido</p>
Roraima – FEMARH	<p>a) Vazões medidas em meses do período seco do estado;</p> <p>b) Estudo com aceite de usuários a jusante do ponto de captação ou que não existiu conflito de uso;</p> <p>c) Pode-se usar vazão Q7,10, Q90 ou QL como vazão de referência.</p>
Santa Catarina – SDS	<p>a) Vazão outorgável de 50% da vazão de referência com 98% de garantia;</p> <p>b) Considera reserva técnica de 10% da vazão de referência com 98% de garantia;</p>
São Paulo – DAEE	<p>a) Vazão máxima outorgável de 50% da Q7,10 do curso d'água escolhido, limitado a 20% da Q7,10 para usos individuais.</p>
Sergipe – SEMARH (SEPLANTEC)	<p>a) Vazão máxima outorgável entre 85% e 95% de garantia;</p> <p>b) Usos individuais limitados a 30% da vazão de referência adotada.</p>
Tocantins – NATURATINS	<p>a) Vazão máxima outorgável a fio d'água de 75% da vazão de referência com 90% de garantia;</p> <p>b) Vazão máxima outorgável com reservatório de até 90% da vazão de referência com 90% de garantia;</p> <p>c) Limitação individual em 25% da vazão de referência com 90% de garantia;</p>

Fonte: Próprio autor, 2021.

3.2 Estudo das Vazões: Vazões Naturais e Vazões Ecológicas

Para se chegar aos valores das vazões necessárias ao projeto de uma UHE deve-se inicialmente obter dados básicos referentes à queda bruta do aproveitamento, vazões naturais do curso d'água, vazões mínimas operacionais (ELETROBRAS,

2000). As metodologias para determinação das vazões de projeto são conhecidas e tem caráter determinístico. Já as vazões ambientais são aquelas necessárias para manter a vida natural de um rio mesmo impactadas pelas intervenções realizadas pelo homem. As vazões que passam por uma UHE são variáveis ao longo do tempo, ou seja, há necessidade de contemplar em estudos da vazão o regime de vazões mínimas devido a períodos de seca (Longhi & Formiga, 2011).

Os estudos já realizados mostram que um valor único de vazão mínima não é suficiente para manter as condições naturais pré-existentes e que as variabilidades naturais dos sistemas hídricos são muito importantes para o desenvolvimento das comunidades aquáticas (Poff, et al., 1997) (Richter, Baumgartner, Powell, & Braun, 1996) (Richter, Mathews, Harrison, & Wigington, 2003). As primeiras metodologias de determinação de vazões mínimas surgiram na década de 70 e 80. A partir daí desenvolvera-se metodologias para avaliar as vazões ecológicas correlacionando os dados teóricos da ecologia dos rios. No entanto, a existência de diversas metodologias torna o processo complexo e vulnerável e os métodos têm sido classificados em categorias de acordo com sua complexidade de aplicação. Há ainda que considerar que existem problemas em aplicação das metodologias e disparidade nos resultados apresentados por diferentes utilizações. (Souza, Júnior, & Giacomoni, 2004), (Sarmiento, 2007).

Cada metodologia para determinação da vazão ecológica produz normalmente mais de um cenário possível para regimes de escoamentos. Cada cenário tem objetivo em relatar a condição ou parte dela, e saúde dos ecossistemas dependentes, os requerimentos necessários podem ser desde profundidade da água para prover um perímetro molhado para determinada espécie de peixe, até parâmetros de estruturas gerais de um rio, tal como comprimento retilíneo, seção em curvas, entre outros parâmetros, porém esta alternativa pode ser complexa se detalhado todo o comportamento, magnitudes, tempo de retorno e duração das vazões (Souza, Júnior, & Giacomoni, 2004).

De acordo com estudos, no Brasil e no mundo, são utilizadas metodologias diversas que são subdivididas e agrupadas de várias maneiras, apresentando semelhanças e diferenças pontuais, diferenciando-se principalmente pelas características adotadas, do que por métodos em si (Pinto, Ribeiro, & Silva, 2016). A classificação destas metodologias, refletem diretamente na complexidade de aplicação, além disso, revelam a existência de várias possibilidades para

determinação de vazões ecológicas, atualmente as metodologias são divididas em 4 categorias características, sendo elas: hidrológicas, hidráulicas, simulação de habitat e holísticas. (Tharme, 2003) (Longhi & Formiga, 2011) (Gasques, Neves, Santos, Mauad, & Okawa P, 2018).

No Brasil, é usada em larga escala a metodologia hidrológica, especificamente métodos de vazão ($Q_{7,10}$), adotando-se um percentual dessa vazão como referência da descarga ambiental, há também metodologias hidráulicas utilizadas, no qual a vazão ecológica é uma fração, de 90 ou 95 %, de vazão permanente no tempo. No início dos anos 2000 introduziu-se a metodologia de habitat, especificamente o método IFIM (Longhi & Formiga, 2011).

3.2.1 Metodologia Hidrológica

A metodologia hidrológica consiste em utilizar vertentes históricas como referência para recomendações de vazões, no geral. São analisados históricos de fluxo, e desses históricos são analisadas vazões diárias ou mensais. Apesar da vantagem evidente de utilizar apenas um parâmetro de referência, questiona-se a aplicação da metodologia em relação ao aspecto ambiental, pois não se faz uma análise ambiental propriamente dita presumindo-se que somente a vazão de referência é suficiente e que suprir a necessidade básica do ecossistema (Collischonn, Agra, Freitas, & Priante, 2006) (Sarmiento, 2007).

As vazões aplicadas nessa metodologia são constantes e não se adaptam as necessidades e a sazonalidade do sistema, podendo resultar em vazões insuficientes e/ou incompatíveis com o bioma local (Gasques, Neves, Santos, Mauad, & Okawa P, 2018) (Benetti, Lanna, & Cobalchini, 2003).

Para (Longhi & Formiga, 2011), existem diversos estudos para metodologias hidrológicas que são sincronizadas com os avanços teóricos em relação a análise dos rios e que estão apresentados na tabela 3. Segundo (Benetti, Lanna, & Cobalchini, 2003), as metodologias hidrológicas mais utilizadas no Brasil são: Método $Q_{7,10}$; Método da curva de permanência das vazões; Método de Tennant; Método de vazões anuais mínimas; Método da vazão aquática de base; Método das medianas de vazões e Método de área de drenagem.

Tabela 4: Metodologias hidrológicas

Metodologia	Utilização	Aplicação	Desvantagem
One Flow Method (OFM) - 1963	Dados hidrológicos	Desova de peixes (salmonídeos)	Custo na aquisição de dados
Nothern Great Plains Resourc Program – 1974	Curva de permanência de vazões (série histórica de vazões naturais)	Desova/crescimento de peixes; vazões de descarga e transporte de sedimentos	Não recomendado para cursos de águas quentes
Método de Hope – 1975	Curva de permanência de vazões (série histórica de vazões naturais)	Desova/crescimento de peixes; vazões de descarga e transporte de sedimentos	Não recomendado para cursos de águas quentes
Método de Tennant ou Montana – 1976	Dados hidrológicos do curso d'água	Desova/Crescimento de trutas; vazões de descarga e transporte de sedimentos	Válido somente para região que foi desenvolvido; inexistência de validação biológica
Método Califórnia – 1976	Mapas planimétricos para velocidade, profundidade, material aluvionar e cobertura	Quantificar vazão e área para desovas e crescimento de trutas	Faltam critérios e orientações para recomendação de vazão ecológica
Método Q7,10 – 1976	Série histórica de vazões naturais	Construção de estações de tratamento de efluentes e concessão de outorga de água	Não considerar a especificidade dos ecossistemas e dinâmica natural da ictiofauna
<i>Continuação...</i>			
Método de Lyons – 1979	Dados hidrológicos (série histórica de vazões naturais)	Concessão de outorga de água e determinação de vazão ecológica	Limitações para aplicação de rios em outras regiões
Consensus Criteria for Enviromental Flow Needs – CCFEN – 1979	Dados hidrológicos (percentuais da vazão natural estimadas antes da antropização)	Parte das diretrizes do Plano de Águas do Texas (EUA)	Limitações para aplicação de rios em outras regiões
Método de Utah – 1980	Dados hidrológicos (série histórica de vazões naturais)	Recomendar vazão ecológica	Método arbitrário, carece comprovação de adequação de ictiofauna
Aquatic Base Flow – ABF – 1980	Série histórica de vazões naturais (média para o mês mais seco do ano)	Manutenção dos organismos aquáticos nos cursos de água	Baixo nível de precisão e resultados mais conservadores
Maximum Steelhead Spawning Area Method – 1981	Dados hidrológicos e série histórica de vazões naturais	Habitat para espécies de salmonídeos e outras espécies de peixes	Falta especificação de procedimento para recomendação de vazão ecológica
Range of Variability Approach (RVA) – 1997	Série histórica de vazões naturais (32 indicadores de alteração hidrológica)	Gestão de rios, restaurar ou manter a variabilidade natural dos regimes hidrológicos para recuperação e conservação de ecossistemas aquáticos	Definição dos parâmetros requer muito rigor e trabalho
Indicadores de alteração hidrológica – IAH – 1997	Dados hidrológicos (série histórica de vazões)	Comparar condições de sistemas de avaliação hidrológica	Dificuldade na coleta de dados (necessita muitas informações)

Fonte: Adaptado de Longhi & Formiga, 2011.

3.2.2 Metodologia hidráulica

A metodologia hidráulica consiste em analisar parâmetros hidráulicos para previsão de variação do habitat em função das mudanças de vazão em determinado trecho de impacto estudado, ou seja, relacionam as características de escoamento com todo o bioma influenciado. Essa metodologia além de considerar as relações

diretas e indiretas inclui um levantamento ambiental mais abrangente quando comparado com a metodologia hidrológica. Porém para cada caso necessita-se de relações e estudos específicos para a região (Benetti, Lanna, & Cobalchini, 2003) (Collischonn, Agra, Freitas, & Priante, 2006).

Segundo (Gasques, Neves, Santos, Mauad, & Okawa P, 2018), é vantajoso ambientalmente utilizar as relações hidráulicas frente as características ambientais da região, pois cientificamente tem-se um conhecimento amplo da região de aplicação da metodologia. Porém, segundo (Collischonn, Agra, Freitas, & Priante, 2006), precisa-se de investimentos diretos em pessoal, equipamentos, recursos para medições, no qual pode-se acarretar na inviabilidade de aplicação em determinadas regiões/áreas de estudo.

No Brasil, (Benetti, Lanna, & Cobalchini, 2003) através de estudos indica que se utiliza de forma mais ampla as metodologias de perímetro molhado e metodologias de regressões múltiplas que são usadas para previsão de modificações de habitats aquáticos correlacionando-os com variáveis ambientais para identificar o impacto sobre as populações do bioma e biota local.

Para (Vestena, Oliveira, Cunha, & Thomaz, 2012), o estudo de geometria hidráulica, consiste juntamente de análises matemáticas teóricas e experimentais para analisar o impacto geral da disponibilidade hídrica local sobre a população dependente.

De acordo com (Longhi & Formiga, 2011), as metodologias hidráulicas são caracterizações de seções no qual são levantados parâmetros para modelagem e simulação hidráulica gerando uma curva de habitat em relação a vazão, a partir dessas interseções são recomendadas as vazões ecológicas em função da seção em observação. De acordo com estudos, há várias metodologias hidráulicas utilizadas em todo o mundo, sendo algumas delas, descritas na tabela 5 a seguir:

Tabela 5: Metodologias hidráulicas

Metodologia	Utilização	Aplicação	Desvantagem
Método da região 4 do USFWS – 1967	Caracterização de seções transversais/modelo de simulação hidráulica	Permitir manutenção das características do habitat para populações de salmões em rios de montanha	Método de uso restrito em regiões montanhosas
Washington Toe-Width – 1976	Distâncias entre as margens medida no fundo do rio	Determinar vazão ecológica mínima para peixes	Requer tempo e rigor em medições de altura de lâmina e velocidade da água

Método de Oregon – 1972	Conceitos de largura ponderada utilizável e largura utilizável de rios	Vazões mínimas e ótimas para locomoção, desova, incubação e crescimento de espécies de peixes	Alto custo
Método do Colorado - 1973	Caracterização de seções transversais/modelo de simulação hidráulica de diversos parâmetros do rio	Preservação de espécies salmonícolas das Montanhas Rochosas (EUA)	Trabalhoso e alto custo
Método de Washington – 1974	Cartografia de trechos do rio (mapa de isolinhas)	Proteger habitat de espécies de peixes selecionadas	Trabalhoso e alto custo
Método do Perímetro Molhado (MPM) – 1984	Informação hidráulica do rio/simulação/construção de gráficos	Boas condições de habitat para ictiofauna	Considera as características físicas e não da biota do rio
Raio Hidráulico Ecológico - 2007	Informação do rio (raio hidráulico, rugosidade e gradiente hidráulico)	Determinar velocidade de vazão ecológica do rio	Carece de credibilidade

Fonte: Adaptado de Longhi & Formiga, 2011.

3.2.3 Metodologias de Habitat

A metodologia de habitat consiste no processo de combinação das características hidráulicas de uma região em estudo com preferências de habitat das espécies conjuntas. Essa metodologia parte de estudos de diferentes alternativas que consideram desde aspectos econômicos até características ambientais, em buscar de desenvolver um ponto ótimo para determinação de vazão ecológica. Nesta metodologia identifica-se as espécies e condições de existência da mesma, para que se tenha um ponto qualitativo de manutenção do ecossistema, e também, as possíveis variações e impactos gerais nos habitats em função das alternativas de vazões que possam ser utilizadas ao longo do tempo. (Reis, 2003) (Collischonn, Agra, Freitas, & Priante, 2006) (Mattos, 2014).

Para (Longhi & Formiga, 2011) após a implantação do Instream Flow Incremental Methodology – IFIM, em 1982, as características de metodologias de habitat introduziram uma nova resolução de problemas em relação a recursos hídricos que tem por definição reduzir o potencial de impacto ao ecossistema independentemente da forma e qualquer empreendimento hídrico em rios. Isso permitiu trazer a possibilidade de implantação da metodologia não só de estudos de vazões, mas também a qualquer tipo de estudo de perturbação em um determinado curso d'água.

De acordo com (Tharme, 2003) a metodologia IFIM tem sido usada em vários locais como método determinístico, sendo superada apenas pela metodologia hidrológica de Tennant. O IFIM, integra componentes do ecossistema, características

hidráulicas do trecho em estudo. Através da modelagem dos dados realizam-se simulações, e de acordo com essas simulações é possível determinar as principais vazões que maximizem a disponibilidade do habitat para espécies em questão de estudo.

(Sarmiento, 2007) (Benetti, Lanna, & Cobalchini, 2003) nos estudos realizados em relação a metodologia de habitat, concluem que o desenvolvimento do IFIM tende a minimizar os impactos recorrentes causados por outras metodologias, que não potencializavam e nem protegiam de forma significativa a manutenção do ecossistema local em estudo.

As vantagens e desvantagens da utilização de cada uma das metodologias estão apresentadas na tabela 6 a seguir (Longhi & Formiga, 2011).

Tabela 6: Metodologias de habitat

Metodologia	Utilização	Aplicação	Desvantagem
Instream flow incremental methodology – 1982	Procedimentos teóricos (história do rio, espécies de peixes e ciclo de vida) e computacionais (vazões, profundidades e velocidades)	Gestão de recursos hídricos reduzindo impactos negativos aos ecossistemas, protegendo o maior número de espécies possível	Requer muitos dados de campo; difícil uso, requer bom entendimento das espécies do ecossistema
Método RCHARC – 1993	Combina conceitos do IBI (caracteriza biologicamente comunidade de peixes de riachos) e PHABSIM (pesquisa de micro-habitat de locais de amostragem selecionados)	Avaliar o habitat dos rios sob condições de vazões baixas (estuda efeitos de alterações de vazões sobre biota aquática em projetos de canais)	Não faz comparações quantitativas entre trechos do rio e requer grande número de dados
Tidal Tributary/Estuary Method – 1999	Modelo de regressão que correlaciona níveis de água como uma função da maré e vazão	Manutenção de processos e recursos estuários (habitat adequado para peixes e vegetação)	Não considera salinidade, fator importante nos estuários
Hatfield e Bruce Western Salmonid Regressions – 2000	Euações que avaliam vazão que maximiza a área usada ponderada com estudos do PHABSIM	Proteção de habitat de trutas e salmões	Recomendável apenas para reconhecimento
Mesohabitat simulator MesoHABSIM – 2004	Sistema MesoHABSIM (mapeamento do habitat de todas as seções do rio sob vazões múltiplas)	Fornecer avaliação de habitat para utilizar em cenários de recuperação de rios	Dificuldade logística para estudo, custo elevado
Demonstration Flow Assessment – DFA – 2004	Observação direta do habitat dos rios sob diferentes vazões, profissionais que elegem as alternativas adequadas	Licenciamento de hidrelétricas/permitir reprodução de salmões	Subjetividade e incertezas, pois não há quantificação

Fonte: Adaptado de Longhi & Formiga, 2011.

3.2.4 Metodologia Holística

A metodologia holística considera eventos críticos e componentes de um ecossistema em estudos, além de correlacioná-los diretamente e indiretamente para projeção de uma determinada vazão ecológica (Benetti, Lanna, & Cobalchini, 2003).

No geral, a metodologia holística contempla várias fases, com inclusão de variáveis físicas e ambientais, além de correlacioná-los com as características hídricas locais, criando assim um plano de mapeamento e estudo para tomadas de decisões (Collischonn, Agra, Freitas, & Priante, 2006).

De acordo com (Reis, 2003), caracteriza-se a metodologia holística principalmente pela estruturação resumida de vários especialistas de diversas áreas, resultando numa descrição quantitativa correlacionando espaço, tempo, regime de vazão, a fim de determinar a manutenção do ecossistema do curso d'água utilizando -se a interdisciplinaridade e características locais do estudo.

A metodologia holística necessita coleta substancial de dados do objeto em estudo, no qual identificam-se e descrevem-se as particularidades necessárias para manutenção do ecossistema dependente, tem por vantagem ter aplicação rápida e consolidação documentada contando todas as informações sobre a área de estudo, conectando posteriormente com atividades de engenharia e planejamento de recursos hídricos (Benetti, Lanna, & Cobalchini, 2003) (Collischonn, Agra, Freitas, & Priante, 2006) (Gasques, Neves, Santos, Mauad, & Okawa P, 2018).

De acordo com (Longhi & Formiga, 2011), o Building Block Methodology – BBM, é o principal modelo utilizado na metodologia holística, porém há outras metodologias que também são utilizadas no mundo, que contemplam as características de estudo regional para desenvolvimento de conteúdo par aplicação dessa metodologia, descritas a seguir na tabela 7. Contudo, apesar do desenvolvimento das metodologias holísticas, as metodologias que são utilizadas como referência tem um viés hidrológico e são regulamentadas de forma defasada com características superficiais (Mattos, 2014).

Tabela 7: Métodos holísticos

Metodologia	Utilização	Aplicação	Desvantagem
Building Block Methodology – BBM – 1998	Workshop com partes interessadas, estudos de escritório e campo, pesquisa socioeconômica, análise hidráulica e hidrológica do rio	Rios regularizados, se tratando da restauração das vazões; considera todos os organismos aquáticos	Julgamento de sua efetividade necessita de tempo
Método holístico – 1992	Profissionais fazem julgamentos acerca das consequências ecológicas para várias vazões no rio, em relação aos aspectos quantitativos e temporais	Recuperação de ecossistemas de rios, pântanos, estuários e águas subterrâneas	Não possui conjunto estruturado de procedimentos para uso, requer treinamento especializado, custo elevado na aquisição de dados

Downstream response to imposed flow transformations – DRIFT – 2003	Módulos de estudo biofísico, sociológico, de desenvolvimento de cenários e módulo econômico.	Recuperação de ecossistemas de rios e regiões ribeirinhas	Limitação das interações sinérgicas entre diferentes cenários de vazões
--	--	---	---

Fonte: Adaptado de Longhi & Formiga, 2011.

Considerando o cenário mundial, (Tharme, 2003) apresenta as principais tendências sobre usos das metodologias para avaliação de potencial ecológico. Foram identificadas em torno de 207 metodologias para determinação de vazões ecológicas, demonstrados na Tabela 8:

Tabela 8: Metodologias de vazão ecológica e proporções relativas no mundo

Metodologia	Percentual do número global de metodologias existentes (%)
Hidrológica	29,5
Hidráulica	11,1
Habitat	28
Holística	7,7
Outras e/ou combinações	23,7

Fonte: Adaptado de Tharme, 2003; Adaptado Longhi & Formiga, 2011.

3.3 Metodologias para cálculo de vazões de referência no Brasil

De acordo com estudos realizados no Brasil (Mendes, 2007), as metodologias mais utilizadas para cálculos de vazões de referência, são:

- Vazão Mínima de Sete Dias com Período de Recorrência de Dez Anos (Q 7,10);
- Método de Tennant/Montana com base em vazão média de longo termo (QMLT);
- Análise de Curva de Permanência.

3.3.1 Vazão mínima de sete dias com período de recorrência de dez anos

É uma metodologia que se insere nas metodologias hidrológicas onde são consideradas somente informações históricas para descrever as vazões mínimas em rios. Nesta metodologia trabalha-se com vazões mínimas para desmembrar vazões máximas possíveis de serem utilizados de forma geral, visando manter a qualidade da água e do ecossistema dependente.

De forma geral, a metodologia Q7,10, não considera os habitats aquáticos, tem como vantagem não ser necessário captação de índices no campo, a não ser parâmetros relacionados a vazão.

A metodologia Q7,10; de acordo com estudos, (Benetti, Lanna, & Cobalchini, 2003), é obtida através das médias móveis diárias com intervalos de 7 dias com período de um ano completo. A mínima das médias é memorizada e todo o processo é repetido em função da quantidade do tempo de recorrência mínimo de dez anos, resultando uma série de valores mínimos de vazões médias de 7 dias consecutivos. Essas vazões são ordenadas em ordem crescente, e estimadas as suas funções distributivas e períodos de retorno, e dentro desta função distributiva, estima-se a vazão mínima de 7 dias de duração com período de retorno de no mínimo 10 anos e matematicamente, temos de acordo com as equações 28 e 29, os índices necessários para cálculo da vazão Q7,10 (Benetti, Lanna, & Cobalchini, 2003):

$$P = \frac{c-a}{N+1-2a} \quad (28)$$

$$T = \frac{1}{P} \quad (29)$$

Onde:

P: Probabilidade não excedente;

a: 0,4 - Coeficiente de posição Weibull;

c: Números por classe;

N: Número total de dados.

T: Tempo de recorrência

Para o cálculo de vazão Q7,10 há várias metodologias direcionadas aplicáveis tais como o método de Gumbel, Weibull, probabilidades, entre outros (Santos & Cunha, 2013).

3.3.2 Tennant/Montana com base em vazão média de longo termo

É uma metodologia que se utiliza de base a vazão média de longo termo – QMLT, calculada para o local de aproveitamento hidráulico, no qual se considera diferentes percentuais em períodos secos e molhados (chuvosos) (Benetti, Lanna, & Cobalchini, 2003). Neste método são consideradas vazões médias anuais, onde de acordo com a recomendação em percentagens temos:

Tabela 9: Recomendação de vazões QMLT

Condição do rio	Vazão recomendada (% de QMLT)	
	Período Seco	Período chuvoso
Excepcional	40	60
Excelente	30	50
Boa	20	40
Regular ou em degradação	10	30
Má ou mínima	10	10

Fonte: Adaptado de Benetti; Lanna & Cobalchini, 2003.

O Método de Tennant, é utilizado em escala global para determinação de vazão ecológica e outorgável de referência, no geral, a metodologia vem sofrendo alterações pontuais visando adaptar as características de outras regiões daquela para qual foi concebida e desenvolvida (ANA, 2020) (Benetti, Lanna, & Cobalchini, 2003).

Os modelos de Tennant utilizados com base em séries históricas são ágeis e simplificados, não necessitando de trabalho em campo, porém, recomenda-se utilizar de forma assegurada e limitada, estimando-se as características primárias e semelhantes às que o método foi desenvolvido, para minimizar efeitos negativos.

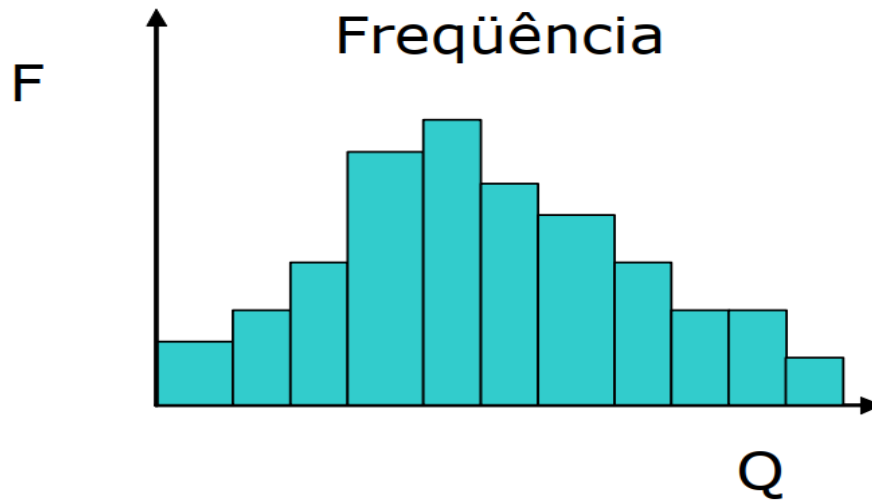
3.3.3 Análise de curva de permanência

A metodologia de análise de curva de permanência, é um dos métodos mais utilizados no Brasil, pois relaciona a vazão com sua probabilidade de ocorrência ao longo de um tempo, utiliza-se com variabilidade diária, mensal, ou anual, calculada de acordo com dados de séries históricas, além de particularidades definidas de acordo com o curso do rio em análise, no geral, são ordenados os dados de forma crescente, com etapas determinadas para aferição dos dados (Mendes, 2007), descritos abaixo:

- Determinação de vazões mínimas e máximas de uma série em análise;
- Intervalos de classes entre os valores selecionados;
- Vazões contidas nos intervalos;
- Obtenção da distribuição de frequência;
- Acumulação dos valores em ordem decrescente;
- Plotagem em gráficos de curva de permanência;

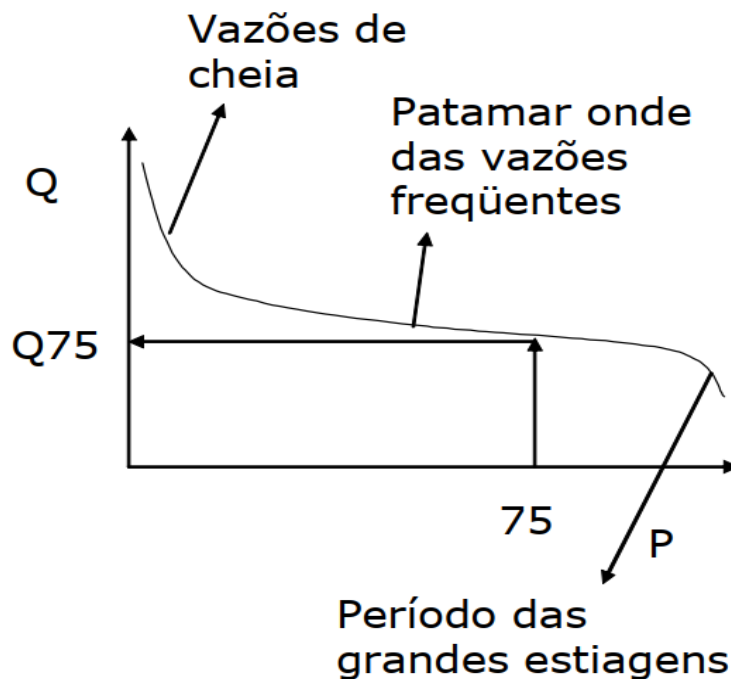
De acordo com a Figura 16, demonstra-se a exemplificação da distribuição de frequências, na Figura 17 exemplifica como observar uma curva de permanência e as características da mesma.

Figura 16: Distribuição de frequência



Fonte: Adaptado de Mendes, 2007.

Figura 17: Curva de permanência



Fonte: Adaptado de Mendes, 2007.

Para exemplificação, a vazão de 75% (setenta e cinco por cento) da curva de permanência, significa que 75% (setenta e cinco por cento) do tempo, as vazões são maiores ou iguais ao valor de Q75. E na descrição geral, os períodos de grandes estiagens correm quando são probabilidades superiores a 95% (Mendes, 2007).

4 METODOLOGIA

Inicialmente deve-se fazer um apanhado das legislações estaduais vigentes nas usinas para estudo: Retiro Baixo em Minas Gerais, sendo o órgão gestor, IGAM, e Serra do Facão em Goiás, sendo órgão gestor, SEMARH, e, a partir dos dados levantados, realizar um estudo comparativo de gerações e vazões ecológicas. Ou seja, identificar as características do sistema atual, e da proposta do sistema de cogeração de energia, com intuito em retratar de forma satisfatória as principais partes envolvidas.

A Tabela 10, apresenta um resumo das vazões de outorga para os dois Estados onde se encontram as usinas objeto desse estudo. E pode-se observar que existem exceções de acordo com o tipo de utilização do recurso hídrico local. Essas exceções são analisadas pelos órgãos ambientais estaduais competentes de acordo com a visão dos seus técnicos (ANA, 2011).

Tabela 10: Vazões de outorga vigentes e legislações referentes

Órgão gestor	Vazão Máxima Outorgável	Legislação referente a vazão outorgável
SECIMA -Goiás	70% da Q ₉₅	Não possui legislação específica
IGAM-Minas Gerais	30% da Q _{7,10} para captações a fio d'água e em reservatórios, podendo ser liberadas vazões superiores, desde que mantenha o mínimo residual de 70% da Q _{7,10} durante todo o tempo	Portaria IGAM nº 010/1998 e 007/1999

Fonte: (ANA, 2011).

Analisando os requisitos de vazão de outorga descritos pela tabela 10, tem-se diferenças perceptíveis em relação a vazão outorgável e a legislação em vigência. Pode-se notar também que os critérios utilizados pelo Igam-MG, quando comparados com a Semarh-GO, são muito mais restritivos, principalmente pela metodologia abordada para outorga de vazão. Isso ocorre mesmo se considerarmos que ambos são parâmetros que obtidos a partir de metodologias de vazão inclusas nos métodos hidrológicos. Quando se trata de empreendimentos hidrelétricos, boa parte destes, são normalmente dispensados de critérios de outorga devido a:

- i) avaliação prévia;

- ii) indisponibilidade de série vazões históricas e/ou legislações vigentes a relação de uso de água,
- iii) os parâmetros mínimos de operação são superiores as exigências determinadas pelo órgão competente.

Usa-se Q7,10 para Retiro Baixo, e Q95 para Serra do Facão, para efeitos comparativos e mesmo utilizando metodologias cientificamente comprovadas para outorga de vazão, ainda há muita discussão sobre o critério/método de avaliação do ecossistema dependente. Isso se deve as características de cada curso d'água, e suas dependências únicas em determinadas partes. Portanto, cada empreendimento deve-se balizar em procedimentos abrangentes e necessários para que haja a melhor correspondência local, onde minimiza-se impactos recorrentes de alterações no curso d'água e adaptabilidade dos seus diversos fatores dependentes.

4.1 Determinação da potência e energia

A potência instalada de uma usina hidrelétrica " P_{inst} " é diretamente dependente da massa específica da água " ρ ", da vazão de projeto " Q ", do desnível existente no local " H ", da aceleração da gravidade " g " e do rendimento global da instalação " η ", o produto dessas grandezas, resulta na potência bruta da instalação, Equação 30 (Doland, 1954).

$$P_{inst} = \rho * g * Q * H * \eta / 1000 \quad (\text{kW}) \quad (30)$$

A Energia Firme corresponde à máxima produção que uma Usina pode fornecer, considerando o período mais seco registrado no histórico de vazões sem a ocorrência de déficits, considerando-se todo o registro histórico de afluições apresentada na Equação 31 (Hicks *et al*, 1974).

$$E_{firme} = P_{inst} \cdot T_{op.med.} \quad (31)$$

Sendo $T_{op.med.}$ o tempo médio de operação da instalação (mês ou ano).

Para se calcular a perda de arrecadação (P_{arrec}) com o despacho da vazão ecológica em um determinado período de tempo multiplica-se o valor de comercialização de energia (V_{energ}) em R\$ / kWh pela somatória da vazão despachada pelos sistemas de vertimento ou elementos dispersores com finalidade ambiental " $\sum Q_{san}$ " pela massa específica da água " ρ ", pelo desnível existente no local " H ", pela

aceleração da gravidade “ g ” e pelo rendimento global da instalação “ η ”, conforme apresentado na Equação 32 a seguir.

$$P_{arrec.} = V_{energ} * \sum Q_{san} * \rho * g * H * \eta * 24h [R\$] \quad (32)$$

5 ESTUDO DE CASO

O objetivo deste estudo é analisar as vazões operacionais de despacho nas UHEs Retiro Baixo (MG) e Serra do Facão (GO), identificando as respectivas vazões ecológicas. Para tanto, foi utilizada a série histórica fornecida pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio do Sistema de Acompanhamento dos Reservatórios (SAR).

Os casos adotados para aplicação do estudo são: Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo, em Minas Gerais, e Usina Hidrelétrica de Serra do Facão, em Goiás (FURNAS, 2014).

5.1 Descrição da Usina Hidrelétrica Retiro Baixo

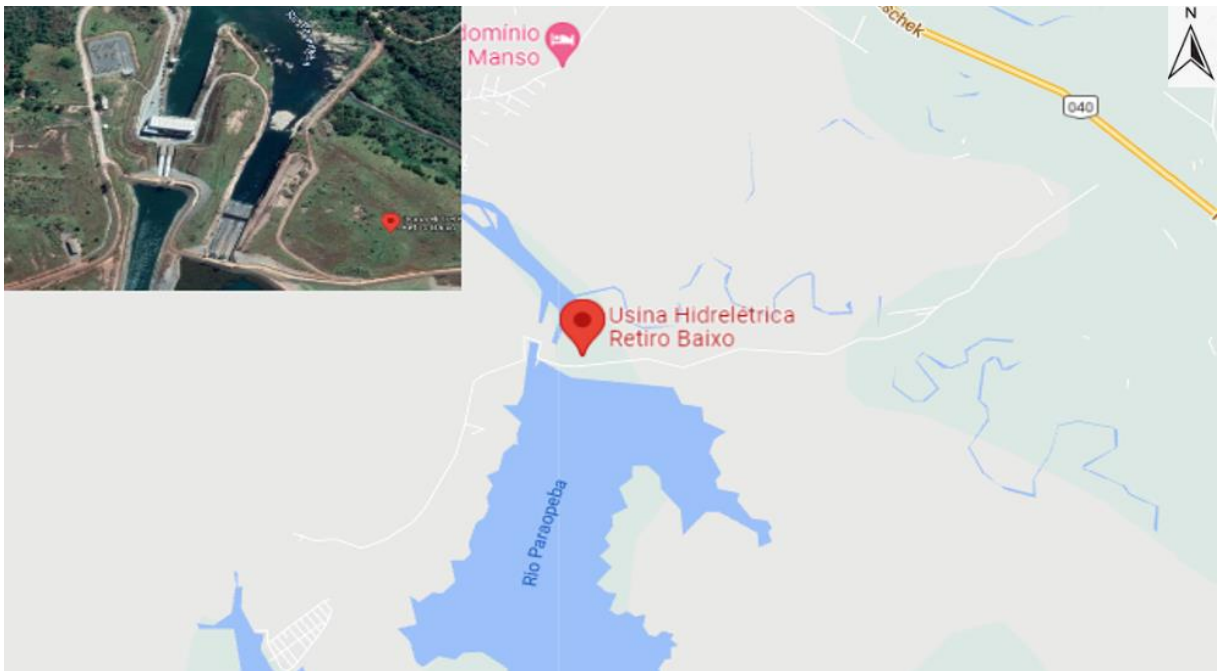
De acordo com as administradoras (FURNAS, 2020) e (RBE, 2020), a usina de Retiro Baixo se caracteriza como usina a fio d'água, e situa-se no curso d'água do Rio Paraopeba, a aproximadamente 5km de distância do remanso da UHE Três Marias. As características dessa HHE estão apresentadas na Tabela 11. A figura 18 apresenta a localização da UHE.

Tabela 11: Características da UHE Retiro Baixo

Rio	Paraopeba
Bacia	São Francisco
Localização do eixo	Latitude: 18° 53' 40" S Longitude: 44° 46' 54" W
Estado/ municípios	Minas Gerais: Curvelo, Pompeu e Felixlândia
Área do reservatório	22,58 km ²
Vazão máxima turbinada	256,36 m ³ /s
NA mínimo	614 m
NA máximo	616 m
NA máximo maximorum	617 m
Cota da crista da barragem	619 m
Volume útil do reservatório	241690 m ³
Potência instalada	82 MW (2 turbinas Kaplan de 41 MW)
Energia firme local	38,5 MW media
Vazão nominal unitária	128,18 m ³ /s
Vazão outorgada	Sem especificações do órgão regulador

Fonte: FURNAS, 2020.

Figura 18: Localização da usina hidrelétrica Retiro Baixo



Fonte: Adaptado de RBE, 2020, Imagens do Google Earth em 29-11-2021.

5.2 Descrição da Usina Hidrelétrica Serra do Facão

De acordo com as administradoras (FURNAS, 2020) e (SEFAC, 2020), a usina de Serra do Facão se caracteriza como usina de acumulação, e situa-se no curso d'água do Rio São Marcos, distante cerca de 58km de Catalão e cerca de 27km de Davinópolis, ambos no estado Goiás. A tabela 12 apresenta as características dessa UHE e a figura 19 mostra a localização da mesma.

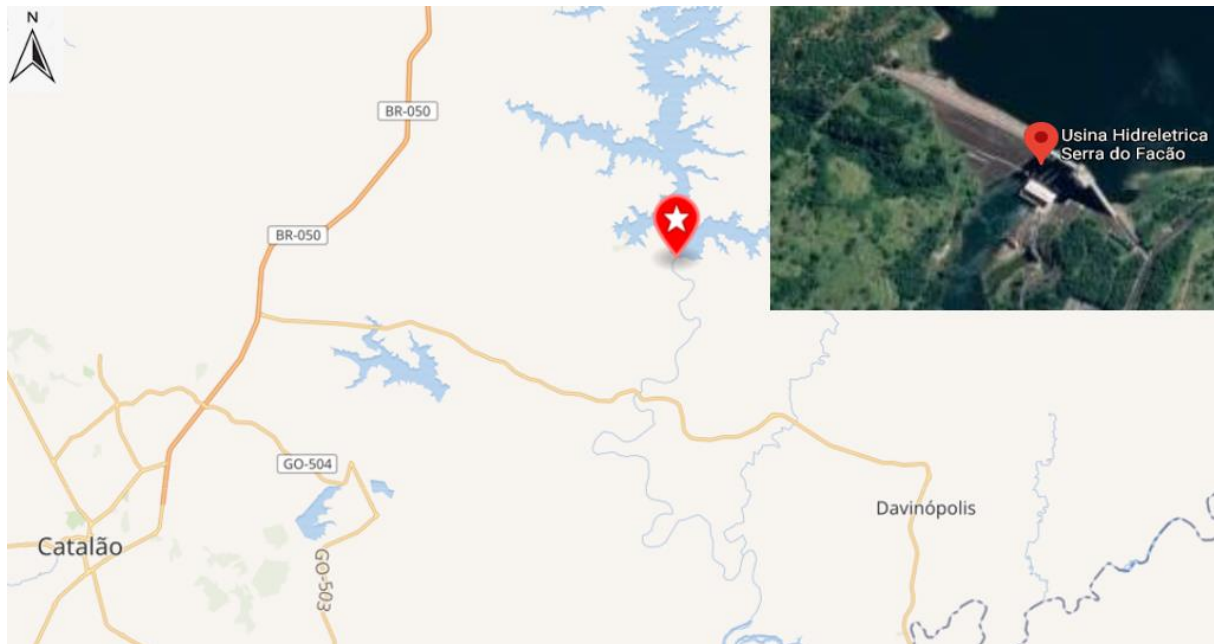
Tabela 12: Características da UHE Serra do Facão

Rio	São Marcos
Bacia	Paraná
Localização do eixo	Latitude: 18° 04" 00' S Longitude: 47° 40" 00' W
Estado/ municípios	Goiás: Catalão e Davinópolis
Área do reservatório	218,84 km ²
Vazão máxima turbinada	310,99 m ³ /s
NA mínimo	732,5 m
NA máximo	756 m
NA máximo maximorum	756,98 m
Cota da crista da barragem	760 m
Volume útil do reservatório	5199000000 m ³

Potência instalada	212 MW (2 turbinas Francis de 106 MW)
Energia firme local	178,8 MW media
Vazão nominal unitária	155,49 m ³ /s
Vazão outorgada	Sem especificações do órgão regulador

Fonte: SEFAC, 2020.

Figura 19: Localização da UHE Serra do Facão



Fonte: Adaptado de (SEFAC, 2020), Imagens do Google Earth em 02-11-2021.

5.3 Estudo das vazões das usinas de Retiro Baixo e Serra do Facão

Para o estudo de vazões de cada usina, é utilizada a série histórica fornecida pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2020), através do Sistema de Acompanhamento dos Reservatórios (SAR), o qual, tem por função monitorar a série de vazões de todos os reservatórios e cursos d'água do Brasil, em conjunto com órgãos regulamentadores e fiscalizadores de cada estado. Os tipos de vazões abordadas nos registros do SAR, tem por objetivo, identificar parâmetros quantitativos e qualitativos do reservatório e do curso d'água em estudo. De forma conceitual, segue abaixo as denominações e significados dos itens relacionados ao acompanhamento dos reservatórios e cursos d'água:

- **Afluente:** Vazão do curso d'água principal que deságua no reservatório ou em um rio.

- **Defluente:** Vazão do curso d'água principal a jusante do reservatório ou em um rio, no qual corresponde a soma das vazões vertidas e turbinadas.
- **Vazão Natural:** Vazão no qual considera o fluxo natural de um curso d'água sem interposições, ou seja, vazão calculada e baseada nas séries históricas que resulta em uma projeção de vazão no qual o curso d'água teria sem os empreendimentos e utilizações decorrentes.
- **Vazão Turbinada:** Vazão que passa através das turbinas de uma usina hidrelétrica, utilizada para fins de geração de energia.
- **Vazão Vertida:** Vazão descarregada através do vertedouro e/ou válvulas de fundo. A vazão que passa através das turbinas, desde que não utilizada para geração de energia, compõe também a vazão vertida.
- **Vazão Incremental:** Vazão proveniente da diferença das vazões naturais entre duas seções terminadas de um curso d'água.

5.3.1 UHE Retiro Baixo

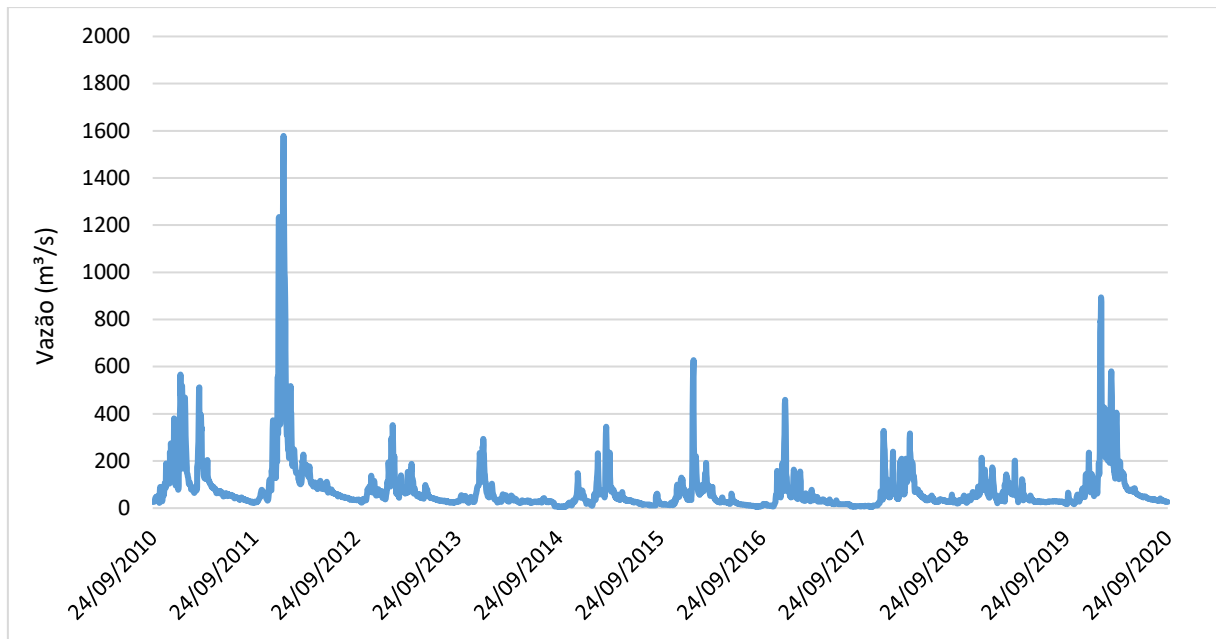
De acordo com os relatórios obtidos através do SAR, temos as características da UHE Retiro Baixo apresentadas na Tabela 13 e nas figuras 20 e 21, a seguir:

Tabela 13: Acompanhamento de vazões usina de Retiro Baixo

Usina	Retiro Baixo
Posto	19118 – Barramento central do reservatório
Período	24/09/2010 a 24/09/2020
Cota média	614,76 m
Afluência média	76,43 m ³ /s
Defluência média	76,46 m ³ /s
Vertimento médio	17,80 m ³ /s
Turbinamento médio	58,68 m ³ /s
Vazão natural média	77,94 m ³ /s
Médias mínimas anuais	17,70 m ³ /s
Volume útil médio	39,01 %

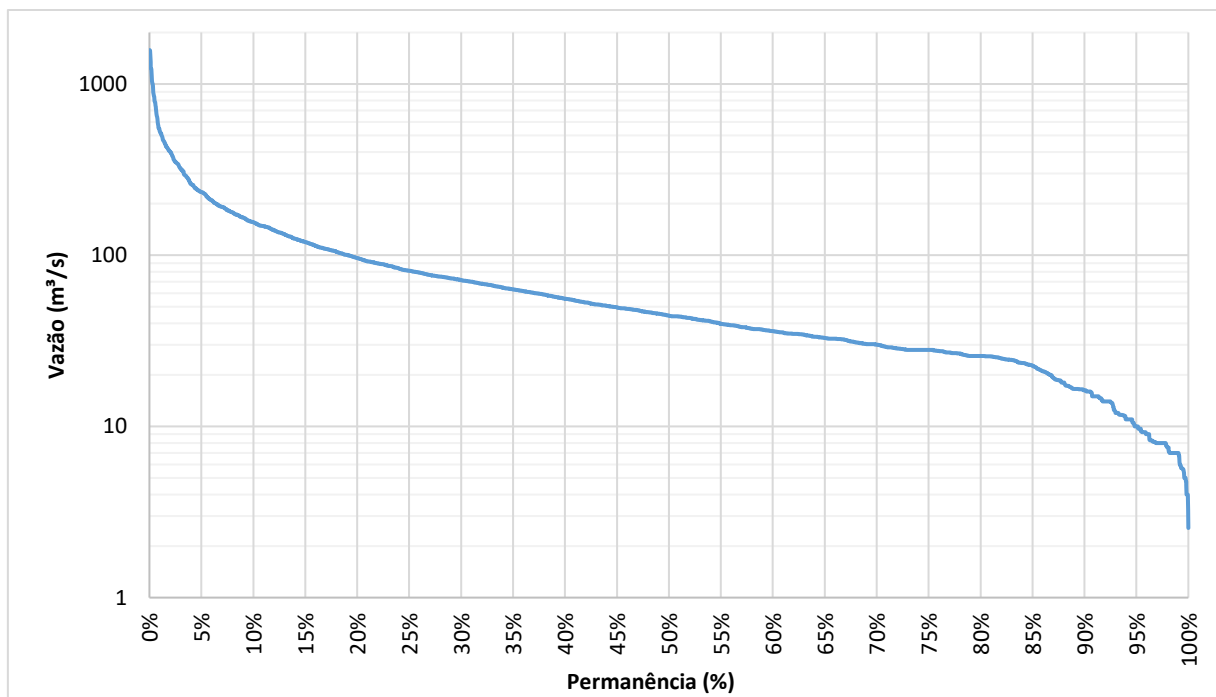
Fonte: Próprio autor, 2020.

Figura 20: Histograma de vazões UHE Retiro Baixo



Fonte: Próprio autor, 2020.

Figura 21: Curva de permanência UHE Retiro Baixo



Fonte: Próprio Autor, 2020.

Analisando as particularidades dos dados coletados do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios, há considerações a se realizar:

- Pelo fato da UHE Retiro Baixo se caracterizar como uma usina a fio d'água, toda vazão é despachada, por turbinamento, por vertimento ou ambos.

- Geograficamente, por se encontrar no remanso da UHE Três Marias, a UHE Retiro Baixo, também regula a vazão de um dos rios afluentes do reservatório de Três Marias

Analisando o despacho de vazão ambiental de acordo com o Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) e respeitando-se a necessidade de alimentar a bacia do reservatório da UHE Três Marias observa-se que as vazões despachadas sem turbinamento, dependem de: i) da vazão afluente do reservatório da UHE Retiro Baixo; ii) da necessidade do fluxo contínuo do Rio, temos vazões ambientais (vertidas) entre 7 e 28 m³/s.

5.3.2 UHE Serra do Facão

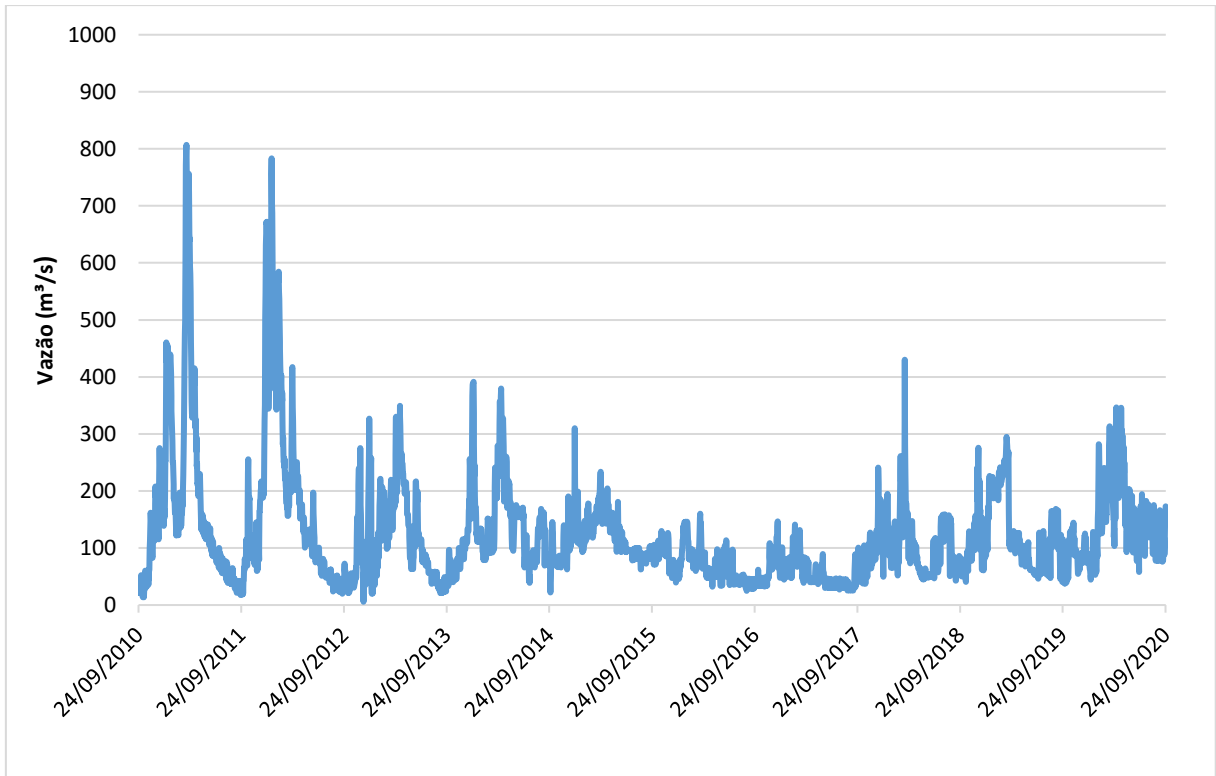
De acordo com os relatórios obtidos através do SAR, temos as características da UHE Serra do Facão apresentadas na Tabela 14 e nas figuras 22 e 23 a seguir:

Tabela 14: Acompanhamento de vazões usina Serra do Facão

Usina	Serra do Facão
Posto	19016 – Barramento central do reservatório
Período	24/09/2010 a 24/09/2020
Cota média	745,19 m
Afluência média	112,79 m ³ /s
Defluência média	121,66 m ³ /s
Vertimento médio	3,28 m ³ /s
Turbinamento médio	115,48 m ³ /s
Vazão natural média	131,42 m ³ /s
Médias mínimas anuais	36,14 m ³ /s
Volume útil médio	45,72 %

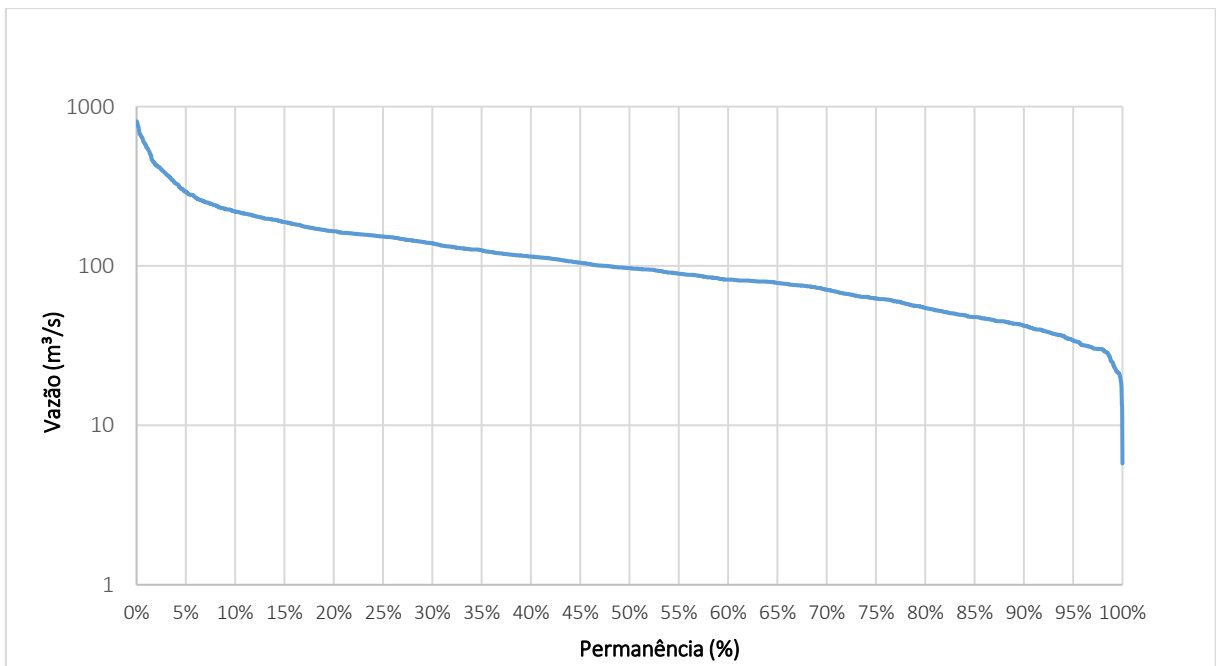
Fonte: Próprio autor, 2020.

Figura 22: Histograma de vazões UHE Serra do Facão



Fonte: Próprio autor, 2020.

Figura 23: Curva de permanência UHE Serra do Facão



Fonte: Próprio autor, 2020.

Analisando as particularidades dos dados coletados do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios, considera-se que essa usina se caracteriza

como usina de acumulação, tem por função, regularizar a vazão do curso d'água principal do Rio São Marcos, de acordo com o Sistema de Acompanhamento de Reservatórios, pode-se dizer que praticamente não há despacho de vazão ambiental, salvo exceções quando é período de seca histórico, ou indisponibilidade de turbinamento.

5.4 Procedimentos experimentais

5.4.1 Procedimento geral

Inicialmente deve-se fazer um apanhado do conjunto das vazões das usinas hidrelétricas e a partir dos dados levantados. Na sequência se realiza uma análise das vazões de outorga e as considerações necessárias para sua utilização a partir da legislação vigente de forma a se determinar as características do sistema atual e da proposta do sistema de cogeração de energia utilizando vazões ecológicas como fonte de energia secundária. Para retratar de forma satisfatória a projeção de geração de energia, deve-se considerar alguns parâmetros tais como os apresentados a seguir:

- Comparação das vazões ecológicas despachadas frente as calculadas;
- Análise das perdas de carga no sistema de geração acoplada ao sistema de manutenção de vazão ecológica;
- Projeção da vazão de turbinamento, considerando como referência as características do sistema de geração primário;

5.4.2 Determinação de vazão de projeto para as UHEs Retiro Baixo e Serra do Facão

Para determinar a vazão de projeto da Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo (MG), utiliza-se o critério de vazão $Q_{7,10}$ no qual contempla parâmetros experimentais e que correlacionados de forma estatística, tem-se o cálculo abaixo, também chamado de método de Gumbel, determinado pela Equação 33:

$$Q_{7,10} = \bar{v} + \sigma [0,4500 + 0,7797 [\ln \left(\ln \frac{TR}{TR-1} \right)]] \quad (33)$$

Onde:

$Q_{7,10}$: Vazão mínima de sete dias com taxa de recorrência ou retorno de 10 anos;

\bar{v} : Média mínima móvel de sete dias de recorrência em um ano;

σ : Desvio padrão de 10 anos;

TR: Taxa de recorrência ou retorno;

No caso da Usina Hidrelétrica de Serra do Facão (GO), utiliza-se do critério de vazão Q_{95} o qual contempla a análise de curva de permanência de vazões, em séries históricas com intervalo mínimo de 10 anos. Ou seja, assume-se hipoteticamente que 95% do tempo as vazões do curso d'água em questão serão iguais ou superiores ao valor determinado pela curva de permanência.

A utilização desses métodos está vinculada a legislação de cada Estado no qual a UHE se localiza, respeitando-se os critérios apresentados no Capítulo 3 e resumido na Tabela 8.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Usina de Retiro Baixo

Para a Usina de Retiro Baixo, obteve-se os dados de vazões médias mínimas móveis apresentados na Tabela 15, de acordo com a série histórica fornecida pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio do Sistema de Acompanhamento dos Reservatórios (SAR).

Tabela 15: Vazões médias mínimas móveis de 7 dias anuais com tempo de recorrência de 10 anos

Ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Vazões (m³/s)	26,7	24,5	26,3	23,5	5,7	11,0	6,7	4,1	21,0	18,5	26,6

Fonte: Próprio autor, 2021.

Aplicando a Equação 33, tem-se o resultado de 5,89 m³/s de vazão ecológica (Q_{7,10}). Considerando a legislação vigente, aplicável ao Estado de Minas Gerais, 70% da referida vazão deve ser mantida no TVR, o que corresponde a 4,12 m³/s. Ao se analisar os dados disponibilizados pelo SAR, observa-se que, para vazões inferiores a 7 m³/s não há turbinamento, sendo essa vazão dispensada pelo sistema extravasor da UHE.

A UHE Retiro Baixo, opera comercialmente desde março de 2010. Sendo equipada com duas unidades geradoras do tipo Kaplan vertical, com potência nominal unitária de 42,35 MW e engolimento unitário de 128,18 m³/s. A vazão mínima turbinável será considerada como 15% do valor de engolimento nominal, ou seja, 19,20 m³/s. O histórico de geração/despacho pelos vertedores, disponibilizados pelo SAR (acesso em 24/09/2020), indica que a mínima vazão despachada (vazão ecológica) foi de 7 m³/s, superior a vazão ecológica exigida que é de 4,12 m³/s. Apesar da vazão ecológica ser de 4,12 m³/s, Retiro Baixo manteve em alguns períodos vazões até sete vezes superior a este valor, mesmo em períodos de baixa afluência de vazões ao reservatório. Isso resultou que durante 441 dias ao longo dos 10 anos de observação (24/09/2010 a 24/09/2020), houve vertimentos na instalação. Adota-se a hipótese de que a operação da UHE Retiro Baixo irá despachar pelos grupos geradores apenas vazões superiores a 19,2 m³/s sendo que as vazões inferiores a essa, e superiores a vazão ecológica, serão armazenadas no reservatório. O balanço entre as vazões turbinadas e vertidas para a finalidade de manutenção da vazão

sanitária está apresentado na Tabela 4, e indica que a perda de geração no histórico disponível é de apenas 2,75% da energia gerada. Ao se aplicar um preço médio da energia hidráulica médio do último ano (06-2020 a 06-2021) como sendo de R\$ 183,82/MWh) (CCEE, 2021), obtém-se uma perda de valor estimada de energia comercializada.

Tabela 16: Estimativa das vazões da UHE Retiro Baixo – perda de geração

Somatória das vazões turbinadas em 10 anos - m ³ /s/dia	205.806,81
Somatória das vazões vertidas para manutenção da Qsanitária em 10 anos – m ³ /s/dia (24 h)	5.665,00
Perda percentual de geração	2,75%
Perda de arrecadação com despacho da vazão sanitária em R\$ (10 anos)	8.414.342,86
Perda de arrecadação média com despacho da vazão sanitária R\$/ano	841.434,29

Fonte: Próprio autor, 2021.

6.2 Usina Serra do Facão

Para a Usina Serra do Facão, de acordo com a legislação atual, foi obtida a curva de permanência de vazões, apresentada na Figura 26, onde se obteve o valor de 34,33 m³/s correspondente a Q₉₅. A legislação vigente para o Estado de Goiás, determina uma vazão ecológica no TVR de 70% da Q₉₅ o que corresponde a 24,03 m³/s.

Esta usina, que está em operação comercial desde outubro de 2010. Sendo equipada com duas unidades geradoras do tipo Francis vertical de potência nominal unitária de 106,29 MW, e engolimento nominal unitário de 155,50 m³/s. A vazão mínima turbinável nesses equipamentos será considerada como de 15% do engolimento nominal, ou seja, 23,33 m³/s. O histórico de geração/despacho pelos vertedores, disponibilizados pelo SAR (acesso em 24/09/2020), indica que a mínima vazão despachada (vazão ecológica) foi de 6 m³/s inferior a vazão ecológica exigida que é de 24,03 m³/s. Assim a UHE, ao longo dos 10 anos de observação (24/09/2010 a 24/09/2020), despachou durante 94 dias vazões ecológicas pelo sistema de vertimento. Adota-se a hipótese de que a operação da UHE irá despachar pelos grupos geradores apenas vazões superiores a 24,03 m³/s sendo que as vazões inferiores a essa e superiores a vazão ecológica serão armazenadas no reservatório. O balanço entre as vazões turbinadas e vertidas para a finalidade de manutenção da

vazão sanitária está apresentado na Tabela 16, e indica que a perda de geração no histórico disponível é de apenas 0,25% da energia gerada.

Tabela 17: Estimativa de vazões da UHE Serra do Facão – perda de geração

Somatória das vazões turbinadas em 10 anos – m ³ /s/dia	289.532,08
Somatória das vazões vertidas para manutenção da Qsanitária em 10 anos – m ³ /s / dia (24 h)	714,54
Perda percentual de geração	0,25%
Perda de arrecadação com despacho da vazão sanitária em R\$ (10 anos)	1.953.813,84
Perda de arrecadação média com despacho da vazão sanitária R\$/ano	195.381,38

Fonte: Próprio autor, 2021.

Analisando o acompanhamento de vazões e perdas de gerações, observa-se um quantitativo de perdas pequeno, mas não desprezível, porém de acordo com as características de investimento, pode inviabilizar o aporte financeiro para estruturas de cogeração, mas, correlacionando com o contexto geral das várias usinas hidrelétricas no Brasil, há indícios quanto a viabilidade técnica e econômica em relação a cogeração de energia hidrelétrica, no qual a proposta se mostra interessante, pois há possibilidade de minimizar quantitativamente usinas ao longo de um curso d'água, tecnicamente há potencial de implantação, visto que há perdas percentuais em geração de energia, porém economicamente, deve-se verificar as particularidades de cada tipo de curso d'água, geração de energia, utilização em geral dos rios, levando em consideração as usinas em questão, não há viabilidade em implantação, devido os custos envolvidos na construção de mecanismos de cogeração, além, de forma que, simplificada, não há como medir quantitativamente os impactos globais do processo de implantação, tais como impactos sociais, econômicos, e propriamente impacto na geração de energia elétrica.

De um modo geral, a implantação de sistemas de cogeração há pontos positivos, tais como a ampliação da geração de energia renovável, divulgação de novas tecnologias e aplicação em outros segmentos (cursos d'água), além de difundir e utilizar de forma sistêmica os recursos disponíveis, e também podendo gerar benefícios conjuntos para a sociedade inserida.

7 CONCLUSÃO

No Brasil, a exigência legal dos valores de manutenção da vazão ecológica, variam de acordo com os Estados. A Legislação de alguns Estados prevê metodologias que implicam em baixas vazões residuais despachadas ao longo dos rios (por exemplo, 70% da Q7,10 - MG). Em outros Estados (p.e. Goiás) essa vazão deve ser de 70% da Q95. Em ambos os casos analisados, a redução percentual da vazão turbinada se apresentou pequena, variando de 0,25% para a UHE Serra do Facão até 2,75% para a UHE Retiro Baixo. Observa-se que no caso da UHE Serra do Facão, a vazão ecológica exigida é proporcionalmente maior do que a da UHE Retiro Baixo. Entretanto, as características de afluência de vazão e a existência do reservatório de acumulação permitem uma maior flexibilidade na manutenção da vazão ecológica, minimizando as perdas de geração. Os dados apresentados e os resultados obtidos mostram que o impacto da manutenção da vazão ecológica é pequeno e representa menos de R\$ 16.280,00 por mês para Serra do Facão e R\$ 70.200,00 para Retiro Baixo. Outro fato a ser considerado é que UHEs com maiores reservatórios se apresentam com melhores condições de manter as vazões residuais com baixa redução da energia gerada ao longo do tempo. Ao final, conclui-se preliminarmente que a redução da geração pode ser considerada pequena e que possíveis ajustes no despacho de carga podem minimizar ainda mais essa perda. Sugere-se que sejam desenvolvidos novos estudos envolvendo um maior número de centrais e que se leve em consideração a possibilidade de incluir regras no despacho de carga contemplando as exigências ambientais de forma a minimizar ainda mais essa perda.

8 BIBLIOGRAFIA

- ABNT. (2015). Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 11212: Turbinas Hidráulicas para pequenas centrais hidrelétricas (PCH) – Elaboração de especificações técnicas – Procedimentos*. Brasília, DF, Brasil: ABNT.
- ABNT. (2016). Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6445: Turbinas Hidráulicas, turbinas-bombas e bombas de acumulação*. Brasília, DF, Brasil: ABNT.
- ABRAGEL. (2020). Associação Brasileira de Geração de Energia Limpa. Acesso em 17 de dezembro de 2020, disponível em <https://www.abragel.org.br/as-pchs/>
- Abreu, M. T. (Março de 2017). Evaluation of the Hydrometeorological Parameters on Sorocaba River Watershed – SP. 32. São Paulo, São Paulo, Brasil.
- ADASA. (2001). Agência Reguladora de Água, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. *Decreto nº 22358, 22359 de 2001, Resolução ADASA nº 350*.
- AESA. (1997). Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. *Decreto nº 19260*.
- AGERH. (2005). Agência Estadual de Recursos Hídricos. *Resolução Normativa do CERH nº 5*.
- AGUASPARANÁ. (2001). Instituto das Águas do Paraná. *Decreto nº 4646*.
- Alcázar, R. (2008). *Sustentabilidade de barragens e o planejamento de hidrelétricas na Bolívia*. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas: UNICAMP.
- Amaral C, A., & Prado Jr, F. A. (2000). *Pequenas Centrais Hidroelétricas no Estado de São Paulo*. São Paulo, São Paulo: Páginas & Letras Editora e Gráfica.
- ANA. (2011). Agência Nacional de Águas. *Outorga de direito de uso de recursos hídricos, VI, 50*. Brasília, DF, Brasil: ANA. Fonte: arquivos.ana.gov.br
- ANA. (2016). Agência Nacional de Águas. *Manual do empreendedor sobre segurança de barragens, VIII - Guia Prático de Pequenas Barragens, 120*. Brasília, DF, Brasil: ANA.
- ANA. (2020). Agência Nacional de Águas. *Outorga e Fiscalização*. Acesso em 17 de junho de 2020, disponível em <https://www.ana.gov.br/gestao-da-agua/outorga-e-fiscalizacao>
- ANA. (2020). Agência Nacional de Águas. *SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios*. Acesso em 25 de setembro de 2020, disponível em <https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>

ANA. (2020). Agência Nacional de Águas. *Barragens e Reservatórios*. Acesso em 31 de março de 2020, disponível em <<https://www.ana.gov.br/aguas-no-brasil/saiba-quem-regula/reservatorios>>

Andrade, A. (2017). *A Viabilidade Ambiental de Usinas Hidrelétricas e a Aplicação da Avaliação Ambiental Estratégica no Brasil*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE UFRJ, Rio de Janeiro.

Andrade, E. M., & Hawkins, R. H. (2000). Aplicação da função de Andrews na avaliação da regionalização de bacias em regiões áridas e semi-áridas. *5, 4*, 17-24. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*.

Andrade, L., & Carvalho, J. A. (2001). Análise da equação de Swamee-Jain para cálculo do fator de atrito. *5, 3*, 554-557. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*.

ANEEL. (2005). Agência Nacional de Energia Elétrica. *Cadernos Temáticos - Energia Assegurada*. Brasília, DF, Brasil: ANEEL.

ANEEL. (2008). Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas da Energia Elétrica do Brasil, 3 ed.*, 236. Brasília, DF, Brasil: ANEEL.

ANEEL. (2016). Agência Nacional de Energia Elétrica. *Micro e minigeração distribuída: Sistema de compensação de energia, II, 2 ed.*, 31. Brasília, DF, Brasil: ANEEL.

ANEEL. (2018). Agência Nacional de Energia Elétrica. *Relatório de acompanhamento de implantação de empreendimentos de geração*, 9. Brasília, DF, Brasil: ANEEL.

ANEEL. (2020). Agência Nacional de Energia Elétrica. *Matriz Energética do Brasil*. Acesso em 13 de março de 2020, disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>

APAC. (1998). Agência Pernambucana de Águas e Clima. *Decreto nº 20423*.

Ardizzon, G., Cavazzini, G., & Pavesi, G. (2014). A new generation of small hydro and pumped-hydro power plants: Advances and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 746-761.

Azevedo Netto, J. (1998). *Manual de Hidráulica* (9ª ed.). São Paulo: Edgard Blucher Ltda.

Balarim, C. (1996). *Avaliação expedita do custo de implantação de micro centrais hidrelétricas*. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas. Botucatu: UNESP.

Barrows, H. K. (1934). *Water Power Engineering*. New York and London: Mc Graw-Hill Book Company Inc.

Benetti, D., Lanna, E., & Cobalchini, S. (2003). Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 149-160.

Bobee, B., & Rasmussen, P. F. (1995). Recent advances in flood frequency analysis,. *Reviews of Geophysics*,, v,33 (S2), pp. p, 1111-1116. doi: <https://doi.org/10.1029/95RG00287>

BRASIL. (2000). Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos. Brasília, Distrito Federal, Brasil: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas.

BRASIL. (2007). *Ministério de Minas e Energia: Manual de inventário hidroelétrico de bacias hidrográficas*. Brasília, DF, Brasil: MME.

BRASIL. (2007). Plano Nacional de Energia 2030. Brasília, Distrito Federal, Brasil: Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, Empresa de Pesquisa Energética.

BRASIL. (2017). Portaria nº 318. Brasília, Distrito Federal, Brasil: Ministério de Minas e Energia.

BRASIL. (2019). Ministério de Minas e Energia: Balanço Energético Nacional 2019. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, Empresa de Pesquisa Energética.

BRASIL. (s.d.). Governo do Brasil. *Fontes de energia renovável na matriz elétrica brasileira*. Brasília, DF, Brasil: Governo do Brasil. Acesso em 13 de março de 2020, disponível em <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira>

Brikć, D. (2011). Review of explicit approximations to the Colebrook relation for flow friction. *24*, 1379–1383. *Applied Mathematics Letter*.

Brown, G. O. (2002). The History of the Darcy-Weisbach Equation for Pipe Flow Resistance. 24-42. Washington DC, US: Proceedings of the 150 th Anniversary Conference of ASCE.

Brusa, C. L. (2004). Aprimoramento Estatístico da Regionalização de Vazões Máximas e Médias: Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Buenaga, F. V. (2019). Alternativa Metodológica para definição da vazão ecológica em terços de vazão reduzida em hidrelétricas. *Tese de doutorado*, 300p. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE.

Canales, F., Beluco, A., & Mendes, C. (2015). Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 1230-1249.

- Caus, R., & Michels, A. (2014). *Energia Hidrelétrica: Eficiência na Geração*. Universidade Federal de Santa Maria, Faculdade de Engenharia. Santa Maria: UFSM.
- CBIE. (s.d.). Centro Brasileiro de Infraestrutura. *Quantas geradoras de energia temos no Brasil*. Acesso em 25 de junho de 2020, disponível em <https://cbie.com.br/artigos/quantas-usinas-geradoras-de-energia-temos-no-brasil>
- CCEE. (2021). Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. *Preço de Liquidação das Diferenças - PLD*. Fonte: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/preco_horario.
- CERH. (2010). Conselho Estadual de Recursos Hídricos. *Resolução nº 10*.
- CERPCH. (s.d.). Central Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas. *Definições Ambientais*. Itajubá, MG, Brasil. Acesso em 16 de junho de 2020, disponível em <https://cerpch.unifei.edu.br/pch.php>
- CERPCH. (s.d.). Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas. *Manual de Pequenas Centrais Hidrelétricas*. Acesso em 1 de abril de 2020, disponível em <https://www.cerpch.unifei.edu.br/>
- CGE Alstom. (1996). Relatório de comissionamento da UHE de Perimbó para Industrias Klabin S/A: Igaras Papeis e Embalagens S/A. Petrolândia.
- Chow, V. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill Book Company Inc.
- Colebrook, C. F. (1939). Turbulent flow in pipes with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. 12, 393-422. Proc. Institution Civil Engrs.
- Colebrook, C. F., & White, C. M. (1937). Experiments with fluid-friction in roughened pipes. 367-381. Experiments with fluid-friction in roughened pipes.
- Collischonn, W., Agra, S., Freitas, G., & Priante, G. (Janeiro de 2006). Da vazão ecológica ao hidrograma ecológico. Rio Grande do Sul, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- COPEL. (2018). Companhia Paranaense de Energia. *Relatório de Impacto Ambiental - Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Salto Alemã, Rio Chopim – PR*, 66. Curitiba, PR, Brasil.
- Costa, W. (2018). *Geologia das Barragens*. São Paulo, SP, Brasil: Oficina de Textos.
- Creager, W., & Justin, J. (1950). *Hydroelectric Handbook*. (2ª edição). New York: John Wiley e Sons, Inc.
- Cruz, J. C., & Tucci, C. (Janeiro de 2008). Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. 12, 1, 111-124. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos.

Cunha, B. N. (2019). *Modelagem da qualidade de água no Rio São Marcos, situado na bacia hidrográfica do Alto Paraná*. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil. Uberlândia: UFU.

Curado, L. (2003). *Indicadores de vazões mínimas de referência em sub-bacias do rio Miranda*. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Centro de Ciências Exatas e Tecnologias. Campo Grande: UFMS.

DAEE. (1996). Departamento de Águas e Energia Elétrica. *Decreto nº 41258*.

DAEE. (2005). Departamento de Águas e Energia Elétrica. *Guia prático para pequenas obras hidráulicas, 2ª*, 116. São Paulo, SP, Brasil.

Dandekar, M., & Sharma, K. (2013). *Water Power Engineering* (Second ed.). New Delhi, Índia: Vikas Publishing House PVT Ltd.

Darcy, H. (1857). *Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux*. 268 p. Paris: Mallet-Bachelier.

DFID. (2003). Department for International Development . *Handbook for the Assessment of Catchment Water Demand and Use*. Zimbabwe.

Doland, J. (1954). *Hydro Power Engineering*. New York: The Ronald Press Company.

Eck, B. (1973). *Technische Stromungslehre*. New York, United States: Springer.

Eduardo, C. (2018). *Escolha do Tipo de Turbina*. Nota de aula, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande.

ELETROBRAS. (1985). *Metodologia para regionalização de vazões. v, 1*. Rio de Janeiro.

ELETROBRAS. (2000). Centrais Elétricas Brasileiras S.A. *Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas*, 458. Brasília, DF, Brasil: Ministério de Minas e Energia.

ELETROBRAS. (2020). Centrais Elétricas Brasileiras S.A. *Barragem de Hidrelétrica*. Acesso em 16 de junho de 2020, disponível em <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Barragem-de-Hidreletrica.aspx>

ELETROBRAS. (2020). Centrais Elétricas Brasileiras S.A. *Manuais e diretrizes para estudos e projetos*. Acesso em 16 de junho de 2020, disponível em <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>

ELETROBRÁS S.A. (1985). *Metodologia para regionalização de vazões. 1*. Rio de Janeiro, Brasil: ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

Encina, A. (2006). *Despacho ótimo de unidade geradoras em sistemas hidrelétricos via heurística baseada em relaxação lagrangeana e programação dinâmica*.

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia de Sistemas. Campinas: UNICAMP.

Encinas, M. (1975). *Turbomáquinas Hidráulicas*. Cidade do México: Limusa.

EPE. (2008). Empresa de Pesquisa Energética. *Nota Técnica DEN 03/08 - Considerações sobre repotenciação e modernização de usinas hidrelétricas*, 38. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Ministério de Minas e Energia.

EPE. (2020). Empresa de Pesquisa Energética. *Matriz energética e elétrica*. Acesso em 10 de março de 2020, disponível em <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>

Facuri, M. (2004). *A implantação de usinas hidrelétricas e o processo de licenciamento ambiental: A importância da articulação entre os setores elétrico e de meio ambiente no Brasil*. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá: UNIFEI.

Fadigas, E. (2015). *Geração Hidrelétrica*. Universidade de São Paulo. São Paulo: USP.

Faria, A. (2017). *Projeto de turbina hidrocínética de fluxo axial e eixo horizontal para a geração de baixas potências*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica. Rio de Janeiro: UFRJ.

FEMARH. (2007). Fundação Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. *Decreto nº 8123-E*.

Fennessey, N., & Voguel, R. M. (1990). Regional flow duration curves for ungauged sites in Massachusetts. *Vol, 116, nº 4*, 530-549. *Journal of Water Resources Planning and Management*.

FEPAM. (1996). Fundação Estadual de Proteção Ambiental da Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. *Decreto nº 37033*.

FIBRAGEL. (s.d.). *Comportas*. Acesso em 06 de junho de 2020, disponível em <http://www.fibragel.com.br/peca.php>

Filho, D. (2003). *Dimensionamento de Usinas Hidroelétricas Através de Técnicas de Otimização Evolutiva*. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos: USP.

Fill, H. H. (1987). *Informações hidrológicas, In Modelos para gerenciamento de recursos hídricos*,. São Paulo: Nobel/ABRH.

Flórez, R. (2014). *Pequenas Centrais Hidrelétricas*. São Paulo, SP, Brasil: Oficina de Textos.

FLUENGE ENGENHARIA DE FLUIDOS. (2019). Glycon Pena de Souza Barros – informação pessoal Belo Horizonte. Fonte: fluenge.com.br

Fujie, A., Keretch, G., & Souza, R. (2016). Projeto de implantação da microcentral hidrelétrica de Rio Branco do Sul. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Fonte: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10087/1/CT_COELE_2016_1_12.pdf

FURNAS. (2014). Sistema Furnas - ELETROBRAS. *Usinas Hidrelétricas*. ELETROBRAS.

FURNAS. (2020). Sistema Furnas - ELETROBRAS. *Usina de Serra do Facão*. Acesso em 17 de julho de 2020, disponível em <https://www.furnas.com.br/serradofacao/?culture=pt>

FURNAS. (2020). Sistema Furnas - ELETROBRAS. *Usina de Retiro Baixo*. Acesso em 17 de julho de 2020, disponível em <https://www.furnas.com.br/subsecao/131/usina-retiro-baixo---82-mw?culture=pt>

Gasques, F. C., Neves, L. G., Santos, D. J., Mauad, F. F., & Okawa P, M. C. (2018). Regionalização de Vazões Mínimas – Breve Revisão Teórica. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*.

Glossary Capacity Factor. (s.d.). Acesso em 16 de Janeiro de 2021, disponível em <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/capacity-factor-net.html>

Gomes, C. (2010). *Noções de geração de energia usando algumas fontes de baixo impacto ambiental*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica. Rio de Janeiro: UFRJ.

GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. (2008). Relatório Técnico: Estudo Para Otimização Da Usina Hidroelétrica Perimbó. Taubaté.

Haas, L. (2002). Water, wetlands and climate change. *Mediterranean Water Resources Planning and Climate Change Adaptation*. Athens, Greece: IUCN Mediterranean Regional Roundtable.

Helerbrock, R. (2020). *Usinas e Eletricidade*. Fonte: Brasil Escola: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/usinas-eletricidade.htm>.

Henn, É. (2012). *Máquinas de Fluido* (3ª ed.). Santa Maria, RS, Brasil: UFSM.

Hoechstetter, S., Hüttl, R., Bens, O., & Bismuth, C. (2016). *Society Water-Technology: A critical appraisal of major water engineering projects* (1 ed.). London: Springer Open.

Holder R, P. (2005). Avaliação da Viabilidade de Utilização de Grupos Geradores Acionados Por Bombas Funcionando Como Turbinas no Sistema Elétrico Interligado. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Minas Gerais.

Hosking, J. R., & Wallis, J. R. (1997). Regional frequency analysis, An approach based on L-moments,. *Cambridge University Press, UK*,. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/cbo9780511529443>

ICOLD. (2006). International Commission On Large Dams. *The dams newsletter. Role of dams in the 21th century*(Bulletin No. 5), p. 20.

IGAM. (2001). Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Decreto nº 41578*.

IGARN. (1997). Instituto de Gestão das Águas do Rio Grande do Norte. *Decreto nº 13283*.

IMAC. (2010). Resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente, Ciência e Tecnologia - CEMACT, nº 004.

IMAP. (2017). Instituto de Meio Ambiente e Ordenamento Territorial do Amapá. *Resoluções IMAP nº 008 e 009*.

IMASUL. (2014). Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul. *Decreto nº 13990*.

INEA. (2007). Instituto Estadual do Ambiente. *Portaria SERLA nº 567*.

INEMA. (2014). Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. *Resolução CONERH nº 96*.

IPAAM. (2016). Instituto de proteção ambiental do Amazonas. *Resoluções CERH-AM nº01 e 02 e Portaria normativa/SEMA/IPAAM nº01/2016*.

Júnior, A. (2000). *“A turbina de fluxo cruzado (Michell - Banki) como opção para centrais hidráulicas de pequeno porte*. Universidade de São Paulo, Faculdade de Engenharia. São Paulo: USP.

Junior, C. (2016). *Verificação de roteiro de cálculos para dimensionamento de rotor para turbina tipo Francis*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica. Garapava: UTFP.

KELMAN, J., KELMAN, R., PEREIRA, M, V, F. (jan./mar de 2004). Energia firme de sistemas hidrelétricos e usos múltiplos dos recursos hídricos,. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 189-198.

Kelman, J., Kelman, R., & Pereira M, V. F. (Janeiro de 2004). Energia firme de sistemas hidrelétricos e usos múltiplos dos recursos hídricos. *v, 9., nº 1*, 189-198. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*.

Lima, A. A. (2018). Metodologia para análise da redução da capacidade de geração de energia em Pequenas Centrais Hidrelétricas. *Tese de Doutorado*. Universidade Federal de Minas Gerais.

Linsley, R., & Franzini, J. (1978). *Engenharia de Recursos Hídricos* . São Paulo: McGraw-Hill do Brasil Ltda.

Longhi, E., & Formiga, K. (2011). Metodologias de determinação de vazão ecológica em rios. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 33-48.

Lopes, J., & Santos, R. (2002). *Capacidade de Reservatórios*. Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo: USP.

Luz, L. D., Amorin, F. B., Proença, C., & Pires, A. S. (2004). VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. *Vazões mínimas e vazões ecológicas - Qual a necessidade de água em um rio?* São Luís, MA, Brasil: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Mattos, M. T. (2014). Aplicação da simulação de habitats físicos para avaliar vazões ecológicas em um riacho de mata atlântica do sudeste do Brasil: Um estudo piloto. *Dissertação de mestrado*. Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Méllo, A., & Bonnacarrere, J. (2010). *Projeto de Pequena Barragem – Aspectos Hidrológicos*. Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. São Paulo: USP.

Mendes, L. (2007). Análise dos critérios de outorga de direitos de usos consuntivos dos recursos hídricos baseados em vazões mínimas e de vazões de permaências. São Paulo, São Paulo, Brasil: Universidade de São Paulo.

National Biologic Service. (1995). U.S. Department of The Interior - National Biologic Service. *The Instream Flow Incremental Methodology. A primer for IFIM*. (C. Stalnaker, B. L. Lamb, J. B. Henriksen, & J. Barthlow, Eds.) Washington: NBS.

NATURATINS. (2005). Instituto de Natureza do Tocantins. *Decreto nº 2432*.

Oliveira, B. (2017). *Conhecendo os componentes da usina hidrelétrica*. São Paulo, SP, Brasil: Oficina de Textos.

Oliveira, F., Cardinot, F. G., L, S. L., Catharino, M., Rezende, P., & Almeida, R. (2005). *Determinação do período crítico do sistema interligado nacional*. Curitiba, PR, Brasil: XVIII SNPTEE -Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.

ONS. (2000). Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Quantificação da evaporação líquida*. Brasília, DF, Brasil: ONS.

ONS. (s.d.). Operador Nacional do Sistema Elétrico. *O que é o SIN? Sistema Interligado Nacional*. Brasília, DF, Brasil. Acesso em 25 de junho de 2020, disponível em <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>

ONS. (s.d.). Operador Nacional do Sistema Elétrico. *O que é o ONS?* Brasília, DF, Brasil: ONS. Acesso em 25 de março de 2020, disponível em <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>

Paiva, J. d. (2003). *Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas* (1ª ed.). Porto Alegre, RS, Brasil: ABRH.

- Pelissari, V. B.; Sarmiento, R.; Teixeira, R. L. (2001). *Vazão ecológica a ser considerada no licenciamento ambiental dos sistemas de abastecimento de água*. João Pessoa: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Pereira, B. (2015). *Modelagem matemática para otimização de um potencial hidráulico utilizando turbinas Francis e Kaplan*. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia. Guaratinguetá: UNESP.
- Pereira, P. (2015). *Projeto de usinas hidrelétricas passo a passo*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Pessanha, C., & Ávila, L. (2011). *Retificação do canal coqueiros – trecho: Rio Paraíba do Sul – Rua Raul Abbot Escobar*. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Departamento de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes: UENF.
- Pinto, V., Ribeiro, C., & Silva, D. (2016). Vazão ecológica e o arcabouço legal brasileiro. *v, 9, n. 1*, 091-109. *Revista Brasileira de Geografia Física*.
- Piol, M. V., Reis, J. A., Caiado, M. A., & Mendonça, A. S. (2019). Performance evaluation of flow duration curves regionalization methods. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos Brazilian Journal of Water Resources Versão On-line*, *v. 24, e9*, p. 13. doi:10.1590/2318-0331.241920170202
- Poff, N., Allan, J., Bain, M., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B., . . . Stromberg, J. (1997). The Natural Flow Regime. *Bioscience* *47*, 769-784.
- Polli, J., & Reis, H. (2015). *Projeto de implantação da Microcentral hidroelétrica de Roncador*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica. Curitiba: UTFPR.
- PXL SEALS. (s.d.). Turbina Pelton. Acesso em 17 de dezembro de 2020, disponível em <https://www.pxlseals.com/br/turbina-pelton>
- Ramage, J., & Everett, B. (1996). *Hydroelectricity: Renewable e energy power for a sustainable future*. Oxford: Oxford University Press.
- Ramos, D., & Grimoni, J. (2012). *Produção de Energia Elétrica*. São Paulo: Ed. 2012.
- Rao, A. R., & Srinivas, W. (2006). Regionalization of watersheds by hybrid-cluster analysis. *Journal of hydrology*, *V381, n1*, pp. p36-56. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.003
- RBE. (2020). Retiro Baixo Energética. *Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo*. Felixlândia, MG, Brasil. Acesso em 24 de setembro de 2020, disponível em <http://www.rbe.com.br/>
- Reis, L. (2003). *Geração de Energia Elétrica: Tecnologia, Inserção Ambiental, Planejamento, Operação e Análise de Viabilidade (2ª ed.)*. Barueri, SP, Brasil: Manole.
- Richter, B., Baumgartner, J., Powell, J., & Braun, D. (1996). Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conservation Biology* *10*, 1163-1174.

Richter, B., Mathews, R., Harrison, D., & Wigington, R. (2003). Ecologically Sustainable Water Management: Managing River Flows for Ecological Integrity. *Ecological Applications* 13, 206-224.

Salkauskas, C. (1981). *Contribuição ao dimensionamento hidráulico dos canais trapezoidais e canais de contorno fechado*. São Paulo, SP, Brasil: Governo do Estado de São Paulo.

Santilli, J. (2007). Aspectos Jurídicos da Política Nacional de Recursos Hídricos. 19p.

Santos, P. V., & Cunha, A. C. (Abril de 2013). Outorga de Recursos Hídricos e Vazão Ambiental no Brasil: Perspectivas Metodológicas Frente ao Desenvolvimento do Setor Hidrelétrico na Amazônia. v. 18, n. 3, 81-95. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos.

Sarmiento, R. (2007). Estado da arte da vazão ecológica no Brasil e no mundo. 38p. UNESCO/ANA/CBHSF.

SDS. (2006). Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável. *Decreto nº 4778*.

SECIMA. (2005). Secretaria do Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos do Estado de Goiás. *Resolução CERH nº 09 e Instrução Normativa nº 12*.

SEDAM. (2004). Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental. *Decreto nº 10114, Portaria SEDAM nº 38*.

SEFAC. (2020). Serra do Facão Energia. *Ficha técnica - Usina Hidrelétrica de Serra do Facão*. Acesso em 26 de fevereiro de 2020, disponível em <http://sefac.com.br/energia/ficha-tecnica/>

SEMA. (2007). Secretaria de Estado do Meio Ambiente. *Decreto nº 336*.

SEMA. (2011). Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. *Decreto nº 27845*.

SEMAR. (2004). Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. *Decreto nº 11341, Resolução CERH nº 4*.

SEMARH. (1999). Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. *Decreto nº 18456*.

SEMARH. (2001). Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. *Decreto nº 6, 23 de janeiro de 2001*.

Simeone, G., & Cruz, E. (2009). *Centrais de Aproveitamentos hidroelétricos. Uma Introdução ao estudo* (1ª ed.). São Paulo, SP, Brasil: Editora Érica.

Souza, C., Júnior, C., & Giacomoni, M. (2004). VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. *Vazão ecológica constante vs. vazão ecológica variável*. Maceió, AL, Brasil: UFAL.

Souza, Z., Santos, A., & Bortoni, E. (2018). *Centrais Hidrelétricas - Implantação e Comissionamento* (3ª ed.). Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Interciência.

SRH. (1994). Secretaria dos Recursos Hídricos. *Decreto nº 23067*.

Stahlhoefer, M. (2013). *Estudo Econômico para Repotencialização da Micro Central Roncador*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Mecânica. Curitiba: UTFPR.

Tharme, R. E. (2003). A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *v. 19*, 397-442. *River Research and Applications*.

The World Bank. (2003). Technical Note C1. *Environmental flows: concepts and methods*. Washington, US.

Umans, S., & Kingsley, C. (2014). Machinery, Fitzgerald & Kingsley's Electric. *7th edition*. New York: McGraw-Hill Global Educations Holdings, LLC.

USP. (s.d.). Universidade de São Paulo. *Comportas*. Acesso em 15 de junho de 2020, disponível em <http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo2B/Hidraulica/comportas.htm>

Vestena, L. R., Oliveira, E. D., Cunha, M. C., & Thomaz, E. L. (2012). Vazão ecológica e disponibilidade hídrica na bacia das Pedras. *v. 7, n. 3*, 212-227. Guarapuava, Paraná, Brasil: Ambi-Agua; Taubaté.

Viana, F. G., & Viana, A. N. (2004). *Micro centrais hidrelétricas: alternativa às comunidades rurais isoladas*. Universidade Estadual de Campinas, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético. Campinas: UNICAMP.

Voith Hydro Holding GmbH & Co. KG. (2021). Bulb/Pit/S-Turbines and Generators. Heidenheim, Germany.

WCD. (2000). World Commission on Dams. *Dams, ecosystem functions and environmental restoration*. Vlaeberg, South Africa: Secretariat of the World Commission on Dams. Fonte: <http://www.dams.org>

WCD. (2000). World Commission on Dams. *Dams and development of a new framework for decision making*. Vlaeberg, South Africa: Secretariat of the World Commission on Dams. Fonte: www.dams.org

Zhou, D., Gui, J., Deng, Z. D., Chen, H., Yu, Y., Yu, A., & Yang, C. (18 de maio de 2019). Development of an ultra-low head siphon hydro turbine using computational fluid dynamics. *Energy* *181*, 43-50. Science Direct. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.060>

