



Universidade Federal de Itajubá
Mestrado Profissional em Rede Nacional em
Gestão e Regulação de Recursos Hídricos

WESLEY MAIA CARDOSO

INDICADORES AMBIENTAIS E SOCIOECONÔMICOS COMO CRITÉRIO PARA
ANÁLISE DE VAZÕES MÍNIMAS RESIDUAIS DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS
DE DERIVAÇÃO DE FLUXO: ESTUDO DE CASO DA PCH INHAPIM - MG

Área de concentração:

Instrumentos da Política de Recursos Hídricos

Projeto de pesquisa vinculado a linha:

Metodologias para implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos

Orientador: Prof. Dr. James Lacerda Maia

Coorientador: Prof. Dr. José Augusto Costa Gonçalves

ITABIRA – MINAS GERAIS

2023

WESLEY MAIA CARDOSO

INDICADORES AMBIENTAIS E SOCIOECONÔMICOS COMO CRITÉRIO PARA
ANÁLISE DE VAZÕES MÍNIMAS RESIDUAIS DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS DE
DERIVAÇÃO DE FLUXO: ESTUDO DE CASO DA PCH INHAPIM - MG

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Área de concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos. Linha de pesquisa: Metodologias para implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos.

Orientador: Prof. Dr. James Lacerda Maia.

Coorientador: Prof. Dr. José Augusto Costa Gonçalves.

ITABIRA - MINAS GERAIS
2023

INDICADORES AMBIENTAIS E SOCIOECONÔMICOS COMO CRITÉRIO PARA
ANÁLISE DE VAZÕES MÍNIMAS RESIDUAIS DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS DE
DERIVAÇÃO DE FLUXO: ESTUDO DE CASO DA PCH INHAPIM – MG

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Área de concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos. Linha de pesquisa: Metodologias para implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. James Lacerda Maia

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, UNIFEI

Coorientador: Prof. Dr. José Augusto Costa Gonçalves

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, UNIFEI

Prof.(a) Dr.(a) Liliane Lazzari Albertin

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP

Prof.(a) Dr.(a) Ana Carolina Vasques Freitas

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, UNIFEI

Itabira, Minas Gerais, 22 de agosto de 2023.

DEDICATÓRIA

Dedico a minha família, em especial a minha esposa Sara e
aos nossos filhos Arthur e Augusto.

AGRADECIMENTOS

Do início da minha jornada até o presente momento, agradeço a Deus pelo dom da vida e pela força e coragem ofertadas nos momentos de fraqueza e dificuldades.

Em especial, agradeço a minha esposa, Sara de Oliveira Almeida Cardoso, pela cumplicidade, presença, incentivo e doação, coisas incondicionais e inestimáveis que, dentre outras, só o amor nos proporciona.

Agradeço aos meus filhos, Arthur e Augusto, que, mesmo sem saber, me motivam, me encorajam e me dão forças para me tornar uma pessoa melhor e completam a dádiva de ser pai.

Ao meu Pai, Jairo, e a minha mãe, Edilce, agradeço a vida recebida, a dedicação e o amor de sempre. Ao meu irmão, Welton, por todo o carinho e incentivo, foram várias as caminhadas até aqui.

Ao Sr. Francisco, Dona Maristela e meus cunhados, Bernardo e Rodrigo (*in memoriam*), que nunca deixaram de acreditar e sempre se fizeram presentes, o meu mais sincero obrigado.

Aos amigos do Grupo de Casais, agradeço pela compreensão e tolerância pela minha ausência, o incentivo nesta caminhada foi fundamental para chegar até aqui.

Sou grato aos amigos e colegas da Supram, do IEF e do IGAM que, talvez ainda que sem saber, sempre me incentivaram na busca e na valorização do conhecimento.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. James Lacerda Maia e o Prof. Dr. José Augusto Costa Gonçalves, agradeço pela compreensão, apoio e colaboração no desenvolvimento deste projeto.

A Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), ao corpo técnico e aos docentes, agradeço pela oportunidade, pelos ensinamentos e aprendizados durante todo o curso.

Sou grato a todos os colegas de turma, em especial, Diego, Elisa, Geovane, Januária, Lúcia, Romário e Tiago, pois, com o apoio de todos vocês, a tarefa foi menos árdua.

Agradeço ainda a todos os familiares e amigos que direta ou indiretamente se fizeram presentes e que, de alguma forma, contribuíram em toda essa caminhada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), Projeto CAPES/ANA AUXPE N°. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

RESUMO

CARDOSO, Wesley Maia. **Indicadores ambientais e socioeconômicos como critério para análise de vazões mínimas residuais de centrais hidrelétricas de derivação de fluxo: estudo de caso da PCH Inhapim - MG.** 2023. 90 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2023.

O estabelecimento da vazão residual a jusante de centrais hidrelétricas de derivação de fluxo em operação constitui critério de análise para obtenção da outorga de direito de uso dos recursos hídricos, devendo ser considerado o relacionamento operacional junto ao Operador Nacional do Sistema (ONS), conforme procedimentos estabelecidos pela Resolução Conjunta SEMAD/IGAM n. 1.768, de 30 de novembro de 2012. Entretanto, em Minas Gerais, mais de 80% das centrais hidrelétricas em operação não possuem relacionamento operacional junto ao ONS, dentre estas, as que se enquadram na modalidade de adução de vazão por derivação de fluxo. O objetivo desse estudo consistiu em propor uma metodologia para avaliar, no contexto do procedimento administrativo de outorga de direito de uso de recursos hídricos, a vazão mínima residual no trecho de vazão reduzida (TVR) de centrais hidrelétricas, na modalidade de captação em derivação, que não possuem as condições operacionais aprovadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) ou pelo ONS, de modo a atender os quesitos da Resolução Conjunta SEMAD/IGAM n. 1.768/2012. A metodologia do trabalho contemplou o levantamento da disponibilidade energética da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Inhapim, quando da adoção de percentuais de 30 e 50% das vazões de referência ($Q_{7,10}$) no TVR desta, e na elaboração e utilização de indicadores ambientais e socioeconômicos que possuem correlação ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7 da Agenda 2030 para comparação entre os cenários de vazões variáveis no TVR da PCH Inhapim frente ao parque gerador hidráulico de Minas Gerais e do Brasil. O cálculo da disponibilidade energética da PCH Inhapim compreendeu ainda a comparação entre a vazão adotada no Estudo de Regionalização de Vazão da Bacia do Rio Doce (ANA/IGAM, 2022), conforme determina a Portaria IGAM n. 32, de 06 de setembro de 2022, e a vazão obtida pelo método de regionalização de vazões por meio da seleção do modelo de regressão linear das vazões de referência dos postos fluviométricos da bacia do rio Caratinga. Os resultados da pesquisa apontam que o incremento da disponibilidade energética, em função da adoção de percentuais inferiores a 100% da vazão mínima de referência no TVR, permite potencializar expressivamente os impactos positivos causados pela implantação de centrais hidrelétricas de derivação de fluxo para os reservatórios na modalidade de operação a fio d'água quando comparada à modalidade de operação por meio da regularização de vazões. Tal análise permitiu ainda a adoção de um modelo comparativo para auxiliar o processo de tomada de decisão para a seleção de arranjos tecnológicos que proporcionem o atendimento às metas do ODS 7 da Agenda 2030, quando não envolvidas restrições de vazões ecológicas para o TVR.

Palavras-chave: Vazão residual; Centrais hidrelétricas; Derivação de fluxo; TVR; Outorga de direito de uso; PCH Inhapim.

ABSTRACT

CARDOSO, Wesley Maia. **Environmental and socioeconomic indicators as a criterion for analysis of minimum residual flows of flux derivation hydroelectric plants: case study of PCH Inhapim - MG.** 2023. 90 p. Dissertation (Professional Master's Degree in National Network for Water Resources Management and Regulation - ProfÁgua), Institute of Pure and Applied Sciences, Federal University of Itajubá (UNIFEI), Itabira Campus, Minas Gerais, Brazil, 2023.

The establishment of the residual flow of flux derivation hydroelectric plants in operation constitutes an analysis to obtain the grant of the right to use water resources, and the operational relationship with the National System Operator (NSO) must be considered, according to procedures established by Joint Resolution SEMAD/IGAM n. 1,768, of November 30, 2012. However, in Minas Gerais, more than 80% of the hydroelectric power plants in operation do not have an operational relationship with the NSO, among these, those that fit the modality of adduction of flow by flux derivation. The objective of this study is to propose a methodology to evaluate, in the context of the administrative procedure for granting the right to use water resources, the minimum residual flow in the reduced flow stretch (RFS) of hydroelectric plants, in the form of abstraction in derivation, which does not have the operational conditions approved by the National Electric Energy Agency (NEEA) or by the NSO, in order to meet the requirements of Joint Resolution SEMAD/IGAM n. 1,768/2012. The methodology of the work contemplates the survey of the energy availability of the Small Hydroelectric Plant (SHP) Inhapim, when selected percentages of 30 and 50% of the reference flows ($F_{7,10}$) in the RFS of this one, and in the elaboration and use of indicators environmental and socioeconomic that have correlation the Sustainable Development Goal (SDG) 7 of the 2030 Agenda to compare the scenarios of variable flows in the RFS of SHP Inhapim front of the hydraulic generator park of Minas Gerais and Brazil. The calculation of the energy availability of the SHP Inhapim also included the comparison between the flow adopted in the Study of Regionalization of Flow of the Rio Doce Basin (ANA/IGAM, 2022), as determined by Ordinance IGAM n. 32, of September 6, 2022, and the flow achieved by the method of regionalization of flows through the selection of the linear regression model of the reference flows of the fluvioimetric stations of the Caratinga river basin. The research results indicate that the increase in energy availability, due of the selection of percentages lower than 100% of the minimum reference flow in the RFS, allows potentializing expressively the positive impacts caused by the implantation of hydroelectric power plants of flux derivation for the reservoirs in the run-of-river mode of operation when compared to the mode of operation through flow regularization. This analysis also allowed the adoption of a comparative model to assist the decision-making process for the selection of technological arrangements that provide the fulfillment of the goals of SDG 7 of the 2030 Agenda, when not involving restrictions of ecological flows for the RFS.

Keywords: Residual flow; Hydroelectric plants; Flux derivation; RFS; Grant of right of use; SHP Inhapim.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura Institucional do Setor Elétrico Brasileiro (SEB).....	25
Figura 2 - Classificação de centrais hidrelétricas quanto à forma de captação: (a) leito do rio ou represamento; (b) desvio; e (c) derivação de fluxo.	30
Figura 3 - Esquema de vazões de uma central hidrelétrica de derivação de fluxo no período de excedente hídrico.	32
Figura 4 - Esquema de vazões de uma central hidrelétrica de derivação de fluxo no período de estiagem.	32
Figura 5 - Delimitação da bacia hidrográfica do rio Caratinga no interior da Circunscrição Hidrográfica DO5.	37
Figura 6 - Delimitação das principais sub-bacias da Circunscrição Hidrográfica DO5.....	38
Figura 7 - Arranjo físico da PCH Inhapim.	40
Figura 8 - Fluxograma com as etapas do trabalho.....	42
Figura 9 - Delimitação da bacia hidrográfica do rio Caratinga e da área de drenagem da PCH Inhapim.	57
Figura 10 - Delimitação da bacia hidrográfica do rio Caratinga e da área de drenagem da PCH Inhapim.	60

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Número de empreendimentos de aproveitamento hidrelétrico e capacidade instalada em relação às condições operacionais e % de equivalência em relação às fontes térmicas.	21
Gráfico 2 - Comparação entre os dados percentuais de participação das fontes de energia e capacidade instalada entre 2012 e 2021.	28
Gráfico 3 - Dados estatísticos de desempenho da matriz elétrica brasileira na comparação 2021/2020.	29
Gráfico 4 - Equação de regressão linear das vazões de referência ($Q_{7,10}$) da bacia hidrográfica do rio Caratinga entre os postos fluviométricos selecionados.....	61
Gráfico 5 - Análise comparativa do desempenho dos indicadores frente ao parque gerador nacional.....	76
Gráfico 6 - Desempenho percentual da eficiência do fator de capacidade do parque gerador hidrelétrico estadual (PGH Minas Gerais) e da PCH Inhapim frente ao parque gerador hidrelétrico nacional para o ano civil.	78
Gráfico 7 - Desempenho percentual da eficiência do fator de capacidade do parque gerador hidrelétrico estadual (PGH Minas Gerais) e da PCH Inhapim frente ao parque gerador hidrelétrico nacional para o período seco.	79
Gráfico 8 - Desempenho percentual da relação entre a geração hidráulica no período seco e o período anual do parque gerador hidrelétrico estadual (PGH Minas Gerais) e da PCH Inhapim frente ao parque gerador hidrelétrico nacional.	80
Gráfico 9 - Desempenho percentual da redução de emissão de GEE no período seco (abril a setembro de 2021) por geração hidráulica frente ao parque gerador termelétrico do Brasil....	81
Gráfico 10 - Desempenho percentual redução da retirada de água por capacidade instalada de geração hidráulica em relação à retirada de água por capacidade instalada de geração termelétrica do parque nacional.....	82
Gráfico 11 - Desempenho percentual da relação da parcela do PIB gerada pela OIEE a partir de fonte hidráulica em relação à parcela do PIB gerada pela OIEE a partir de outras fontes de energia frente ao parque gerador hidrelétrico nacional.	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vazão ecológica indiretamente estabelecida pela vazão máxima outorgável adotada no procedimento administrativo de outorga.	49
Quadro 2 - Índice de Relação do Fator de Capacidade da Geração Hidráulica Anual.....	52
Quadro 3 - Índice de Relação do Fator de Capacidade da Geração Hidráulica no Período Seco.	53
Quadro 4 - Índice de Relação entre a Geração Hidráulica do Período Seco sobre o Anual.....	53
Quadro 5 - Índice de Redução da Emissão GEE no Período Seco.....	54
Quadro 6 - Índice de Redução de Retirada de Água para Geração Térmica.....	55
Quadro 7 - Índice da Parcela do PIB de Fonte Hidráulica sobre Fonte Complementar.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados estatísticos da matriz elétrica brasileira (ano base 2021).....	27
Tabela 2 - Dados energéticos e socioeconômicos disponibilizados pelo SEB em 2022.....	51
Tabela 3 - Características físicas dos conjuntos das unidades geradoras e os dados construtivos e hidráulicos operacionais da PCH Inhapim.....	58
Tabela 4 - Série de vazões médias mensais no ponto de intervenção da PCH Inhapim.	58
Tabela 5 - Postos fluviométricos selecionados para pesquisa e suas respectivas vazões de referência.....	59
Tabela 6 - Postos fluviométricos selecionados após o processamento.....	60
Tabela 7 - Postos fluviométricos selecionados para pesquisa e suas respectivas vazões de referência.....	61
Tabela 8 - Disponibilidade energética calculada em função dos cenários da vazão de referência $Q_{7,10}$ no TVR da PCH Inhapim.....	63
Tabela 9 - Somatória da disponibilidade energética e incremento de energia calculado em função dos cenários das vazões de referência no TVR da PCH Inhapim.....	64
Tabela 10 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período completo do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada no parque gerador hidráulico nacional.	65
Tabela 11 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada no parque gerador hidráulico nacional.	65
Tabela 12 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a energia bruta gerada no período completo do ano civil no Brasil..	65
Tabela 13 - Índice de redução de emissão de GEE por capacidade instalada de geração hidráulica no período seco em relação à emissão de GEE por capacidade instalada de geração térmica no Brasil.....	66
Tabela 14 - Índice de referência da redução do consumo de água por capacidade instalada de geração hidráulica em relação ao consumo de água por capacidade instalada de geração térmica no Brasil.....	67
Tabela 15 - Índice de referência da parcela do PIB gerada pela OIEE a partir de fonte hidráulica em relação a parcela do PIB gerada pela OIEE a partir de outras fontes de energia no Brasil.	67

Tabela 16 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período completo do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada no parque gerador hidráulico de MG sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional.....	68
Tabela 17 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período completo do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada no parque gerador hidráulico de MG sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional.....	68
Tabela 18 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a energia bruta gerada no período completo do ano civil no parque gerador hidráulico de MG sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional.	69
Tabela 19 - Índice de redução de emissão de GEE por capacidade instalada de geração hidráulica em MG no período seco em relação à emissão de GEE por capacidade instalada de geração térmica no Brasil.	69
Tabela 20 - Índice de redução do consumo de água por capacidade instalada de geração hidráulica do parque gerador de Minas Gerais em relação ao consumo de água por capacidade instalada de geração térmica no Brasil.	70
Tabela 21 - Índice de relação da parcela do PIB gerada pela OIEE de fonte hidráulica em MG em relação a parcela do PIB gerada pela OIEE de outras fontes em MG sobre a referência fixa unitária do parque gerador nacional.	71
Tabela 22 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período completo do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada na PCH Inhapim sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional.	71
Tabela 23 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada na PCH Inhapim sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional.	72
Tabela 24 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a energia bruta gerada no período completo do ano civil pela PCH Inhapim sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional.	72
Tabela 25 - Índice de redução de emissão de GEE por capacidade instalada de geração hidráulica da PCH Inhapim no período seco em relação à emissão de GEE por capacidade instalada de geração termelétrica do Brasil.	73

Tabela 26 - Índice de redução do consumo de água por capacidade instalada de geração hidráulica da PCH Inhapim em relação ao consumo de água por capacidade instalada de geração termelétrica no Brasil.....	74
Tabela 27 - Relação da parcela do PIB gerada pela OIEE de fonte hidráulica da PCH Inhapim em relação a parcela do PIB gerada pela OIEE de fonte complementar.	75
Tabela 28 - Análise comparativa dos indicadores frente à relação da capacidade instalada....	76
Tabela 29 - Análise comparativa dos indicadores em referência unitária frente ao parque gerador nacional.	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHE	Aproveitamento Hidrelétrico ou Hidroenergético
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
BHO	Base Hidrográfica Ottocodificada
CHG	Circuito Hidráulico de Geração
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE	Infraestrutura de Dados Espaciais
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
MG	Minas Gerais
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
OIEE	Oferta Interna de Energia Elétrica
OIEE _{AHE}	Oferta Interna de Energia Elétrica de Fonte Hídrica
OIEE _{FC}	Oferta Interna de Energia Elétrica de Fonte Complementar
ONS	Operador Nacional do Sistema
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PIB	Produto Interno Bruto
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
Q _{AFL}	Vazão Afluente
QGIS	<i>Quantum Geographic Information System</i>
Q _{RES}	Vazão Residual
Q _{TURB}	Vazão Turbinada
Q _{TVR}	Vazão Mínima Residual no Trecho de Vazão Reduzida
Q _{VERT}	Vazão Vertida
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional

SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SISEMA	Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
TVR	Trecho de Vazão Reduzida
UEG	Unidade Estratégica de Gestão
UHE	Usina Hidrelétrica
UPGRH	Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	JUSTIFICATIVA	19
3	OBJETIVOS	22
3.1	GERAL	22
3.2	ESPECÍFICOS	22
4	REFERENCIAL TEÓRICO	23
4.1	A AGENDA 2030.....	23
4.2	SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO (SEB)	25
4.3	MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA BRASILEIRA.....	26
4.4	CENTRAIS HIDRELÉTRICAS DE DERIVAÇÃO DE FLUXO	29
4.5	DOS BENS PÚBLICOS SUJEITOS À OUTORGA	33
4.5.1	Da outorga do serviço público de energia	33
4.5.2	Da outorga do direito de uso dos recursos hídricos.....	34
4.6	DISPONIBILIDADE HIDRICA E ANALISE HIDROLOGICA	35
5	MATERIAIS E MÉTODOS	36
5.1	ÁREA DE ESTUDO	36
5.1.1	Caracterização da área de estudo.....	38
5.1.2	PCH Inhapim	39
5.2	METODOLOGIA	41
5.2.1	Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.....	41
5.2.2	Delimitação da bacia hidrográfica do rio Caratinga e da área de drenagem da PCH Inhapim	43
5.2.3	Obtenção dos dados técnicos e operacionais da PCH Inhapim.....	44
5.2.4	Identificação, seleção e análise dos postos fluviométricos com dados de vazões médias diárias da bacia do rio Caratinga.....	44
5.2.5	Análise da disponibilidade hídrica	45

5.2.5.1	Cálculo das vazões de referência ($Q_{7,10}$) por análise estatística e regionalização de vazões	46
5.2.5.2	Obtenção das vazões de referência ($Q_{7,10}$) dos Estudos de Regionalização (ANA/IGAM, 2022)	47
5.2.6	Cálculo da disponibilidade energética	47
5.2.7	Proposta de indicadores ambientais e socioeconômicos do incremento de disponibilidade energética.....	50
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
6.1	BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CARATINGA E ÁREA DE DRENAGEM DA PCH INHAPIM.....	56
6.2	DADOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS DA PCH INHAPIM.....	57
6.3	POSTOS FLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS	58
6.4	VAZÕES DE REFERÊNCIA ($Q_{7,10}$) POR ANÁLISE ESTATÍSTICA E REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES E POR CONSULTA AO IDE-SISEMA.....	61
6.5	DISPONIBILIDADE ENERGÉTICA DA PCH INHAPIM	63
6.6	INDICADORES AMBIENTAIS E SOCIECONÔMICOS DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO (SEB).....	64
6.6.1	Setor Elétrico - Brasil	64
6.6.2	Setor Elétrico – Minas Gerais.....	68
6.6.3	PCH Inhapim	71
6.7	ANÁLISE COMPARATIVA	75
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
8	REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

As águas são capazes de suportar o atendimento de diversas funções para os seres vivos em geral. Em especial, desde o início das civilizações, a demanda por bens e serviços dependentes do uso direto dos recursos hídricos sempre foi essencial à própria sobrevivência humana (SANTOS *et al.*, 2020).

Assim, a manutenção de condições de equilíbrio ambiental e de qualidade de vida associadas ao uso dos recursos hídricos, como fonte de desenvolvimento econômico e social, torna-se uns dos pilares do desenvolvimento sustentável (BUENAGA, 2019).

Frente a importância de tal elemento vital, por força de imposição constitucional à forma de organização político-administrativa dos entes, as águas foram regulamentadas enquanto bens de domínio público (BRASIL, 1988).

Segundo a Agência Nacional de Águas - ANA (2019), o Brasil é dotado de significativa disponibilidade hídrica, contudo, ressalta-se uma desigualdade quanto à forma de ocorrência no território, assim como na condição em que ocorre durante o ano.

Em uma avaliação global, Grill *et al.* (2019) apontam que a crescente demanda pelo uso dos recursos hídricos culmina na implantação de obras de engenharia para fins de acumulações superficiais, a medida em que representam soluções tecnológicas que compatibilizem a oferta frente a demanda de uso ou a finalidade a que se destinam.

Dada a necessidade da Administração Pública em promover o gerenciamento da água como bem de domínio público, dotado de valor econômico, fez-se ressonante tal disposição junto à Política Nacional de Recursos Hídricos - PNRH (BRASIL, 1997).

Dentre os instrumentos da PNRH, a outorga de direito de uso de recursos hídricos possui como objetivos “(...) assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água” (Brasil, 1997).

Os dados do Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil (ANA, 2022) apontam uma previsão de aumento de 42% de retirada até 2040, o que demanda uma análise estratégica por parte dos órgãos gestores de recursos hídricos de modo a estabelecer metodologias de controle e uso racional do volume demandado de recursos hídricos frente à disponibilidade hídrica.

Embora em caráter não consuntivo, a geração de energia elétrica constitui uma das diversas finalidades de uso dos recursos hídricos que demandam a implantação de barragens

para a acumulação de volumes de água, o que reflete diretamente na fragmentação de cursos d'água e na alteração do regime hidrológico (ANA, 2020; Grill *et al.*, 2019).

Em 2021, conforme o Informe Anual da Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil (ANA, 2022), o país apresentava 1.373 empreendimentos de aproveitamentos de potencial de energia hidráulica já em fase de operação.

Para o suprimento da demanda de energia, atrelada como um fator básico do estágio de desenvolvimento de uma nação, tem-se o desafio de compatibilizar os eixos de sustentabilidade econômica, social e ambiental deste processo aos meios tecnológicos disponíveis, motivo pelo qual a métrica do desenvolvimento sustentável do setor volta-se para as fontes que compõem sua matriz energética (GOLDEMBERG, 2015).

Tamanho a importância de enfrentamento do tema que a Organização das Nações Unidas (ONU) criou o modelo de um plano global para um mundo melhor, materializado na Agenda 2030, onde são elencados 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), dentre os quais o Objetivo 7 trata das métricas que envolvem o desenvolvimento das nações considerando uma matriz energética de fontes limpas e a universalização do acesso (ONU, 2023).

O desenvolvimento deste setor possui intensa relação com a vocação geográfica do país, sendo importante destacar que as fontes renováveis representam a maior participação (78,1%) na matriz energética do sistema elétrico brasileiro, sendo a geração hidráulica responsável por 53,4% da oferta interna de energia (EPE, 2022).

Embora tenha ocorrido o crescimento da oferta interna de energia elétrica em 3,9%, o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional - BEN (EPE, 2022) aponta um recuo de 8,5% do total da oferta interna de energia elétrica de fonte hidráulica, provocada pela escassez de chuvas e a consequente redução dos níveis dos reservatórios, o que provocou o acionamento das usinas termelétricas para compensação de cerca de 93% da indisponibilidade desse montante de energia.

Nessa assertiva, o Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos 2020 (ANA, 2021) aponta o aumento de 46% de incremento nas duas últimas décadas em relação ao total de água retirada para atendimento à demanda operacional de geração termelétrica, o que reflete intrínseca relação com o processo de desenvolvimento nacional e mundial, influenciando na posição do país em relação aos compromissos ambientais assumidos.

Particularmente, consideradas as fontes hidráulicas da matriz energética, as modalidades de classificação de centrais hidrelétricas, quanto à forma de captação (adução da vazão do leito original do curso d'água), são definidas pela influência do arranjo físico sobre os recursos hídricos, podendo ser divididas em: (i) desvio ou em derivação; e (ii) leito do rio (REIS, 2011).

O Ministério de Minas e Energia - MME, através da publicação do Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas (2007), define a modalidade de derivação como forma de subtração de vazão do rio necessária à adução do circuito hidráulico de geração, permanecendo o leito original sob regime de uma vazão reduzida, sendo restituída a vazão, ao seu leito original, após a passagem pelo canal de fuga.

Desta forma, ainda que sobre a ótica da adoção de fontes renováveis para composição da matriz energética, dentre outros impactos, a forma de adução de vazão do curso d'água nos arranjos físicos sobre a modalidade de derivação de fluxo compromete a disponibilidade hídrica de parte do segmento do leito original, bem como demanda a regularização do uso dos recursos hídricos frente aos órgãos gestores.

2 JUSTIFICATIVA

A análise do procedimento de outorga de direito de uso de recursos hídricos de aproveitamentos hidrelétricos, em modalidade de derivação de fluxo, deve considerar as alterações no regime de vazões a jusante do barramento, bem como definir qual deve ser a vazão residual a ser mantida no trecho de vazão reduzida - TVR (MME, 2007; BRASIL, 1997).

Conforme Sarmiento (2007 apud SANTOS *et al.*, 2020), a legislação brasileira normatiza a avaliação da outorga de direito de uso de recursos hídricos por meio do estabelecimento de vazões fundamentadas em metodologias de base hidrológica, com destaque para os métodos de percentis de excedência.

Neste contexto, a análise da solicitação de outorga para os aproveitamentos de potencial hidráulico já existentes antes da regulamentação do referido instrumento de gestão dos recursos hídricos em Minas Gerais, conforme a atual Resolução Conjunta SEMAD/IGAM n. 1.768, de 30 de novembro de 2012¹, deve considerar o que dispõe o §3º do art. 2º da respectiva normativa:

¹ A primeira normativa ocorreu pela publicação da Resolução Conjunta SEMAD/IGAM n. 812, de 02 de outubro de 2008.

Art. 2º Aplica-se o disposto nesta Resolução Conjunta a todos os empreendimentos de aproveitamento de potencial hidrelétrico de que trata o caput do artigo 1º, não eximindo de formalização de processo de licenciamento ambiental corretivo.

(...)

§3º Na análise da solicitação de outorga de que trata o caput do artigo 1º desta Resolução Conjunta, o órgão ambiental competente poderá estabelecer condições específicas de vazão residual mínima a jusante, observando:

I - as condições operacionais aprovadas pela ANEEL ou pelo Governo Federal;

II - a interferência nos usos múltiplos no trecho de vazão reduzida - TVR;

III - a vazão mínima remanescente apresentada no estudo para regularização ambiental, quando houver.

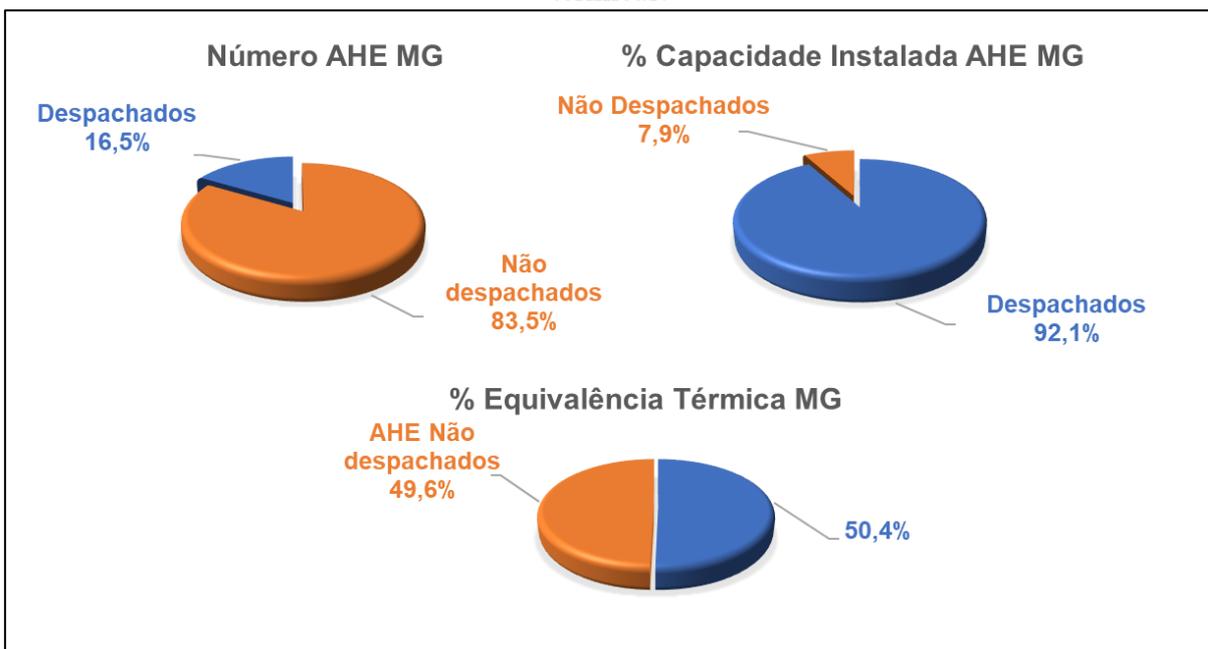
Todavia, dentre as variáveis elencadas, nem todos os empreendimentos de aproveitamentos hidrelétricos (AHE) implantados e em fase de operação possuem as condições operacionais aprovadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) ou pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

A modalidade de operação das centrais elétricas é realizada pelo ONS com base em estudos de planejamento e programação da operação energética do Setor Elétrico Brasileiro (SEB), bem como pela avaliação dos impactos destas centrais elétricas de geração na operação do Sistema Interligado Nacional, podendo ser analisadas individualmente ou de forma agrupada quando compartilharem o mesmo ponto de conexão (ONS, 2020).

Conforme os dados do Portal SINtegre (ONS, 2023), dos 200 empreendimentos de geração hidráulica em etapa de operação em Minas Gerais, 167 empreendimentos (83,5%) não possuem programação nem despacho centralizados e, por este motivo, não possuem relacionamento operacional junto ao ONS, ou seja, não possuem condições operacionais estabelecidas.

Embora estes 167 empreendimentos representem 7,93% da potência total instalada de geração hídrica em operação em Minas Gerais, este valor equivale a 49,6% da capacidade total de potência instalada de fontes térmicas em operação no Estado de Minas Gerais, segundo os dados disponibilizados pelo ONS (2023), conforme pode ser demonstrado no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Número de empreendimentos de aproveitamento hidrelétrico e capacidade instalada em relação às condições operacionais e % de equivalência em relação às fontes térmicas.



Fonte - Adaptado pelo autor (2023) com base em ONS (2023).

A avaliação das condições operacionais de um aproveitamento hidrelétrico, ainda que não estabelecidas pelo ONS, possui caráter relevante para fins de definição da vazão residual mínima junto ao instrumento de outorga de direito de usos de recursos hídricos.

O estabelecimento de vazões residuais mínimas no trecho de vazão reduzida (TVR) de aproveitamentos hidrelétricos em modalidade de derivação de fluxo, sem a avaliação das condições operacionais, pode interferir diretamente no custo-benefício da alternativa tecnológica implantada, comprometendo a exploração do potencial hidráulico da partição de queda selecionada ou modificando o aproveitamento ótimo das partições de queda de uma bacia hidrográfica.

Noutro contexto, a definição de vazões mínimas residuais no TVR, quando avaliadas as condições operacionais destes empreendimentos, não só cumpre os requisitos da análise da solicitação de outorga de direito de uso dos recursos hídricos, quanto permite a potencialização de impactos positivos.

Contudo, neste cenário de ausência de uma condição regulamentadora, dada a inexistência de relacionamento operacional, a implementação de uma estratégia de análise alternativa pode ser complementada pela existência de diretrizes que compõem o Pacto Global

da Agenda 2030 e, portanto, guardar relação direta às metas estabelecidas junto ao Objetivo 7 (ODS).

Desta forma, pretende-se elaborar e empregar indicadores ambientais e socioeconômicos que possuam correlação com o ODS 7 da Agenda 2030 e possam ser utilizados na análise de outorga de aproveitamento de potencial de centrais hidrelétricas de derivação de fluxo que não possuem as condições operacionais aprovadas pela ANEEL ou pelo ONS, utilizando-se o estudo de caso da PCH Inhapim.

3 OBJETIVOS

3.1 GERAL

Propor uma metodologia baseada em indicadores ambientais e socioeconômicos para avaliar, no contexto do procedimento administrativo de outorga de direito de uso de recursos hídricos, a vazão mínima residual no TVR de centrais hidrelétricas, na modalidade de captação em derivação, que não possuem as condições operacionais aprovadas pela ANEEL ou pelo ONS, de modo a atender os quesitos da Resolução Conjunta SEMAD/IGAM n. 1.768/2012.

3.2 ESPECÍFICOS

- caracterizar a participação hídrica enquanto fonte do setor elétrico na matriz energética brasileira e a influência das condições operacionais de centrais hidrelétricas de derivação de fluxo na adoção de vazões mínimas residuais no TVR;
- caracterizar, por meio de revisão bibliográfica, as vazões de referência estabelecidas para a análise dos procedimentos administrativos de outorga de direito de usos de recursos hídricos sob competência do Estado de Minas Gerais.
- elaborar e aplicar indicadores ambientais e socioeconômicos decorrentes do incremento da disponibilidade energética que podem implicar no estabelecimento de vazões mínimas residuais no TVR de centrais hidrelétricas de derivação de fluxo, adotando-se como estudo de caso o cenário da Pequena Central Hidrelétrica - PCH Inhapim, implantada em 1924 no rio Caratinga, em Inhapim/MG.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 A AGENDA 2030

Realizada na sede das Nações Unidas em Nova York de 25 a 27 de setembro de 2015, a Assembleia Geral das Nações Unidas constituiu um Pacto Global adotado pelos 193 Estados Membros como uma resposta aos maiores problemas enfrentados pela humanidade nos dias contemporâneos (ONU, 2015).

Este Pacto Global foi denominado Agenda 2030 e sua pedra fundamental amolda-se ao objetivo de construção de um mundo melhor. Assim, a Agenda 2030 constitui-se de um plano em escala global idealizado na forma de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e desdobramento operacional em 169 metas que foram encampadas pelos Estados Membros (ONU, 2015).

Segundo a ONU “[...] os ODS e metas são integrados e indivisíveis, de natureza global e universalmente aplicáveis, tendo em conta as diferentes realidades, capacidades e níveis de desenvolvimento nacionais e respeitando as políticas e prioridades nacionais” (ONU, 2015, p. 16).

Dentre os ODS fixados no Pacto Global, a Agenda 2030 estabelece que o Objetivo 7 constitui em assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos, ou seja, a vertente das métricas deve conduzir ao eixo de desenvolvimento da matriz energética subsidiado em fontes de energia limpa e sustentável e ao eixo de desenvolvimento socioeconômico tendo por garantia o fornecimento dos serviços e energia para todos.

Tais diretrizes objetivam definir o rumo de desenvolvimento para a economia de baixo carbono, buscando-se a implementação de um cenário baseado no uso de energias limpas (hidráulica, eólica, fotovoltaica, biomassa) em alternativa ao cenário do uso de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão mineral).

Segundo Fernandes & Mazzola (2016), entre 2005 e 2012 houve uma redução significativa de 41% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), motivada, principalmente, pela expressiva queda das taxas de desmatamento, uma vez que a mudança do uso do solo representava a maior participação entre as fontes de emissão.

Em 2012, embora o país contasse com uma matriz energética composta por 42,4% de fontes renováveis, contudo, a emissão de GEE decorrentes do setor de energia havia crescido

quase 32% no período entre 2005 e 2012, aproximando-se das emissões decorrentes das alterações do uso e ocupação do solo (FERNANDES e MAZZOLA, 2016).

Neste cenário, as metas que compõem o Objetivo 7 são assim definidas:

- 7.1 - Até 2030, assegurar o acesso universal, confiável, moderno e a preços acessíveis a serviços de energia;
- 7.2 - Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global;
- 7.3 - Até 2030, dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética;
- 7.a - Até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa;
- 7.b - Até 2030, expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos os países em desenvolvimento, particularmente nos países menos desenvolvidos, nos pequenos Estados insulares em desenvolvimento e nos países em desenvolvimento sem litoral, de acordo com seus respectivos programas de apoio.

Uma vez que o SEB se encontra conectado ao Setor Energético Brasileiro, torna-se compulsória a sua submissão às diretrizes adotadas para a política energética de modo a contribuir para o alcance de um cenário da economia de baixo carbono, contribuindo assim para atingir as metas definidas para o item 7 dos ODS da Agenda 2030.

Desta forma, a análise de qualquer política pública de desenvolvimento do SEB é indissociável dos aspectos elencados na Agenda 2030, o que estabelece uma relação entre a aplicação dos indicadores componentes das metas e o planejamento deste setor, compatibilizando o desenvolvimento deste eixo temático por meio da adoção de soluções sustentáveis.

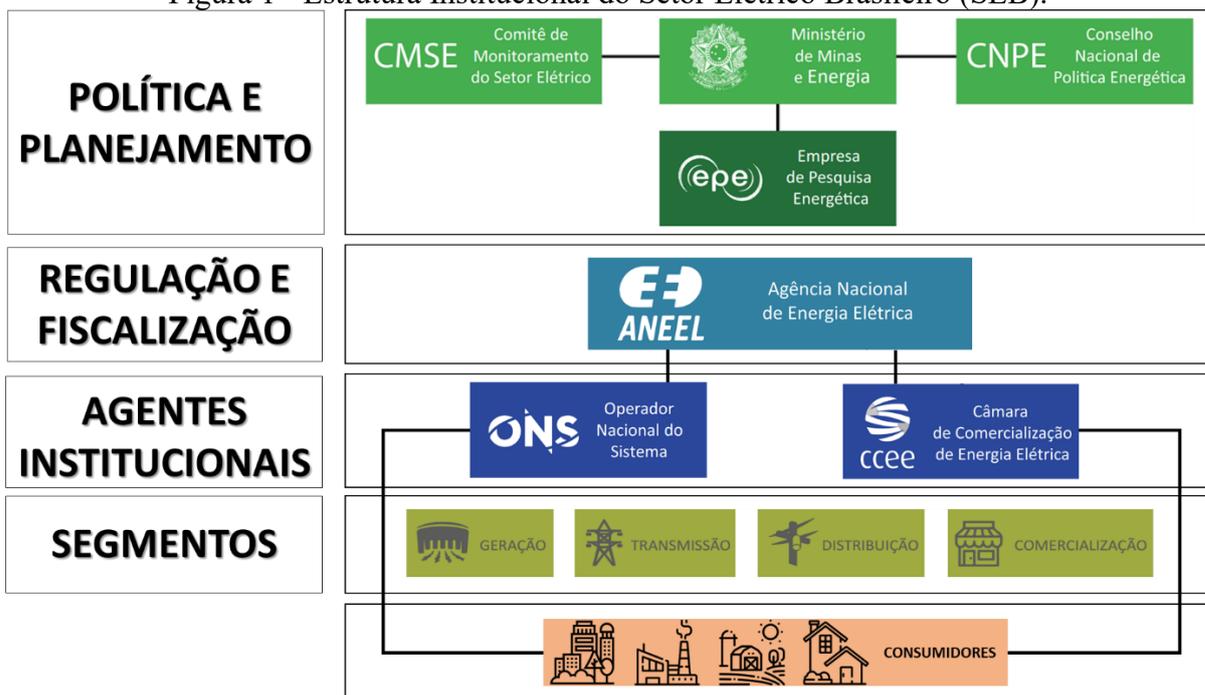
Assim, considerado ainda o campo regulatório dos setores energético e ambiental, a implementação destas políticas públicas guarda estreita relação com os objetivos e metas atribuídos neste Pacto Global (Agenda 2030), devendo ser perseguida também pelos órgãos e entidades da Administração Pública e não somente pelos administrados.

4.2 SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO (SEB)

O setor energético constitui-se como uma importante variável para o desenvolvimento da economia. O crescimento econômico é interligado ao aumento da demanda de energia, o que está diretamente relacionado ao planejamento energético, considerando o aumento da oferta (IBGE, 2010).

Desta forma, ao que corresponde à fonte elétrica da matriz energética, por meio da promulgação da Lei Federal n. 9.074, de 07 de julho de 1995, iniciou-se um novo marco regulatório para o SEB, onde se destacam a inserção da modalidade da livre competição da geração e da comercialização e a garantia do livre acesso na prestação dos serviços de energia elétrica. Na Figura 1 é apresentada a estrutura institucional do SEB, a partir da sua reestruturação.

Figura 1 - Estrutura Institucional do Setor Elétrico Brasileiro (SEB).



Fonte - Adaptado pelo autor (2023) com base em ANEEL (2023).

A partir de então, esse setor fora submetido a uma reestruturação institucional e regulamentar, com a desverticalização das atividades, segmentando a geração, transmissão, distribuição e comercialização. Objetivou-se com isso “[...] a redução do papel do Estado nas funções empresariais, a privatização das empresas existentes e a licitação da expansão, com

atração do capital privado, e o estabelecimento e fortalecimento institucional dos órgãos reguladores” (ANEEL, 2003, p. 13).

4.3 MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA BRASILEIRA

Conforme a EPE (2022), o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional - BEN (ano base 2021) registra uma taxa de crescimento de 4,5% da oferta interna de energia em 2021 (total de energia disponibilizada no país) e o aumento de 3,5% do consumo final de energia, ante a evolução do Produto Interno Bruto - PIB de 4,6%.

Ao comparar os dados do balanço energético nacional ao cenário mundial, embora tenha sido apontada a redução de 3,8% da participação de renováveis na matriz energética nacional (44,7%), devido à forte queda da oferta hidroenergética, a oferta interna de energia a partir de fontes renováveis é muito superior à média dos 38 países membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico - OCDE que em 2019 totalizava 11,5% (EPE, 2022).

Considerando o uso de recursos hídricos na matriz elétrica brasileira, a oferta interna de energia elétrica registrou uma redução de 8,5% da oferta de energia hidráulica, implicando na redução de 83,8% para 78,1% da participação das fontes renováveis da matriz elétrica brasileira em 2021 (EPE, 2022).

Denota ainda significativa importância o fato de que, na comparação entre os anos de 2021/2020, não obstante o registro de redução de perdas (técnicas e comerciais), o consumo final de energia elétrica em 2021 foi 0,3% superior à oferta interna de energia elétrica (EPE, 2022), o que implica na necessidade de uma atuação coordenada pelos órgãos gestores para a manutenção da garantia do fornecimento de energia elétrica, evitando-se o colapso do sistema, como já ocorreu em anos anteriores.

Os dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica (EPE, 2022) demonstram que, entre os anos de 2012 e 2021, houve o crescimento significativo da participação da capacidade instalada das demais fontes de energia elétrica renováveis, como biomassa, eólica e solar, e o decréscimo da participação da capacidade instalada das fontes de energia não renováveis, como as de gás natural, derivados de petróleo, carvão e nuclear, conforme pode ser apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados estatísticos da matriz elétrica brasileira (ano base 2021).

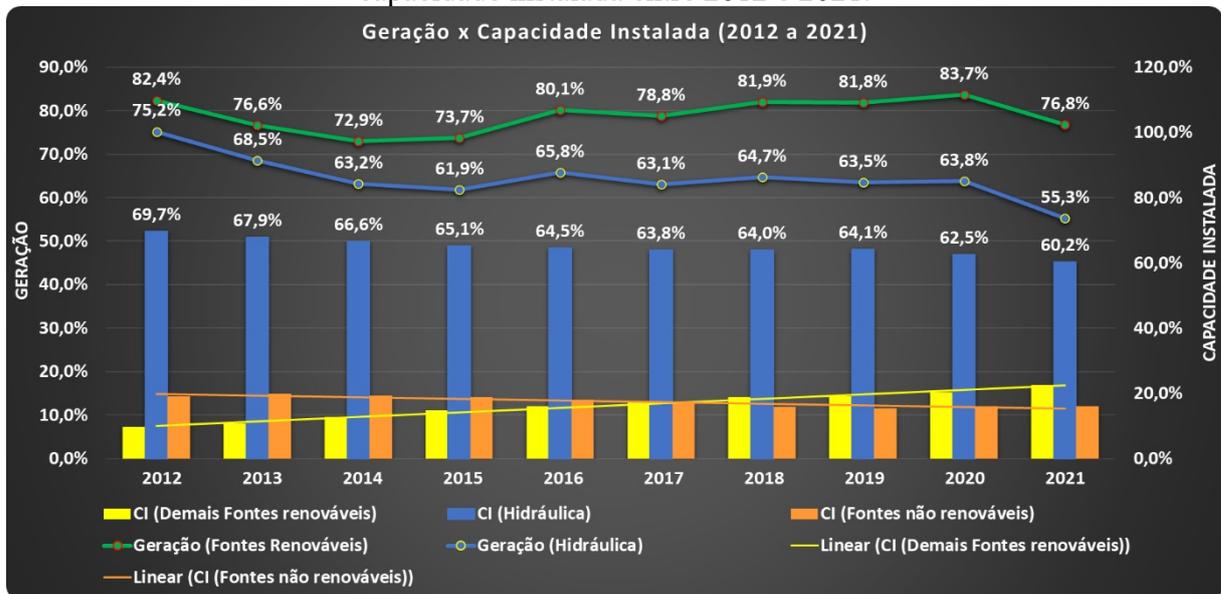
Capacidade instalada por fonte (10³ MW)										
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Hidrelétrica	84,29	86,02	89,19	91,65	96,93	100,28	104,14	109,06	109,27	109,35
Gás Natural	11,44	12,30	12,55	12,43	12,96	12,98	13,36	13,39	14,93	16,22
Petróleo (i)	7,23	7,52	7,89	8,83	8,84	8,79	7,55	7,67	7,70	7,67
Carvão	2,30	3,39	3,39	3,39	3,39	3,32	2,86	3,23	3,20	3,20
Nuclear	2,01	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99
Biomassa (ii)	9,77	11,45	12,18	13,07	13,91	14,29	14,57	14,70	15,01	15,58
Eólica	1,89	2,20	4,89	7,63	10,12	12,28	14,39	15,38	17,13	20,77
Solar	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,94	1,80	2,47	3,29	4,63
Outras (iii)	2,03	1,87	1,82	1,85	2,16	2,24	2,19	2,23	2,22	2,20
Total	120,98	126,74	133,91	140,86	150,34	157,11	162,84	170,12	174,74	181,61
Geração de energia elétrica por fonte (10³ GWh)										
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Hidráulica	415,34	390,99	373,44	359,74	380,91	370,91	388,97	397,88	396,38	362,82
Gás Natural	46,68	68,94	81,07	79,50	56,55	65,59	54,29	60,19	53,52	86,86
Petróleo (i)	16,29	22,22	31,53	25,71	12,21	12,91	10,29	7,85	8,56	18,24
Carvão	8,42	14,80	18,39	19,10	17,00	16,26	14,20	15,33	11,95	17,59
Nuclear	16,04	15,45	15,38	14,73	15,86	15,74	15,67	16,13	14,05	14,70
Biomassa (ii)	34,71	39,68	44,99	47,39	49,24	49,39	51,88	52,11	55,61	51,71
Eólica	5,05	6,58	12,21	21,63	33,49	42,37	48,48	55,99	57,05	72,29
Solar	0,00	0,00	0,02	0,06	0,09	0,83	3,46	6,65	10,75	16,75
Outras (iii)	9,97	12,16	13,52	13,62	13,55	13,97	14,15	14,21	13,39	15,15
Total	552,50	570,83	590,54	581,49	578,90	587,96	601,40	626,32	621,25	656,11

(i) Derivados de petróleo: óleo diesel e óleo combustível; (ii) Biomassa: lenha, bagaço de cana e lixívia; e (iii) Outras: gás de coqueria, outras secundárias, outras não renováveis, outras renováveis e biodiesel.

Fonte - Adaptado pelo autor (2023) com base em EPE (2022).

Em termos percentuais, embora o significativo crescimento da participação da capacidade instalada de outras fontes renováveis na matriz elétrica, a curva de geração de energia elétrica das fontes renováveis acompanha o comportamento da fonte hidráulica, conforme o Gráfico 2, o que demonstra um caráter de dependência das fontes que possuem uma maior previsão de garantia da continuidade do abastecimento nos momentos de demanda, principal característica que as diferem das outras fontes renováveis que possuem uma maior variabilidade e volatilidade, como a eólica e fotovoltaica.

Gráfico 2 - Comparação entre os dados percentuais de participação das fontes de energia e capacidade instalada entre 2012 e 2021.



Fonte - Autor (2023) com base em EPE (2022).

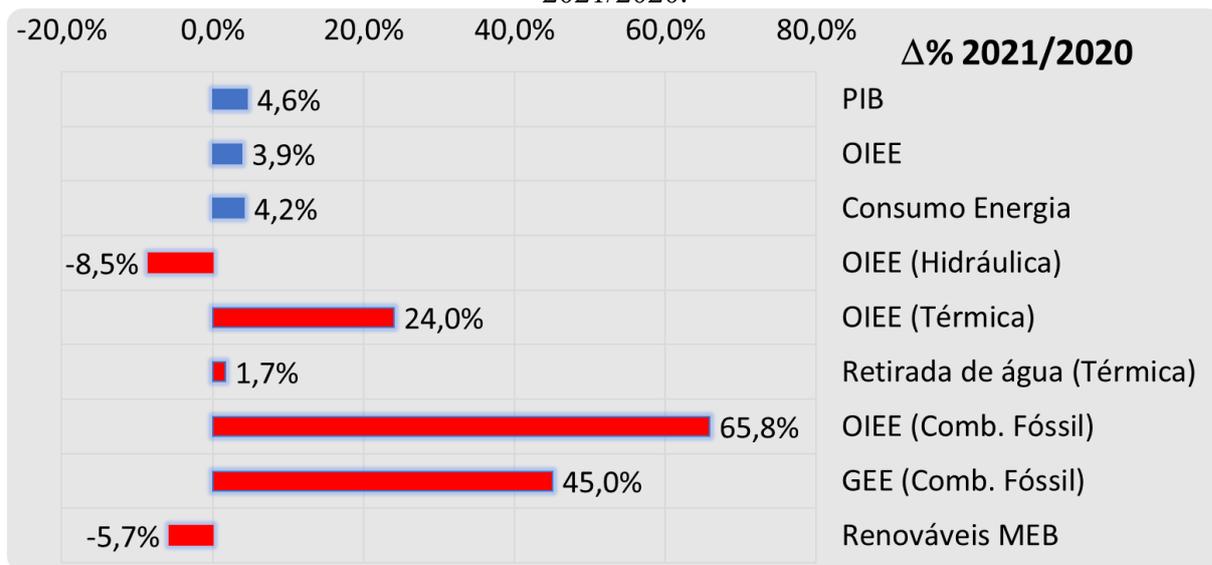
Considerada a evolução do PIB em 4,6%, os dados do Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional - BEN 2021 (EPE, 2022) e do Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos 2021 (ANA, 2022), quando comparados os anos de 2021/2020, permitem inferir a correlação entre o aumento de 4,2% do consumo final de energia de fonte elétrica e o aumento de 1,7% do consumo final de água destinado para geração termelétrica, demonstrando uma relação direta entre desenvolvimento econômico e o consumo de energia elétrica e água.

Neste cenário, a geração termoelétrica representou 31,1% de participação na geração de energia elétrica em 2021, ocorrendo um crescimento de 24% em relação a 2020, dos quais 65,8% representa a geração correspondente de termoelétricas movidas a combustível fóssil (carvão mineral, derivados de petróleo e GN), implicando no aumento de 45% da emissão de GEE (EPE, 2022).

Considerado o mercado cativo, Pinto & Santos (2021) apontam que, em 2019, o custo médio de geração de energia elétrica por fonte foi equivalente a 177,56 R\$/MWh para as Usinas Hidrelétricas (UHE) e de 231,78 R\$/MWh para as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH), respectivamente, enquanto o custo médio de geração termelétrica a partir de fontes de combustível fóssil (carvão, derivados do petróleo e gás natural) variou de 477,04 a 15.391,16 R\$/MWh.

Com base nos dados fornecidos pelo Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional (EPE, 2022), pelo Anuário Estatístico de Energia Elétrica (EPE, 2022) e pelo Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos (ANA, 2022), as informações apresentadas, que refletem o desempenho da matriz elétrica brasileira em 2021, podem ser consolidadas no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Dados estatísticos de desempenho da matriz elétrica brasileira na comparação 2021/2020.



Fonte - Autor (2023) com base em EPE (2022).

4.4 CENTRAIS HIDRELÉTRICAS DE DERIVAÇÃO DE FLUXO

A geração de energia por fontes hidráulicas consiste na conversão de energia potencial em mecânica e, posteriormente, em energia elétrica. Portanto, a altura da queda (H) e a vazão (Q) da água constituem as principais variáveis de uma central hidrelétrica (REIS, 2011, p. 109).

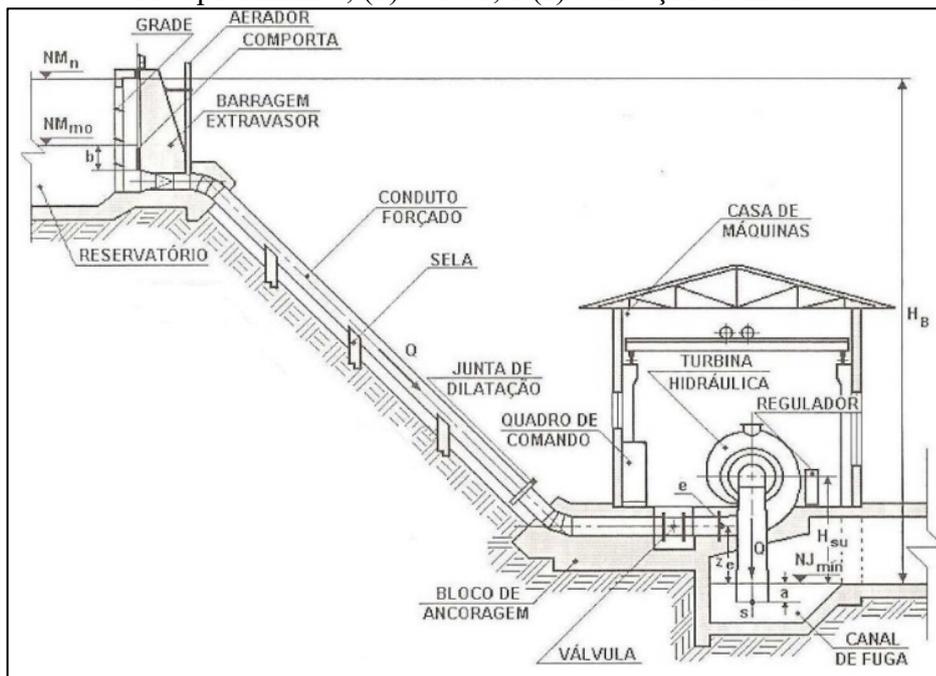
Em função da existência de variáveis físicas do ambiente, com o objetivo de inventariar estes potenciais hidráulicos de uma unidade hidrográfica, visando definir os melhores pontos para partições de queda de um determinado trecho longitudinal de um curso d'água, busca-se aperfeiçoar a localização do aproveitamento hidroenergético por meio da seleção de cursos d'água caudalosos e que proporcionem condições de significativa declividade (TUCCI, 2011).

Segundo Reis (2011, p. 90 a 93), as centrais hidrelétricas podem ser divididas em modalidades quanto ao uso das vazões naturais, à escala de potência instalada, à extensão da queda (diferença de cota entre montante e jusante), à forma de captação da água e à função no sistema.

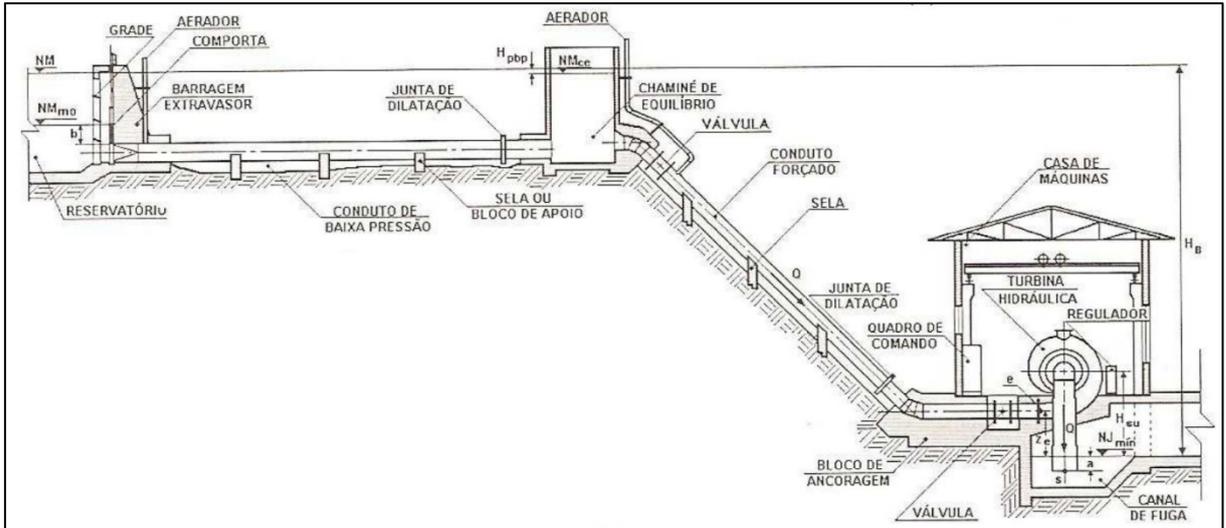
Acerca da influência do arranjo físico sobre os recursos hídricos, dentre as modalidades de classificações de centrais hidrelétricas, especificamente no que concerne à forma de captação, essas podem ser divididas em: (i) desvio e em derivação de fluxo; e (ii) leito do rio, de barramento ou de represamento (REIS, 2011, p. 92).

Segundo Souza, Santos e Bortoni (1999), o que difere tais arranjos físicos tem sua influência principal na configuração do sistema de adução, pois as centrais hidrelétricas de represamento ou barramento não são constituídas de um sistema de adução em baixa pressão, conforme a Figura 2 (a), enquanto as centrais hidrelétricas de desvio e derivação de fluxo, conforme a Figura 2 (b) e (c), são constituídas de um sistema de adução em baixa pressão, por tubulação ou canal de escoamento livre, e dotadas de um dispositivo de transição para o regime de escoamento no conduto forçado, como a chaminé de equilíbrio e a câmara de carga, de modo a evitar a geração de transientes hidráulicos.

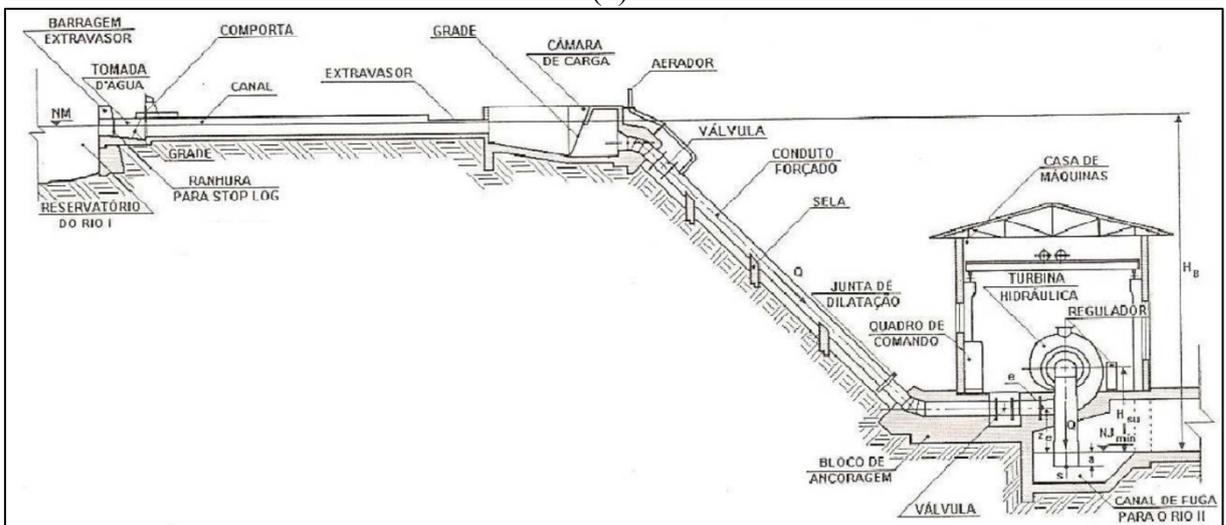
Figura 2 - Classificação de centrais hidrelétricas quanto à forma de captação: (a) leito do rio ou represamento; (b) desvio; e (c) derivação de fluxo.



(a)



(b)



(c)

Fonte - Adaptado pelo autor (2023) com base em Souza, Santos e Bortoni (1999).

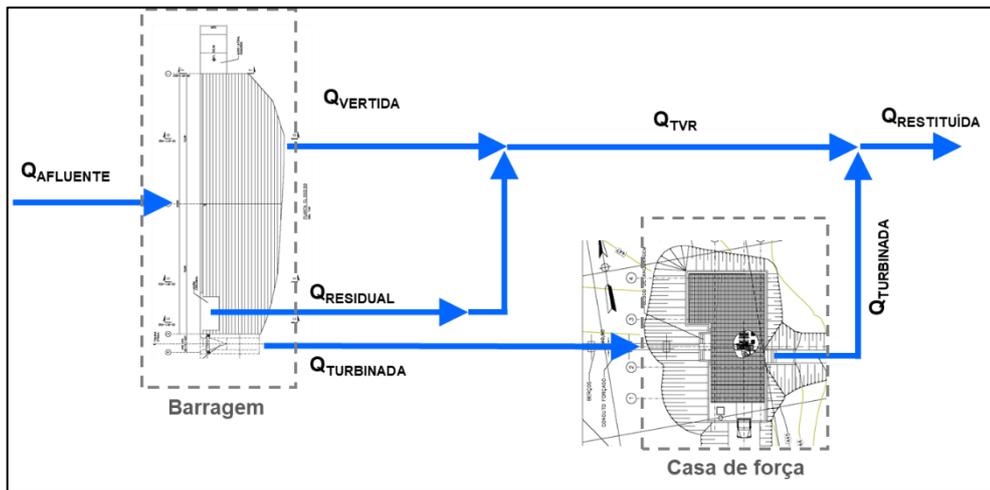
De modo a caracterizar a influência do arranjo físico das centrais hidrelétricas de desvio e derivação de fluxo sobre os recursos hídricos, doravante, as mesmas serão designadas como derivação de fluxo, pois em ambos os casos as alterações de vazões no leito natural do curso d'água são idênticas.

Considerada a modalidade de derivação para o conjunto de geração definido por Santos et al. (2003), o regime de vazões no leito natural do curso d'água pode ser definido em duas situações de fluxos distintas: (i) a uma, porque quando a vazão afluente (Q_{AFL}) é maior do que a vazão turbinada (Q_{TURB}), flui pelo TVR a vazão excedente (Q_{VERT}) vertida pela estrutura hidráulica extravasora e a vazão residual mínima (Q_{RES}), representando um cenário sazonal de

excedente hídrico; e (ii) a duas, porque quando a vazão afluyente (Q_{AFL}) é menor do que a vazão turbinada (Q_{TURB}), tem-se um cenário típico do período de estiagem, onde não ocorrerá vertimento, sendo necessária a definição de uma vazão residual mínima (Q_{RES}) que irá constituir a vazão no trecho de vazão reduzida (Q_{TVR}).

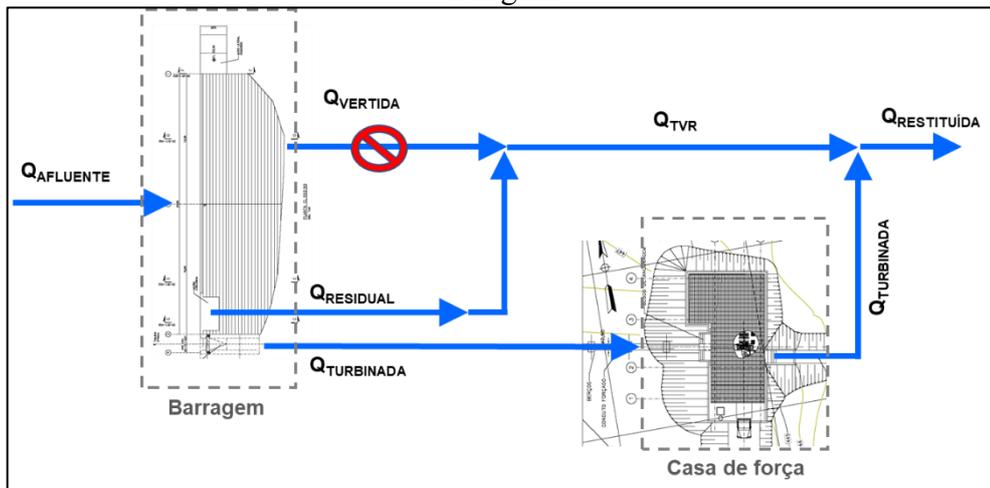
Abaixo, segue a representação do fluxo de vazões em uma central hidrelétrica de derivação de fluxo considerando os períodos de excedente hídrico (Figura 3) e de estiagem (Figura 4).

Figura 3 - Esquema de vazões de uma central hidrelétrica de derivação de fluxo no período de excedente hídrico.



Fonte - Autor (2023).

Figura 4 - Esquema de vazões de uma central hidrelétrica de derivação de fluxo no período de estiagem.



Fonte - Autor (2023).

Assim, quando da ocorrência de vazões afluentes menores do que as vazões turbinadas ($Q_{AFL} < Q_{TURB}$), a vazão no TVR (Q_{TVR}) representa, basicamente, uma parcela dedutível do potencial de energia hidráulica.

Por isso, o estabelecimento de uma vazão residual no TVR com a finalidade de aproximar-se das condições naturais, por vezes, pode implicar na inviabilidade da alternativa tecnológica assumida, ante a concepção de arranjos em modalidade de derivação, ou até mesmo na impossibilidade de exploração do potencial hidráulico de determinada partição de queda selecionada. O impacto sobre o regime de vazões naturais, no TVR, é inerente aos arranjos físicos concebidos para adução em modalidade de derivação do fluxo do curso d'água (SANTOS *et al*, 2008, p. 16).

4.5 DOS BENS PÚBLICOS SUJEITOS À OUTORGA

Conforme regulamentação vigente, dadas as particularidades que configuram os aproveitamentos de energia hidráulica, a Constituição da República Federativa do Brasil (CRFB, 1988) institui que a natureza jurídica de dois bens públicos, seja da União ou dos Estados, são objeto de concessão: o potencial de energia hidráulica (inciso VIII, Art. 20) e o uso dos recursos hídricos (inciso III, Art. 20; inciso I, Art. 26).

4.5.1 Da outorga do serviço público de energia

Em relação ao potencial de energia hidráulica, por meio da Lei Federal n. 9.427, de 26 de dezembro de 1996, o governo federal atribuiu à Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL², autarquia vinculada ao Ministério de Minas e Energia – MME, a competência de implementar as políticas e diretrizes relativas à exploração da energia elétrica e ao aproveitamento dos potenciais hidráulicos, bem como promover as atividades relativas às outorgas de concessão, permissão e autorização de empreendimentos e serviços de energia elétrica.

A Resolução Normativa ANEEL n. 875, de 10 de março de 2020, que estabelece os requisitos e procedimentos necessários à obtenção de outorga para exploração de

² A Lei Federal n. 9.427, de 26 de dezembro de 1996, institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências.

aproveitamentos hidrelétricos, dispõe em seu Capítulo V sobre os procedimentos administrativos dos Aproveitamentos Hidrelétricos (AHE) sujeitos à modalidade de Outorga de Autorização para exploração dos serviços públicos de geração de energia a que refere o Art. 7º da Lei Federal n. 9.074, de 07 de julho de 1995.

4.5.2 Da outorga do direito de uso dos recursos hídricos

Já em relação ao uso da água, o aproveitamento do potencial hidráulico para a finalidade de geração de energia é uma modalidade submetida à outorga de direito de uso de recursos hídricos, conforme dispõe a Lei Federal n. 9.433³, de 08 de janeiro de 1997, em seus artigos 5º e 12, sendo competência da Agência Nacional de Águas - ANA⁴, autarquia vinculada ao Ministério do Meio Ambiente - MMA, outorgar o direito de uso de recursos hídricos sob domínio da União, sendo o aproveitamento hidrelétrico regido pelos procedimentos: (i) da Resolução ANA n. 131, de 11 de março de 2003, que dispõe sobre procedimentos referentes à emissão de Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica e de Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos, para uso de potencial de energia hidráulica superior a 1 MW em corpo de água de domínio da União; e da (ii) Resolução ANA n. 1.305, de 20 de novembro de 2015, que estabelece diretrizes e procedimentos para outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos para empreendimentos em operação comercial em cursos d'água de domínio da União.

Em Minas Gerais, consoante à norma federal, a Lei Estadual n. 13.199, de 13 de janeiro de 1999, estabelece no inciso IV do Art. 18 o aproveitamento de potencial hidrelétrico como modalidade sujeita a outorga de direito de uso de recursos hídricos, efetivada por meio de ato administrativo do Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM⁵, sendo este modo de uso regido, atualmente, pelos procedimentos administrativos estabelecidos pela: (i) Deliberação Normativa n. 28, de 08 de julho de 2009, do Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas

³ A Lei Federal n. 9.433, de 08 de janeiro de 1997, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH e os seus instrumentos, bem como criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH).

⁴ A Lei Federal n. 9.984, de 17 de julho 2000, criou a Agência Nacional de Águas (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH).

⁵ A Lei Estadual nº 12.584, de 17 de julho de 1997, alterou a denominação do Departamento de Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais (DRH/MG) para Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), dispondo sobre sua reorganização e dando outras providências.

⁶ A Lei Estadual n. Lei n. 23.304, de 30 de maio de 2019, promoveu alterações na estrutura orgânica do Poder Executivo do Estado.

Gerais (CERH/MG)⁷, a qual estabelece os procedimentos técnicos e administrativos para análise e emissão da declaração de reserva de disponibilidade hídrica e de outorga de direito de uso de recursos hídricos para fins de aproveitamento de potenciais hidrelétricos em corpo de água de domínio do Estado de Minas Gerais; e (ii) pela Resolução Conjunta SEMAD/IGAM n. 1.768, de 30 de novembro de 2012, a qual estabelece os procedimentos técnicos e administrativos para emissão de outorga para fins de aproveitamento de potencial hidrelétrico em corpos de água de domínio do Estado de Minas Gerais.

Recentemente, a Lei Estadual n. 23.304, de 30 de maio de 2019, promoveu alterações na estrutura orgânica do Poder Executivo do Estado, e o Decreto Estadual n. 47.866, de 19 de fevereiro de 2020, atribui ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM a competência de analisar e conceder as outorgas de direito de usos de recursos hídricos, bem como compartilhou tal atribuição na forma do art. 38 com as Superintendências Regionais de Meio Ambiente (SUPRAM) da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SEMAD.

4.6 DISPONIBILIDADE HIDRICA E ANALISE HIDROLOGICA

Dentre os fundamentos, a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei Federal n. 9.433, de 08 de janeiro de 1997), reconheceu a água como um recurso natural limitado, dotado de valor econômico e, portanto, instituiu a necessidade de controle para exercício da gestão dos recursos hídricos, de modo a assegurar a disponibilidade de água, tendo como unidade territorial de sua implementação a bacia hidrográfica.

Conforme Tucci (2002 apud ROCHA & SANTOS, 2018) as variáveis edáficas que compõem os elementos naturais de uma bacia hidrográfica e as variáveis climáticas que exercem influência sobre esta unidade física são fundamentais para o estabelecimento do regime hidrológico e determinação do padrão natural de sazonalidade desta bacia, promovendo alterações nas variáveis de resposta hidrológicas.

⁷ Em Minas Gerais, o Decreto Estadual n.º 26.961, de 28 de abril de 1987, criou o Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH), órgão deliberativo e normativo central do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SEGRH), e que possui por competência, no âmbito da Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH), mediante deliberação normativa, estabelecer os critérios e normas gerais atinentes a outorga de direito de uso de recursos hídricos, promovendo a integração dos programas e atividades setoriais (saneamento, irrigação, geração de energia, navegação, dentre outros).

Neste contexto, considerada a natureza do processo de outorga de direito de usos de recursos hídricos, a importância de conhecimento do regime hidrológico como fator essencial ao planejamento e execução das ações de gestão e regulação do uso dos recursos hídricos demandou ainda a instituição do Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos (SNIRH), o qual possui, dentre outras, a finalidade de obtenção, processamento, armazenamento e disponibilização das informações que constituem variáveis hidrométricas sobre os recursos hídricos.

O SNIRH constitui-se um instrumento de gestão dos recursos hídricos por meio de uma articulação entre órgãos gestores, sociedade civil e usuários para a descentralização das atividades de geração de dados e a ação coordenada do sistema, contudo, sob a gestão da ANA, conforme a Lei Federal n. 9.984, de 17 de julho de 2000.

Segundo Sousa et al. (2009) a concepção sistêmica do SNIRH é dividida por um conjunto de subsistemas computacionais que possuem a finalidade de atender os processos de gestão dos recursos hídricos, dentre os quais encontra-se um subsistema que trata de dados e operações relacionados à qualidade e à quantidade de água, da oferta hídrica e da operação hidráulica.

No entanto, a indisponibilidade de pontos de monitoramento de variáveis hidrométricas constitui-se uma limitação quanto à obtenção de dados em toda a área de estudo, o que provoca a escassez de informações sobre determinados segmentos de uma área e, conseqüentemente, impactando a realização do planejamento das ações de controle e gestão dos recursos hídricos (ROCHA & SANTOS, 2018).

Desta forma, há de se associar o uso do presente instrumento (SNIRH) ao instrumento de outorga para fins de estabelecer a alocação de água permitida para as diversas finalidades de uso dos recursos hídricos, sendo fundamentada em metodologias que se baseiam na estimativa das vazões mínimas de referência (MENDES, 2007 apud MENEGON, 2022).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 ÁREA DE ESTUDO

Dada a localização do aproveitamento do potencial hidráulico da PCH Inhapim escolhido como objeto de análise deste estudo de caso encontrar-se implantado na bacia

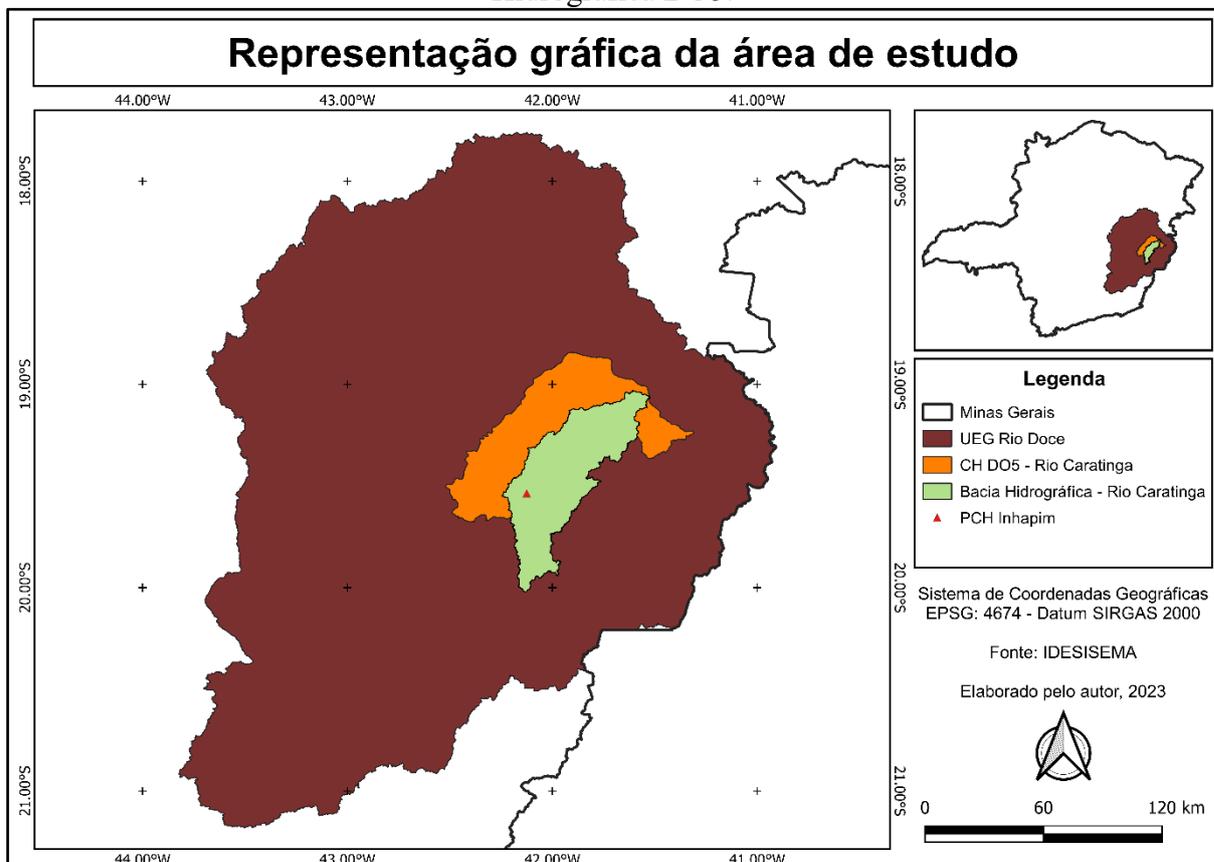
hidrográfica do rio Caratinga, a área de estudo selecionada encontra-se localizada na Circunscrição Hidrográfica (CH) do Rio Caratinga (DO5), conforme definição da Deliberação Normativa (DN) CERH/MG n. 66, de 17 de novembro de 2020

Cabe destacar que o § único do Art. 1º da DN CERH/MG n. 66, de 17 de novembro de 2020, estabeleceu as novas Unidades Estratégicas de Gestão (UEG) de Minas Gerais, definidas “(...) como regiões hidrográficas com características comuns ou similares de usos, demandas e disponibilidades hídricas, para fins de gestão, com ênfase no planejamento e monitoramento, configurando uma estratégia de espacialização para integração entre comitês de bacias”.

Ainda, a referida normativa estabeleceu em seu Anexo I a composição das UEG segundo as Circunscrições Hidrográficas de sua região de abrangência, substituindo a antiga expressão Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH).

A Figura 5 apresenta a delimitação da bacia hidrográfica do rio Caratinga no interior da Circunscrição Hidrográfica DO5 da Unidade de Estratégica de Gestão do Rio Doce.

Figura 5 - Delimitação da bacia hidrográfica do rio Caratinga no interior da Circunscrição Hidrográfica DO5.



Fonte - Autor, 2023.

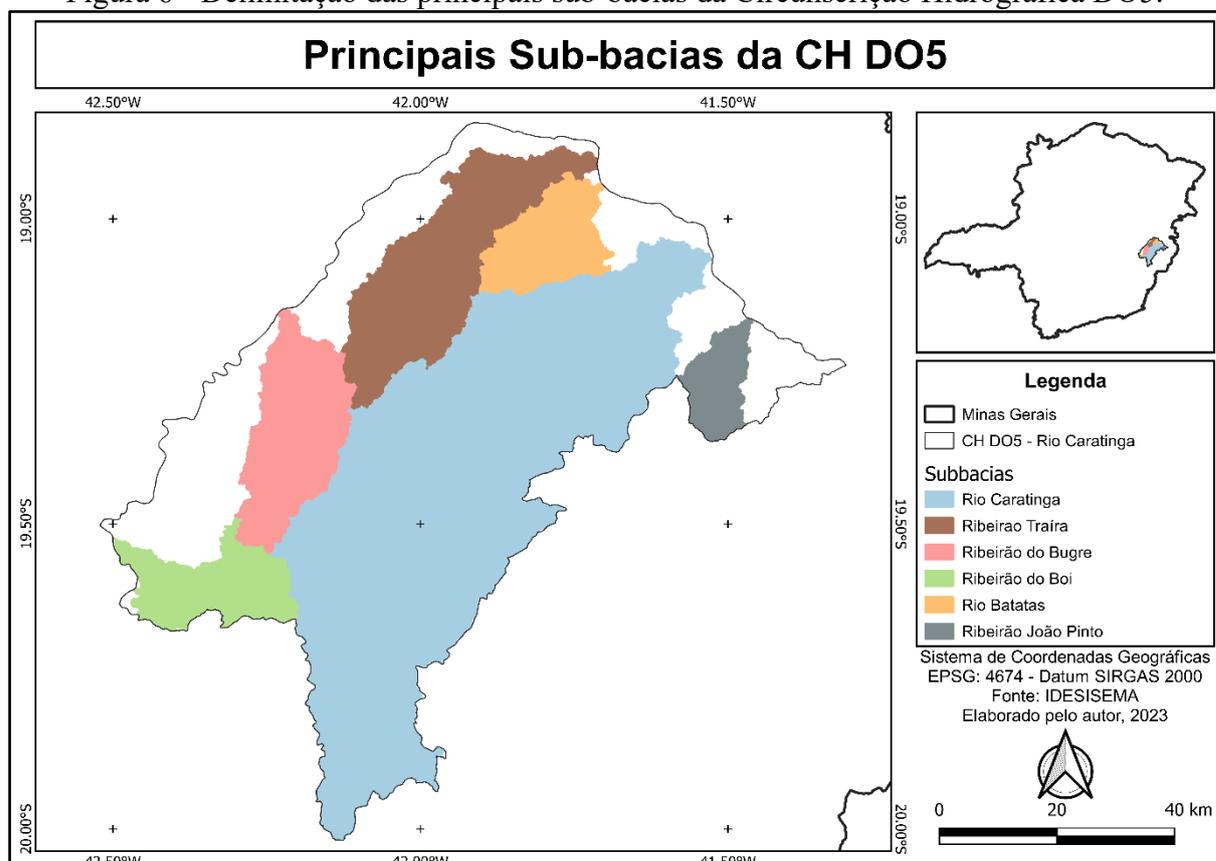
5.1.1 Caracterização da área de estudo

A Circunscrição Hidrográfica do Rio Caratinga (DO5) possui extensão territorial de 6.677,62 km², a qual abrange 3.228,7 km² da delimitação da bacia hidrográfica do rio Caratinga e a área de drenagem incremental de 3.448,92 km² de outros afluentes de menor extensão na margem direita do rio Doce (PIRH-DOCE, 2010).

Os principais formadores do rio Caratinga são o rio Preto e o ribeirão Queiroga e suas nascentes se originam no município de Santa Bárbara do Leste, de onde o rio se estende por 222km até a sua foz na margem direita do rio Doce. As principais sub-bacias que compõem a rede de drenagem da CH DO5 compreendem o rio Caratinga, o ribeirão Traira, o ribeirão do Bugre, o ribeirão do Boi, o rio Batatas e o ribeirão João Pinto (CBH CARATINHA, 2013; IDESISEMA, 2023).

A Figura 6 apresenta a delimitação das principais sub-bacias no interior da Circunscrição Hidrográfica DO5.

Figura 6 - Delimitação das principais sub-bacias da Circunscrição Hidrográfica DO5.



Fonte - Autor, 2023.

Segundo os dados do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce (2010), essa região hidrográfica caracteriza-se pela predominância de compartimentos de relevo de serras e depressões das unidades morfológicas das Serranias da Zona da Mata Mineira e da Depressão Interplanáltica do Médio Rio Doce, onde predominam os processos de modelados de dissecação estrutural e homogênea definidos por formas de topos aguçados, na região mais alta da bacia do rio Caratinga, e de topos convexos e tabulares, no segmento médio-baixo da região hidrográfica.

As classes de solo variam desde latossolos, em altitudes mais elevadas, a argissolos e cambissolos no segmento médio-baixo da região hidrográfica, sendo demarcada uma susceptibilidade erosiva de classe predominante forte em toda a região, condicionando uma elevada produção de sedimentos (PIRH-DOCE, 2010; IDE-SISEMA, 2023).

Entre os componentes de divisão regional do IBGE, a CH DO5 representa a segunda região hidrográfica mais populosa da bacia hidrográfica do Rio Doce e encontra-se sobreposta às microrregiões de Caratinga, Governador Valadares e Aimorés, todas inseridas na mesorregião do Vale do Rio Doce (CBH CARATINGA, 2013).

Embora a bacia hidrográfica do rio Caratinga possua destacada aptidão para a agropecuária, o empreendimento definido para o estudo de caso (PCH Inhapim) situa-se em local desfavorável à implantação de atividades agropecuárias, além de considerar o fato do mesmo ter sido implantado no período de colonização da região do Vale do Rio Doce (PIRH-DOCE, 2010; SIAM, 2023).

O trecho de pequena extensão do rio Caratinga onde situa-se a PCH Inhapim já era dotado de uma barreira geográfica natural no leito de seu curso principal, o qual impede, por exemplo, o fluxo migratório da ictiofauna no período de piracema, de modo que o TVR representa 0,5 % de toda a extensão do rio Caratinga (SIAM, 2023).

5.1.2 PCH Inhapim

A Pequena Central Hidrelétrica - PCH Inhapim é configurada pelo arranjo físico de um empreendimento que possui o regime de operação do reservatório artificial a fio d'água e a forma de captação na modalidade de derivação de fluxo, conforme demonstrado na Figura 7.

O aproveitamento de potencial hidráulico está localizado no rio Caratinga/Cuieté e dista cerca de 2 km a jusante da área urbana de Inhapim e a 146 km da foz com o rio Doce (ANEEL, 2014).

Figura 7 - Arranjo físico da PCH Inhapim.



Fonte - Autor, 2023.

Conforme os dados da ANEEL (2014), o empreendimento foi instalado por volta de 1924 e possui a exploração do potencial hidráulico regularizada por meio do Decreto Federal n. 6.761, de 29 de janeiro de 1941, o qual outorgou concessão à Companhia Força e Luz do Inhapim, para legalizar o aproveitamento hidroelétrico em questão, na forma da Constituição vigente à época. Sua concessão operativa original contava com potência instalada da ordem de 145 kW. A partir de 1976, esta Usina, motorizada com outros 350 kW, passou a totalizar 495 kW.

Após algumas transferências de titularidade o empreendimento foi desativado em 1978, permanecendo as obras civis. Já em 2001, a Sociedade Brasileira de Ferro Ligas obteve da ANEEL o registro de Estudos de Inventário Hidrelétrico do rio Caratinga, sendo aprovado o estudo de partição de queda em tela por meio do Despacho n. 349, de 12 de junho de 2001, o qual configurava com 5 MW de potência estimada, sendo revisado o projeto básico para 6 MW.

Posteriormente, por meio da Resolução Autorizativa da ANEEL n. 607, de 18 de novembro de 2003, fora autorizada a empresa ABC Energia Ltda. a estabelecer-se como Produtor Independente de Energia Elétrica, mediante a exploração da PCH Inhapim com potência instalada de 6 MW.

Já em 2012, por meio do Despacho n. 1066, de 29 de março de 2012, foi aprovado, pela ANEEL, o projeto básico da PCH Inhapim, o qual teve os parâmetros revisados por meio do Despacho 2.062, de 21 de agosto de 2012.

Contudo, através da Resolução Autorizativa n. 4.245, de 23 de julho de 2013, foi transferida para a Iguaçu Caaratinga Energia Ltda. a outorga de autorização conferida à ABC Energia Ltda. para exploração do serviço público de geração de energia elétrica referente à PCH Inhapim.

Por fim, em 2015, a ANEEL, por ocasião do Despacho n. 2.464, de 30 de julho de 2015, promoveu a revisão dos parâmetros para o cálculo da garantia física da PCH Inhapim, sendo revogado o Despacho n. 2.062/2012 e atualizados os valores do Despacho n. 1.066/2012.

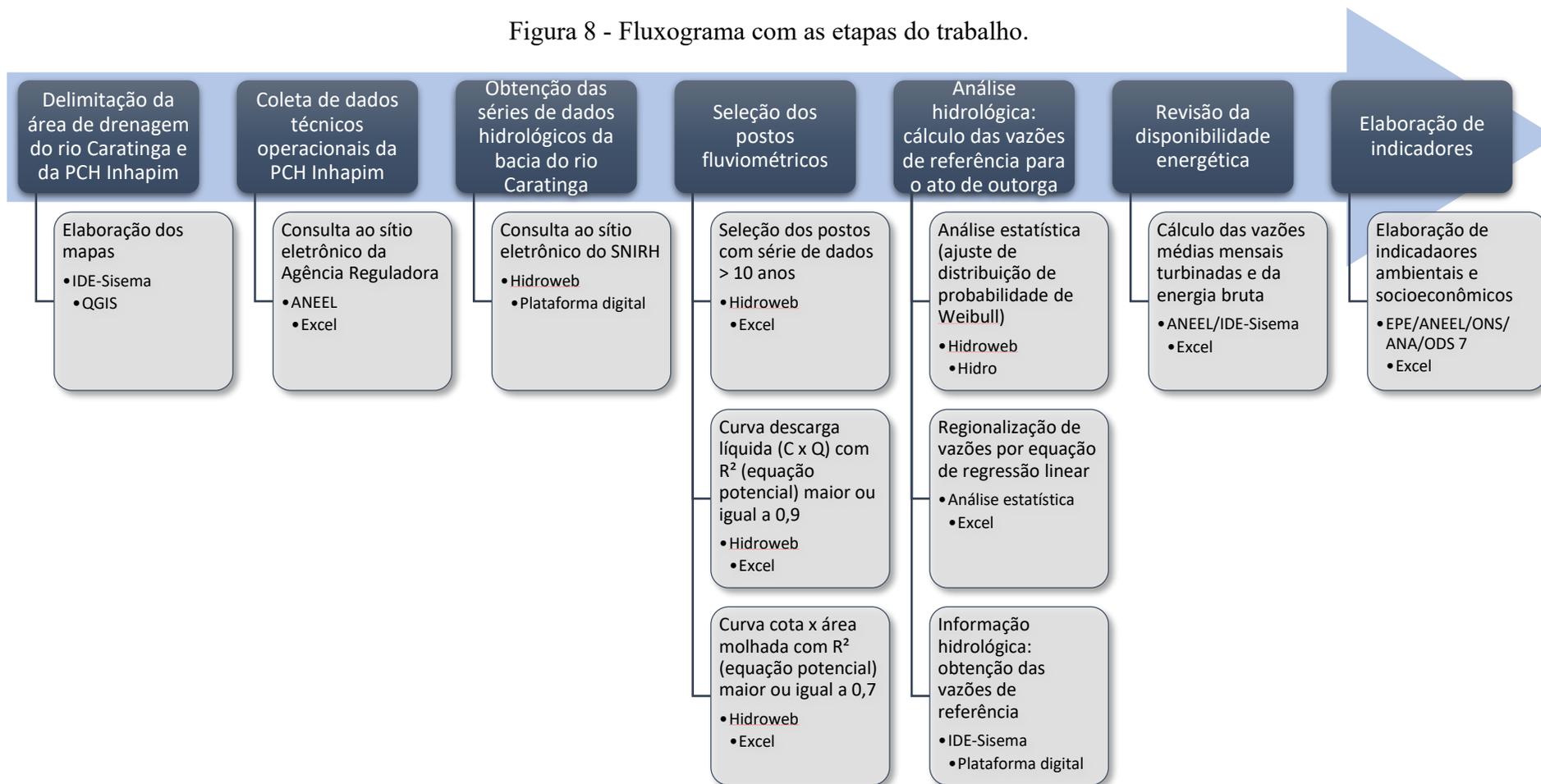
Além de autorizada à exploração do serviço público de geração de energia, a empresa Iguaçu Caaratinga Energia Ltda. é detentora da Portaria de Outorga n. 152, de 22 de janeiro de 2009, a qual confere o direito de uso de recursos hídricos para a finalidade de aproveitamento hidroenergético da PCH Inhapim, localizada no rio Caratinga, com o prazo de validade de 30 (trinta) anos, a contar de 19/11/2003, conforme dispõe o Art. 7º da Resolução Autorizativa ANEEL n. 607/2003 c/c o §2º do Art. 2º da Resolução Conjunta SEMAD/IGAM nº. 1.768, de 30 de novembro de 2012 (SIAM, 2023).

5.2 METODOLOGIA

5.2.1 Fluxograma de desenvolvimento do trabalho

As etapas de desenvolvimento desse estudo, desde o levantamento e o processamento dos dados até a obtenção dos resultados pode ser demonstrado pelo fluxograma representado pela Figura /Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma com as etapas do trabalho.



Fonte - Autor, 2023.

5.2.2 Delimitação da bacia hidrográfica do rio Caratinga e da área de drenagem da PCH Inhapim

Para a delimitação da área de drenagem da bacia hidrográfica do rio Caratinga foram obtidos os dados vetoriais disponibilizados pela plataforma da Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema).

Os dados da Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO), composta pelos ottotuchos de drenagem e ottobacias das áreas de contribuição hidrográfica correspondentes, foi instituído como a base hidrográfica oficial do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), conforme a publicação da Portaria IGAM n. 67, de 26 de agosto de 2021.

Conforme o IGAM (2021) a “(...) BHO representa a rede hidrográfica em trechos entre os pontos de confluência dos cursos d'água de forma unifilar. Cada trecho é associado a uma superfície de drenagem denominada ottobacia, à qual é atribuída a codificação de bacias de Otto Pfafstetter”.

A partir da obtenção dos dados vetoriais da camada Base Hidrográfica Ottocodificada do Rio Doce foi realizado o processamento das feições das ottobacias que correspondem à delimitação dos ottotuchos da área de contribuição hidrográfica do rio Caratinga por meio do programa QGIS (versão 3.16.14 – Hannover), o qual oferece suporte à visualização, edição e análise de dados geoespaciais.

Desta forma, com o uso do programa QGIS, por meio da função de seleção por filtro junto à tabela de atributos da camada da Base Hidrográfica Ottocodificada do Rio Doce, foi realizada a seleção das ottobacias que compõem a delimitação da bacia hidrográfica do rio Caratinga, o que contemplou toda a bacia à montante da ottobacia com código de bacia (cobacia) igual a 7636111, enquanto a delimitação da área de drenagem da PCH Inhapim contemplou a seleção das ottobacias que compõem toda a bacia à montante do código de bacia (cobacia) igual a 76369393.

A segunda etapa do processamento realizado consistiu da dissolução dos polígonos da delimitação espacial das feições que possuíam o atributo de codificação da ottobacia correspondente ao curso d'água principal, de modo a obter a delimitação final de toda a extensão da bacia de contribuição da foz do rio Caratinga e da área de drenagem até o local do aproveitamento hidroenergético da PCH Inhapim.

5.2.3 Obtenção dos dados técnicos e operacionais da PCH Inhapim

Os dados técnicos que definem as grandezas físicas dos conjuntos das unidades geradoras (conjunto turbina-gerador), os dados construtivos e hidráulicos que definem o regime operacional e a série de vazões médias mensais estabelecidas para a PCH Inhapim foram objeto de consulta processual junto ao sítio eletrônico da ANEEL.

Por meio da Nota Técnica n. 554/2015 da Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração (SCG) da ANEEL foi promovida a análise dos parâmetros necessários ao cálculo de Garantia Física de Energia (GFE) referente à PCH Inhapim, sendo homologada sua alteração conforme decisão proferida junto ao Despacho n. 2.464, de 30 de julho de 2015.

5.2.4 Identificação, seleção e análise dos postos fluviométricos com dados de vazões médias diárias da bacia do rio Caratinga

Para obtenção da vazão de referência e, conseqüentemente, da vazão mínima residual a jusante do eixo do aproveitamento hidrelétrico foi efetuada a pesquisa dos postos fluviométricos existentes na bacia hidrográfica do rio Caratinga.

Para a identificação dos postos fluviométricos existentes na área de drenagem do rio Caratinga foi realizado o download da camada da Rede Hidrometeorológica Nacional disponibilizada pelo Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) junto ao Catálogo de Metadados da ANA.

Posteriormente, com o auxílio do software QGIS (versão 3.16.14 – Hannover) foi realizado o recorte das estações da Rede Hidrometeorológica Nacional alojadas no interior da área de drenagem do rio Caratinga e, dentre as estações selecionadas, consultadas as estações com disponibilidade de dados hidrométricos de vazões médias diárias.

Os dados hidrométricos da série histórica dos postos fluviométricos a serem utilizados na respectiva análise da vazão de referência encontram-se no banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) e são disponibilizados junto ao Inventário de Estações Hidrométricas do Portal HidroWeb, sendo esta plataforma uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos Hidrológicas (SNIRH) da Agência Nacional de Águas (ANA), órgão responsável pela coordenação da RHN, conforme dispõe a Lei Federal n. 9.433, de 08 de janeiro de 1997.

Os dados de vazão obtidos nos postos fluviométricos convencionais representam as médias aritméticas das leituras diárias observadas às 07 e 17 horas, sendo obtidas por meio do uso de réguas linimétricas instaladas em seções fluviais de geometria conhecida (ANA, 2020).

Durante a etapa de pré-processamento foram aceitos para a análise os postos fluviométricos que possuíam disponibilidade de dados de vazão, brutos e consistidos, com período da série histórica de mínimo 10 anos, uma vez a limitação imposta pelas normativas que definem a metodologia de cálculo para a estimativa da vazão de referência ($Q_{7,10}$) adotada no âmbito do procedimento administrativo de outorga.

Considerada a premissa de uso de um modelo de regionalização de vazões, onde admite-se que uma região hidrológica homogênea possui características fisiográficas e hidrometeorológicas similares (GARBOSSA & PINHEIRO, 2015), não foi realizado o preenchimento de falhas a partir da análise de continuidade das vazões entre os postos fluviométricos em virtude da significativa diferença dimensional entre as áreas de drenagem das estações fluviométricas selecionadas e a ausência de interseções entre os períodos monitorados, sendo registrados diversos períodos de falha simultâneos que não poderiam ser preenchidos pela ausência de um posto com monitoramento contínuo.

Segundo Marcuzzo (2015), a aplicação de equações algébricas do tipo potencial e polinomial são as mais utilizadas na concepção de curvas-chave com a finalidade de estruturar a equação gerada segundo as medições de descarga líquida e as suas respectivas cotas, contudo, no Brasil, a mais difundida é a potencial.

Não obstante os requisitos impostos normativamente, uma vez a utilização de dados hidrométricos de alguns postos que não foram consistidos a partir de 2015, somente foram aceitos os postos que apresentaram o coeficiente de determinação (R^2) da curva de valores de descarga líquida maior ou igual a 0,9, em virtude de uma melhor qualidade do ajuste obtido pelo modelo de regressão potencial para a curva de descarga das estações investigadas.

5.2.5 Análise da disponibilidade hídrica

Por meio da Portaria n. 48, de 04 de outubro de 2019, o IGAM estabelece em seu Art. 2º que a vazão de referência a ser utilizada para o cálculo das disponibilidades hídricas superficiais no Estado de Minas Gerais é a vazão mínima de sete dias de duração e dez anos de recorrência – $Q_{7,10}$, tendo como referência o ano civil ($Q_{7,10}$ anual).

Não obstante, recentemente, por ocasião da publicação da Portaria IGAM n. 32, de 06 de setembro de 2022, foram promovidas duas alterações na metodologia de análise dos procedimentos administrativos de outorga, sendo: (i) a adoção do Estudo de Regionalização de Vazão da Bacia do Rio Doce (ANA/IGAM, 2022) como fonte oficial para os estudos de disponibilidade e demandas hídricas, regularização dos usos de recursos hídricos, bem como outros produtos, dados espaciais e sistemas elaborados e/ou consumidos pelo IGAM, referentes à gestão de recursos hídricos; e (ii) o estabelecimento da vazão mínima de sete dias de duração e dez anos de recorrência mensal ($Q_{7,10}$ mensal) como a vazão de referência a ser utilizada para o cálculo da disponibilidade hídrica superficial nas Circunscrições Hidrográficas da Bacia Hidrográfica do Rio Doce.

Considerando a análise dos impactos decorrentes do novo ato regulatório, bem como o campo de aplicação, a Instrução de Serviço SISEMA n. 02, de 2020, revisada em 22 de novembro de 2022, estabelece condições excepcionais para a regularização de intervenções de uso não consuntivo dos recursos hídricos, dentre elas, o aproveitamento hidrelétrico.

Segundo o referido ato normativo, os empreendimentos destinados ao aproveitamento do potencial de energia hidráulica (implantados ou não) que possuam a regra de operação do reservatório na modalidade de fio d'água, detentores ou não da outorga de direito de uso de recursos hídricos, não possuem suas regras alteradas e permanecem sujeitos a emissão do ato de regularização dos recursos hídricos tendo como referência a $Q_{7,10}$ anual, contudo, devem promover a manutenção de uma vazão residual que atenda a demanda hídrica do TVR e a manutenção do ecossistema.

Desta forma, a obtenção das vazões de referência para a análise de disponibilidade hídrica na referida seção de interesse, ou seja, a área de drenagem até o ponto de interseção da PCH Inhapim, considerou o uso de duas metodologias distintas, sendo: (i) a adoção de uma curva regionalização de vazões a partir das análises estatísticas dos dados hidrométricos dos postos selecionados; e (ii) as vazões informadas em cada seção fluvial (ottotrecho) do Estudo de Regionalização de Vazão da Bacia do Rio Doce (ANA/IGAM, 2022).

5.2.5.1 Cálculo das vazões de referência ($Q_{7,10}$) por análise estatística e regionalização de vazões

A vazão de referência consiste dos valores mínimos da média aritmética dos dados hidrométricos de sete dias consecutivos, considerado o calendário do ano civil, e tempo de recorrência de 10 anos submetidos à análise estatística, para identificação dos modelos probabilísticos com melhores ajustes aos dados ($Q_{7,10}$).

A vazão de referência ($Q_{7,10}$) dos postos fluviométricos aceitos para a análise hidrológica foi obtida por meio ajuste da função de distribuição de probabilidade de Weibull, sendo realizado o respectivo cálculo a partir do aplicativo computacional Hidro (versão 1.4).

O uso de equações de regressão consiste em um dos métodos mais utilizados para a realização dos estudos de regionalização de vazões mínimas (ELETROBRÁS, 1985; PINTO e ALVES, 2001).

Uma vez obtidas as vazões de referência dos postos fluviométricos selecionados, foi obtida a curva de regionalização da $Q_{7,10}$ da bacia do rio Caratinga em função da extensão de sua área de drenagem com o auxílio do programa Excel, sendo adotado o ajuste por equação de regressão do tipo linear.

5.2.5.2 Obtenção das vazões de referência ($Q_{7,10}$) dos Estudos de Regionalização (ANA/IGAM, 2022)

As informações hidrológicas das vazões de referência do Estudo de Regionalização de Vazão da Bacia do Rio Doce (ANA/IGAM, 2022), aplicadas aos estudos e processos de regularização dos usos dos recursos hídricos, encontram-se disponíveis junto à base de dados da plataforma IDE-Sisema e pode ser acessada por meio de consulta à respectiva camada clicando sobre o ototrecho (segmento) de interesse da seção fluvial.

Tal informação foi utilizada como fonte oficial para os estudos de disponibilidade hídrica e energética da PCH Inhapim, considerando a submissão ao procedimento de regularização dos usos de recursos hídricos para a modalidade de aproveitamento do potencial de energia hidráulica, conforme estabelecido pela Portaria IGAM n. 32, de 06 de setembro de 2022.

5.2.6 Cálculo da disponibilidade energética

De posse dos dados obtidos junto à etapa de pesquisa, bem como dos dados calculados, é possível determinar a Potência Elétrica, com base na altura da queda (H) e a vazão (Q) da água, enquanto as principais variáveis de uma central hidrelétrica (REIS, 2011, p. 109), conforme a equação (1):

$$P = \eta_{TOT} \times g \times Q \times H, \quad (1)$$

no qual:

P : potência elétrica (kW)

η_{TOT} : produto do rendimento do sistema hidráulico, turbina e gerador

g : aceleração da gravidade (9,81m/s²)

Q : vazão do curso d'água (m³/s)

H : queda bruta (m)

Já a disponibilidade energética por mês corresponde ao produto da Potência Elétrica instantânea multiplicada pela quantidade de horas correspondente ao mês de interesse (ANEEL, 2008), conforme a equação (2):

$$E_{\text{méd-mensal}} = (P \times n_{\text{mês-i}})/k, \quad (2)$$

no qual:

$E_{\text{méd-mensal}}$: energia média mensal (MWh)

P : potência elétrica (MW)

$n_{\text{mês-i}}$: número de horas no mês i (h)

k : número de meses da simulação energética

A disponibilidade de energia elétrica gerada pela PCH Inhapim pode ser apresentada em escala anual, efetuando-se a soma das disponibilidades da energia média mensal gerada.

No entanto, tendo em vista a existência de trecho de vazão reduzida (TVR), uma vez tratar-se de empreendimento na modalidade de derivação de fluxo, há a necessidade de dedução da parcela da vazão mínima residual a jusante do eixo do empreendimento para fins de calcular a vazão turbinada e, por derradeiro, estimar o potencial hidrelétrico e sua disponibilidade energética.

Assim, o Art. 3º da Portaria IGAM n. 48, de 04 de outubro de 2019, estabelece o limite máximo de captações em recursos hídricos a serem outorgados nas bacias hidrográficas do Estado de Minas Gerais, para cada seção considerada em condições naturais, sendo a referência espacial das circunscrições hidrográficas dos afluentes dos rios federais, ficando garantidos, a jusante de cada intervenção, fluxos residuais mínimos para os respectivos cursos d'água sob a dominialidade do Estado de Minas Gerais.

Desta forma, a vazão ecológica (fluxo residual mínimo) indiretamente estabelecida representa o resultado da subtração da parcela da vazão máxima outorgável da unidade da vazão de referência definida. Uma vez que a PCH Inhapim está localizada sobre a bacia do rio Caratinga (DO5), tem-se os parâmetros definidos no Quadro 1.

Quadro 1 - Vazão ecológica indiretamente estabelecida pela vazão máxima outorgável adotada no procedimento administrativo de outorga.

Vazão máxima outorgável	Vazão ecológica indiretamente estabelecida
50% da $Q_{7,10}$ para captações a fio d'água. Para captações em reservatórios, podem ser liberadas vazões superiores, mantendo o mínimo residual de 50% da $Q_{7,10}$ durante todo o tempo.	50% da $Q_{7,10}$

Fonte - IGAM (2019).

Em virtude da possibilidade dos critérios estabelecidos junto à Resolução Conjunta SEMAD/IGAM n. 1.768, de 30 de novembro de 2012, para o estabelecimento de uma vazão residual no TVR distinta da vazão de referência, foram avaliados os seguintes cenários de percentis das vazões mínimas remanescentes no TVR: (i) 100% da vazão de referência ($Q_{7,10}$); (ii) vazão ecológica indiretamente estabelecida pela definição da vazão máxima outorgável (50% da $Q_{7,10}$); e (iii) 30% da vazão de referência (30% da $Q_{7,10}$).

Posteriormente, foi calculada a disponibilidade energética⁸ para os 3 cenários estabelecidos de vazões mínimas remanescentes no TVR e identificados os montantes de disponibilidade mensal e anual de energia, bem como realizada a comparação de incremento energético (diferença entre os montantes - $\Delta E_{X - X_i}$) proporcionado pelos cenários de 30% e 50% da $Q_{7,10}$ quando comparados ao montante de energia gerado pelo cenário de estabelecimento de uma vazão residual equivalente a 100% da vazão de referência.

⁸ Para a efetividade dos cálculos foram desconsideradas as perdas de conexão ao sistema, o consumo interno e as taxas de indisponibilidade programada e forçada, uma vez que a elaboração da presente pesquisa visa estabelecer um modelo conceitual para análise do procedimento administrativo de outorga.

De modo a referenciar os termos que definem o incremento de energia nos respectivos cenários de vazões residuais, foi adotada a seguinte terminologia: (i) $\Delta E_{30\% - 100\%}$ - Incremento de energia bruta anual em MWh decorrente da adoção da vazão residual de 30% da $Q_{7,10}$ quando comparado à 100% da $Q_{7,10}$; e (ii) $\Delta E_{50\% - 100\%}$ - Incremento de energia bruta anual em MWh decorrente da adoção da vazão residual de 50% da $Q_{7,10}$ quando comparado à 100% da $Q_{7,10}$.

Contudo, embora tenham sido realizados os cálculos das vazões de referência ($Q_{7,10}$) por análise estatística e regionalização de vazões, dadas as disposições da Portaria IGAM n. 32, de 06 de setembro de 2022, esta publicada em meio à elaboração do presente estudo, foi adotada a vazão estabelecida no Estudo de Regionalização de Vazão da Bacia do Rio Doce (ANA/IGAM, 2022) como fonte oficial para os estudos de disponibilidade hídrica e energética da PCH Inhapim, considerando a submissão ao procedimento de regularização dos usos de recursos hídricos para a modalidade de aproveitamento do potencial de energia hidráulica.

5.2.7 Proposta de indicadores ambientais e socioeconômicos do incremento de disponibilidade energética

A partir da somatória decorrente do incremento de energia bruta para a adoção de uma vazão residual equivalente a 30% da $Q_{7,10}$ ($\Delta E_{30\% - 100\%}$) e 50% da $Q_{7,10}$ ($\Delta E_{50\% - 100\%}$), cria-se um cenário de potencialidade de uso deste adicional energético como fonte de desenvolvimento.

Dado o desafio de compatibilizar os eixos de sustentabilidade socioeconômica e ambiental, frente ao atendimento da demanda de energia elétrica, foi avaliada a equivalência deste potencial de incremento energético enquanto participação como fonte renovável da matriz elétrica, uma vez que esta reflete o desenvolvimento sustentável do setor, bem como implica positivamente no cumprimento dos acordos setoriais e das metas estabelecidas para o ODS 7 (Agenda 2030).

Desta forma, tratada a PCH Inhapim como o objeto do estudo de caso do presente trabalho, devido à inexistência de relacionamento operacional desta central hidrelétrica com o ONS, em possibilidade de substituição à ausência da condição estabelecida no inciso I, §3º do art. 2º da Resolução Conjunta SEMAD/IGAM n. 1.768, de 30 de novembro de 2012, foram elaborados alguns indicadores adimensionais tendo como base os dados da PCH Inhapim, como uma forma de representação do incremento energético sobre a disponibilidade energética anual do empreendimento, em percentuais relativos aos indicadores de sustentabilidade do próprio

setor, considerada a escala dos parques geradores nacional (Brasil) e estadual (Minas Gerais). Deve-se ressaltar que os indicadores elaborados nesse estudo foram sistematizados em uma planilha e poderão ser utilizados como ferramenta auxiliar na tomada de decisão em relação a quaisquer outras PCHs, constituindo-se, portanto, no produto desse trabalho.

Para a elaboração de tais parâmetros, que podem ter alguma correspondência às metas dos ODS (Agenda 2030), foram consideradas e selecionadas as informações técnicas dos relatórios e anuários estatísticos, elaborados pelos órgãos gestores de recursos hídricos (ANA) e do setor energético (ANEEL, EPE e ONS), conforme demonstrado na

Tabela 2.

Tabela 2 - Dados energéticos e socioeconômicos disponibilizados pelo SEB em 2022.

CI de fonte hidráulica no Brasil em 2021 (GW)	OIEE de fonte hidráulica no Brasil em 2021 (GWh)	OIEE de fonte hidráulica no Brasil no período seco em 2021 (GWh)
109,35	362.818	168.373
CI de fonte hidráulica em MG em 2021 (GW)	OIEE de fonte hidráulica em MG em 2021 (GWh)	OIEE de fonte hidráulica em MG no período seco em 2021 (GWh)
12,131	35.041	17.726
CI de fonte térmica no Brasil em 2021 (GW)	OIEE de fonte térmica no Brasil em 2021 (GWh)	
46,856	204.253	
CI de fonte térmica a combustível fóssil no Brasil em 2021 (GW)	OIEE de fonte térmica a combustível fóssil no Brasil em 2021 (GWh)	
27,089	122.690	
OIEE no Brasil em 2021(GWh)	OIEE em MG em 2021 (GWh)	
656.108	51.347	
OIEE de fonte térmica a combustível fóssil no período seco em 2021 (GWh)	PIB do Brasil em 2021 (10⁹ US\$)	
78.110	2.173,4	
Emissão de GEE pelo SEB por fontes térmicas a combustível fóssil no Brasil em 2021 (MtCO₂-eq)	Uso consuntivo de água no SEB para geração térmica no Brasil em 2021 (m³/s)	
77,81	91,8	

CI – Capacidade instalada; OIEE - Oferta Interna de Energia Elétrica.

Fonte - Adaptado pelo autor (2023) com base em ANA (2022), EPE (2022) e ONS (2022).

A partir dos dados energéticos e socioeconômicos foram elaborados alguns indicadores decorrentes das informações técnicas disponibilizadas que refletissem uma relação de produção específica por capacidade instalada, considerado o cenário nacional como fonte de referência para comparação entre o desempenho do parque gerador hidráulico de MG e da PCH Inhapim.

Tais indicadores devem refletir positivamente na importância de valorização das fontes de energia não renováveis e guardar relação com a concepção do aproveitamento e suas regras operacionais, de modo a promover uma linha de correspondência às metas do ODS 7 e enquadrar-se sob a ótica do critério de análise do procedimento administrativo de outorga.

Considerando o cenário de uma central elétrica de fonte hidráulica e as metas que possuem alguma dimensão de grandeza sobre a participação e a eficiência das fontes renováveis na matriz elétrica e a disponibilidade de energia limpa a preço acessível no mercado econômico, foi proposta a elaboração de indicadores que possuem uma correlação direta aos itens 7.1, 7.2 e 7.3 do ODS 7, os quais podem ser representados pela descrição dos quadros abaixo.

Índice 1: IRFCGHA - Índice de Relação do Fator de Capacidade da Geração Hidráulica Anual - Relação de comparação entre a energia bruta gerada de fonte hidráulica no período completo do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada hidráulica, sendo considerado o parque gerador hidráulico nacional como a referência fixa unitária;

Quadro 2 - Índice de Relação do Fator de Capacidade da Geração Hidráulica Anual.

IRFCGHA - Equação	
BR	$\left[\frac{EB_{(AHE)}}{CI_{(AHE)}} \times 8.760 \right]_{BRASIL}$, no qual: - EB_{AHE} - energia bruta de fonte hidráulica (GWh ou MWh); - CI_{AHE} - potência instalada fonte hidráulica (GW ou MW); - 8.760 - quantidade de horas por ano. - Referência fixa unitária (1).
MG	$\left[\frac{EB_{(AHE)}}{CI_{(AHE)}} \times 8.760 \right]_{MG} / \left[\frac{EB_{(AHE)}}{CI_{(AHE)}} \times 8.760 \right]_{BRASIL}$, no qual: - EB_{AHE} - energia bruta de fonte hidráulica (GWh ou MWh); - CI_{AHE} - potência instalada fonte hidráulica (GW ou MW); - 8.760 - quantidade de horas por ano.
PCH	$\left[\frac{EB_{(AHE)}}{CI_{(AHE)}} \times 8.760 \right]_{PCH} / \left[\frac{EB_{(AHE)}}{CI_{(AHE)}} \times 8.760 \right]_{BRASIL}$, no qual: - EB_{AHE} - energia bruta de fonte hidráulica (GWh ou MWh); - CI_{AHE} - potência instalada fonte hidráulica (GW ou MW); - 8.760 - quantidade de horas por ano.

Fonte - Autor, 2023.

Índice 2: IRFCGHPS - Índice de Relação do Fator de Capacidade da Geração Hidráulica no Período Seco - Relação de comparação entre a energia bruta gerada de fonte hidráulica no período seco do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada hidráulica, sendo considerado o parque gerador hidráulico nacional como a referência fixa unitária;

Quadro 3 - Índice de Relação do Fator de Capacidade da Geração Hidráulica no Período Seco.

IRFCGHPS - Equação	
BR	$[(EB_{(AHE)} / CI_{(AHE)}) \times 4.392]_{BRASIL}$, no qual: - EB_{AHE} - energia bruta de fonte hidráulica no período seco (GWh ou MWh); - CI_{AHE} - potência instalada fonte hidráulica (GW ou MW); - 4.392 - quantidade de horas de abril a setembro. - Referência fixa unitária (1).
MG	$[(EB_{(AHE)} / CI_{(AHE)}) \times 4.392]_{MG} / [(EB_{(AHE)} / CI_{(AHE)}) \times 4.392]_{BRASIL}$, no qual: - EB_{AHE} - energia bruta de fonte hidráulica no período seco (GWh ou MWh); - CI_{AHE} - potência instalada fonte hidráulica (GW ou MW); - 4.392 - quantidade de horas de abril a setembro;
PCH	$[(EB_{(AHE)} / CI_{(AHE)}) \times 4.392]_{PCH} / [(EB_{(AHE)} / CI_{(AHE)}) \times 4.392]_{BRASIL}$, no qual: - EB_{AHE} - energia bruta de fonte hidráulica no período seco (GWh ou MWh); - CI_{AHE} - potência instalada fonte hidráulica (GW ou MW); - 4.392 - quantidade de horas de abril a setembro;

Fonte - Autor, 2023.

Índice 3 - IRGHPSA - Índice de Relação entre a Geração Hidráulica do Período Seco sobre o Anual - Relação de comparação entre a energia bruta gerada de fonte hidráulica no período seco do ano civil sobre a energia bruta gerada de fonte hidráulica no período completo do ano civil, sendo considerado o parque gerador hidráulico nacional como a referência fixa unitária;

Quadro 4 - Índice de Relação entre a Geração Hidráulica do Período Seco sobre o Anual.

IRGHPSA - Equação	
BR	$[(EB_{AHE(SECO)} / EB_{AHE(ANO)})]_{BRASIL}$, no qual: - $EB_{AHE(SECO)}$ - energia bruta de fonte hidráulica no período seco (GWh ou MWh); - $EB_{AHE(ANO)}$ - energia bruta de fonte hidráulica no período completo (GWh ou MWh); - Referência fixa unitária (1).
MG	$[(EB_{AHE(SECO)} / EB_{AHE(ANO)})]_{MG} / [(EB_{AHE(SECO)} / EB_{AHE(ANO)})]_{BRASIL}$, no qual: - $EB_{AHE(SECO)}$ - energia bruta de fonte hidráulica no período seco (GWh ou MWh); - $EB_{AHE(ANO)}$ - energia bruta de fonte hidráulica no período completo (GWh ou MWh);
PCH	$[(EB_{AHE(SECO)} / EB_{AHE(ANO)})]_{PCH} / [(EB_{AHE(SECO)} / EB_{AHE(ANO)})]_{BRASIL}$, no qual: - $EB_{AHE(SECO)}$ - energia bruta de fonte hidráulica no período seco (GWh ou MWh); - $EB_{AHE(ANO)}$ - energia bruta de fonte hidráulica no período completo (GWh ou MWh);

Fonte - Autor, 2023.

Índice 4: IREGEEPS - Índice de Redução da Emissão GEE no Período Seco - Índice de redução de emissão de GEE (CO₂) por capacidade instalada de geração hidráulica no período seco em relação à emissão de GEE por capacidade instalada de geração termelétrica no período seco, considerada a referência fixa unitária do parque gerador térmico nacional;

Quadro 5 - Índice de Redução da Emissão GEE no Período Seco.

IREGEEPS - Equação	
BR	$\frac{[(EB_{(AHE)}/CI_{(AHE)}) \times 0,6342]_{BRASIL}}{[(EB_{UTE(FÓSSIL)}/CI_{UTE(FÓSSIL)}) \times 0,6342]_{BRASIL}}$, no qual: <ul style="list-style-type: none"> - EB_{AHE} - energia bruta de fonte hidráulica no período seco (GWh); - CI_{AHE} - potência instalada de fonte hidráulica (GW); - EB_{UTE(FÓSSIL)} - energia bruta de fonte térmica (fóssil) no período seco (GWh); - CI_{UTE(FÓSSIL)} - potência instalada de fonte térmica (fóssil) no período seco (GW); - 0,6342 - constante para conversão de unidade (634,2 tCO₂-eq/GWh)
MG	$\frac{[(EB_{(AHE)}/CI_{(AHE)}) \times 0,6342]_{MG}}{[(EB_{UTE(FÓSSIL)}/CI_{UTE(FÓSSIL)}) \times 0,6342]_{BRASIL}}$, no qual: <ul style="list-style-type: none"> - EB_{AHE} - energia bruta de fonte hidráulica no período seco (GWh); - CI_{AHE} - potência instalada de fonte hidráulica (GW); - EB_{UTE(FÓSSIL)} - energia bruta de fonte térmica (fóssil) no período seco (GWh); - CI_{UTE(FÓSSIL)} - potência instalada de fonte térmica (fóssil) no período seco (GW); - 0,6342 - constante para conversão de unidade (634,2 tCO₂-eq/GWh)
PCH	$\frac{[(EB_{(AHE)}/CI_{(AHE)}) \times 0,6342]_{PCH}}{[(EB_{UTE(FÓSSIL)}/CI_{UTE(FÓSSIL)}) \times 0,6342]_{BRASIL}}$, no qual: <ul style="list-style-type: none"> - EB_{AHE} - energia bruta de fonte hidráulica no período seco (GWh); - CI_{AHE} - potência instalada de fonte hidráulica (GW); - EB_{UTE(FÓSSIL)} - energia bruta de fonte térmica (fóssil) no período seco (GWh); - CI_{UTE(FÓSSIL)} - potência instalada de fonte térmica (fóssil) no período seco (GW); - 0,6342 - constante para conversão de unidade (634,2 tCO₂-eq/GWh)

*A produção de energia elétrica por UTE a combustível fóssil em 2021 foi de 122.690 GWh e emitiu 77,81 MtCO₂, resultando em uma taxa de 634,2 kgCO₂/MWh produzido.

Fonte - Autor, 2023.

Índice 5: IRRAGT - Índice de Redução da Retirada de Água para Geração Termelétrica - Índice de redução da retirada de água por capacidade instalada de geração hidráulica do Brasil em relação à retirada de água por capacidade instalada de geração termelétrica, considerada a referência fixa unitária como o volume de recursos hídricos retirado por cada unidade de capacidade instalada do parque gerador termelétrico nacional;

Quadro 6 - Índice de Redução de Retirada de Água para Geração Térmica.

IRRAGT - Equação	
BR	$\left[\frac{(VR_{(UTE)}/EB_{(UTE)})_{BRASIL} \times (EB_{(AHE)}/CI_{(AHE)})_{BRASIL}}{[(VR_{(UTE)}/CI_{(UTE)})_{BRASIL}]} \right]$, no qual: <ul style="list-style-type: none"> - VR_{UTE} - Volume de água retirada para geração térmica (mh³/ano) - EB_{AHE} - energia bruta de fonte hidráulica (GWh ou MWh); - CI_{AHE} - potência instalada de fonte hidráulica (GW ou MW); - EB_{UTE} - energia bruta de fonte térmica (GWh ou MWh); - CI_{UTE} - potência instalada de fonte térmica (GW ou MW);
MG	$\left[\frac{(VR_{(UTE)}/EB_{(UTE)})_{BRASIL} \times (EB_{(AHE)}/CI_{(AHE)})_{MG}}{[(VR_{(UTE)}/CI_{(UTE)})_{BRASIL}]} \right]$, no qual: <ul style="list-style-type: none"> - VR_{UTE} - Volume de água retirada para finalidade de geração térmica (mh³/ano) - EB_{AHE} - energia bruta de fonte hidráulica (GWh ou MWh); - CI_{AHE} - potência instalada de fonte hidráulica (GW ou MW); - EB_{UTE} - energia bruta de fonte térmica (GWh ou MWh); - CI_{UTE} - potência instalada de fonte térmica (GW ou MW);
PCH	$\left[\frac{(VR_{(UTE)}/EB_{(UTE)})_{BRASIL} \times (EB_{(AHE)}/CI_{(AHE)})_{PCH}}{[(VR_{(UTE)}/CI_{(UTE)})_{BRASIL}]} \right]$, no qual: <ul style="list-style-type: none"> - VR_{UTE} - Volume de água retirada para finalidade de geração térmica (mh³/ano) - EB_{AHE} - energia bruta de fonte hidráulica (GWh ou MWh); - CI_{AHE} - potência instalada de fonte hidráulica (GW ou MW); - EB_{UTE} - energia bruta de fonte térmica (GWh ou MWh); - CI_{UTE} - potência instalada de fonte térmica (GW ou MW);

*O volume de retirada de água (VR) para geração de 204.253 GWh de fonte termoelétrica em 2021 foi equivalente a 91,8 m³/s ou 2894,89 hm³/ano, o que representa uma taxa de consumo de 0,014 hm³/GWh.ano produzido (ANA, 2022; EPE, 2022).

Fonte - Autor, 2023.

Índice 6 – IPPFHFC - Índice da Parcela do PIB de Fonte Hidráulica sobre Fonte Complementar - Índice de relação da parcela do PIB gerada pela oferta interna de energia elétrica (OIEE) a partir de fonte hidráulica em relação à parcela do PIB gerada pela oferta interna de energia elétrica (OIEE) a partir de outras fontes de energia, sendo considerado o parque gerador hidráulico nacional como a referência fixa unitária;

Quadro 7 - Índice da Parcela do PIB de Fonte Hidráulica sobre Fonte Complementar.

IPPFHFC - Equação	
BR	$\frac{[(\text{PIB}/\text{OIEE}) \times (\text{OIEE}_{(\text{AHE})}/\text{OIEE})]_{\text{BRASIL}}}{[(\text{PIB}/\text{OIEE})_{\text{BRASIL}} \times (1 - (\text{OIEE}_{(\text{AHE})}/\text{OIEE})]_{\text{BRASIL}}}$, no qual: <ul style="list-style-type: none"> - PIB - Produto Interno Bruto do Brasil (10⁹ US\$); - OIEE - Oferta interna de energia elétrica (GWh ou MWh); - OIEE_{AHE} - Oferta interna de energia elétrica de fonte hidráulica (GWh ou MWh); - Referência fixa unitária (1).
MG	$\frac{[(\text{PIB}/\text{OIEE})_{\text{BRASIL}} \times (\text{OIEE}_{(\text{AHE})}/\text{OIEE})_{\text{MG}}]}{[(\text{PIB}/\text{OIEE})_{\text{BRASIL}} \times (1 - (\text{OIEE}_{(\text{AHE})}/\text{OIEE})_{\text{MG}}]}$, no qual: <ul style="list-style-type: none"> - PIB - Produto Interno Bruto do Brasil (10⁹ US\$); - OIEE - Oferta interna de energia elétrica (GWh ou MWh) - OIEE_{AHE} - Oferta interna de energia elétrica de fonte hidráulica (GWh ou MWh);
PCH	$\frac{[(\text{PIB}/\text{OIEE})_{\text{BRASIL}} \times (\text{OIEE}_{(\text{AHE})}/\text{OIEE})_{\text{PCH}}]}{[(\text{PIB}/\text{OIEE})_{\text{BRASIL}} \times (1 - (\text{OIEE}_{(\text{AHE})}/\text{OIEE})_{\text{PCH}}]}$, no qual: <ul style="list-style-type: none"> - PIB - Produto Interno Bruto do Brasil (10⁹ US\$); - OIEE - Oferta interna de energia elétrica (GWh ou MWh) - OIEE_{AHE} - Oferta interna de energia elétrica de fonte hidráulica (GWh ou MWh);

Fonte - Autor, 2023.

Os dados necessários à análise e composição dos indicadores foram obtidos juntamente aos diversos órgãos e setores responsáveis pelo SEB e pelas estatísticas populacionais.

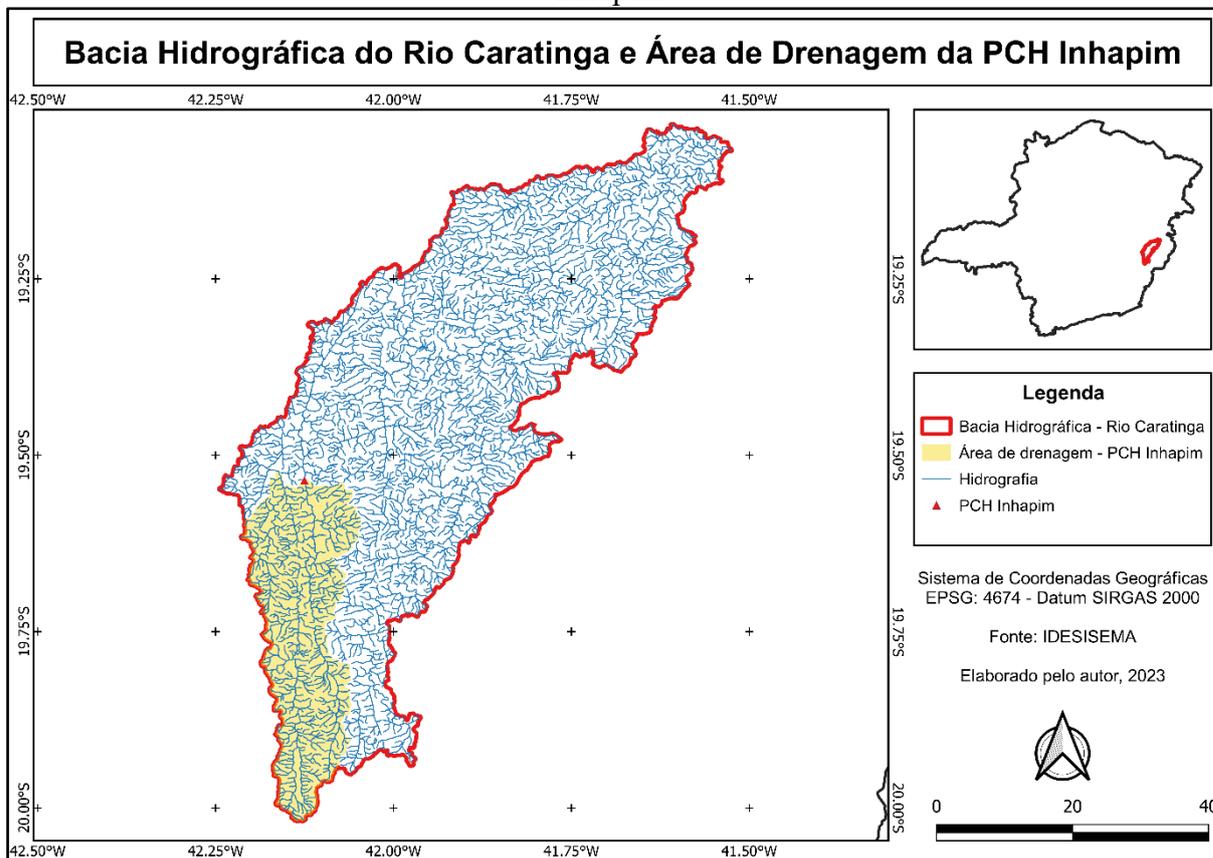
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CARATINGA E ÁREA DE DRENAGEM DA PCH INHAPIM

Após o processamento das feições das ottobacias por meio do programa QGIS (versão 3.16.14 – Hannover) foi obtida a delimitação espacial das feições que possuíam o atributo de codificação da ottobacia correspondente ao curso d'água principal, de modo a obter a delimitação final de toda a extensão da bacia de contribuição do rio Caratinga e da área de

drenagem até o local do aproveitamento hidroenergético da PCH Inhapim, conforme pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 - Delimitação da bacia hidrográfica do rio Caratinga e da área de drenagem da PCH Inhapim.



Fonte - Autor, 2023.

6.2 DADOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS DA PCH INHAPIM

Conforme consulta aos autos do Processo Administrativo ANEEL n. 48500.003061/2001-97 verifica-se que, quando da revisão da Garantia Física de Energia - GFE, por meio do Relatório de Levantamento Topográfico Planialtimétrico Georreferenciado, anexo ao protocolo ANEEL n. 48513.020366/2015-00, foram informadas as características físicas dos conjuntos das unidades geradoras e os dados construtivos e hidráulicos operacionais da PCH Inhapim, conforme a Portaria n. 463, de 03 de dezembro de 2009, a qual estabelecer a metodologia para o cálculo e revisão dos montantes de garantia física de energia de Usinas

Hidrelétricas não despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS.

Diante da revisão dos parâmetros para o cálculo da garantia física da PCH Inhapim, por ocasião do Despacho n. 2.464, de 30 de julho de 2015, as referidas informações contemplam não somente as características físicas dos conjuntos das unidades geradoras e os dados construtivos e hidráulicos operacionais da PCH Inhapim, bem como estabelece em seu Anexo I a série de vazões médias mensais da PCH Inhapim, conforme Tabela 3 e

Tabela 4.

Tabela 3 - Características físicas dos conjuntos das unidades geradoras e os dados construtivos e hidráulicos operacionais da PCH Inhapim.

Rendimento da turbina η_T (%)	Rendimento do gerador η_G (%)	Rendimento do conjunto turbina-gerador η_{TOT} (%)	N.A. de montante (m)	N.A. de jusante (m)	Queda bruta H_B (m)	Perda hidráulica (%)	Queda líquida H_L (m)
92	96,2	88,504	460,486	364,958	95,528	5%	90,7516

Fonte - Adaptado pelo autor (2023) com base em ANEEL (2015).

Tabela 4 - Série de vazões médias mensais no ponto de intervenção da PCH Inhapim.

Série de vazões médias mensais (m ³ /s)												Vazão média de longo termo Q_{MLT} (m ³ /s)
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
11,29	8,16	7,65	6,06	4,67	4,02	3,62	3,17	3,03	3,99	7,46	11,06	6,18

Fonte - Despacho ANEEL n.º 2.464, de 30 de julho de 2015

6.3 POSTOS FLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS

Conforme a Tabela 5, podem ser visualizados os postos fluviométricos identificados com disponibilidade de dados de vazões que se encontram inseridos na bacia hidrográfica do rio Caratinga.

Tabela 5 - Postos fluviométricos selecionados para pesquisa e suas respectivas vazões de referência.

Código	Descrição	Curso d'água	Área de drenagem (km²)	Período inicial	Período final
56923800	Santa Bárbara do Leste	Rio Caratinga	9,93	08/2010	01/2019
56924100	Tabuleiro	Rio Caratinga	68	12/2008	12/2014
56924500	Santa Rita de Minas	Rio Caratinga	95	11/2004	11/2022
56925000	Caratinga	Rio Caratinga	162	05/1938	12/1965
56925050	PCH Inhapim Montante 2	Rio Caratinga	274	02/2015	04/2023
56926100	Ubaporanga	Rio Caratinga	410	01/2015	12/2015
56928000	Inhapim	Rio Caratinga	575	12/2005	01/2019
56927500	PCH Inhapim Montante 1	Rio Caratinga	578	02/2015	04/2023
56927900	PCH Inhapim Jusante	Rio Caratinga	596	02/2015	04/2023
56935000	Dom Cavati	Rio Caratinga	775	09/1965	11/2022
56940000	Barra do Cuieté	Rio Cuieté	3220	08/1938	11/1975
56940002	Barra do Cuieté Jusante	Rio Cuieté	3220	11/1975	11/2022

Fonte - Adaptado pelo autor (2023) com base em Hidroweb (2023).

Contudo, em virtude dos critérios de seleção para a realização dos cálculos da vazão de referência, os postos fluviométricos 56923800 (Santa Bárbara do Leste), 56924100 (Tabuleiro), 56925050 (PCH Inhapim Montante 2), 56926100 (Ubaporanga), 56927500 (PCH Inhapim Montante 1) e 56927900 (PCH Inhapim Jusante) não possuem tempo mínimo da série de dados para aplicação da metodologia de análise.

Embora os postos fluviométricos 56924500 (Caratinga) e 5694000 (Barra do Cuieté) possuíssem as séries de dados de vazões médias diárias em período de monitoramento superior ao exigido e já consistidas pela ANA, os mesmos foram excluídos por apresentarem coeficiente de determinação (R^2) da curva de descarga líquida (cota x vazão) muito inferior a 0,9 e da curva cota x área molhada inferior a 0,7. Além disso, a estação 56940000 (Barra do Cuieté) apresentou comportamento assimétrico em relação ao posto fluviométrico 56940002 (Barra do Cuieté Jusante) quando comparada a sua área de drenagem, impedindo a unificação dos mesmos em um único posto.

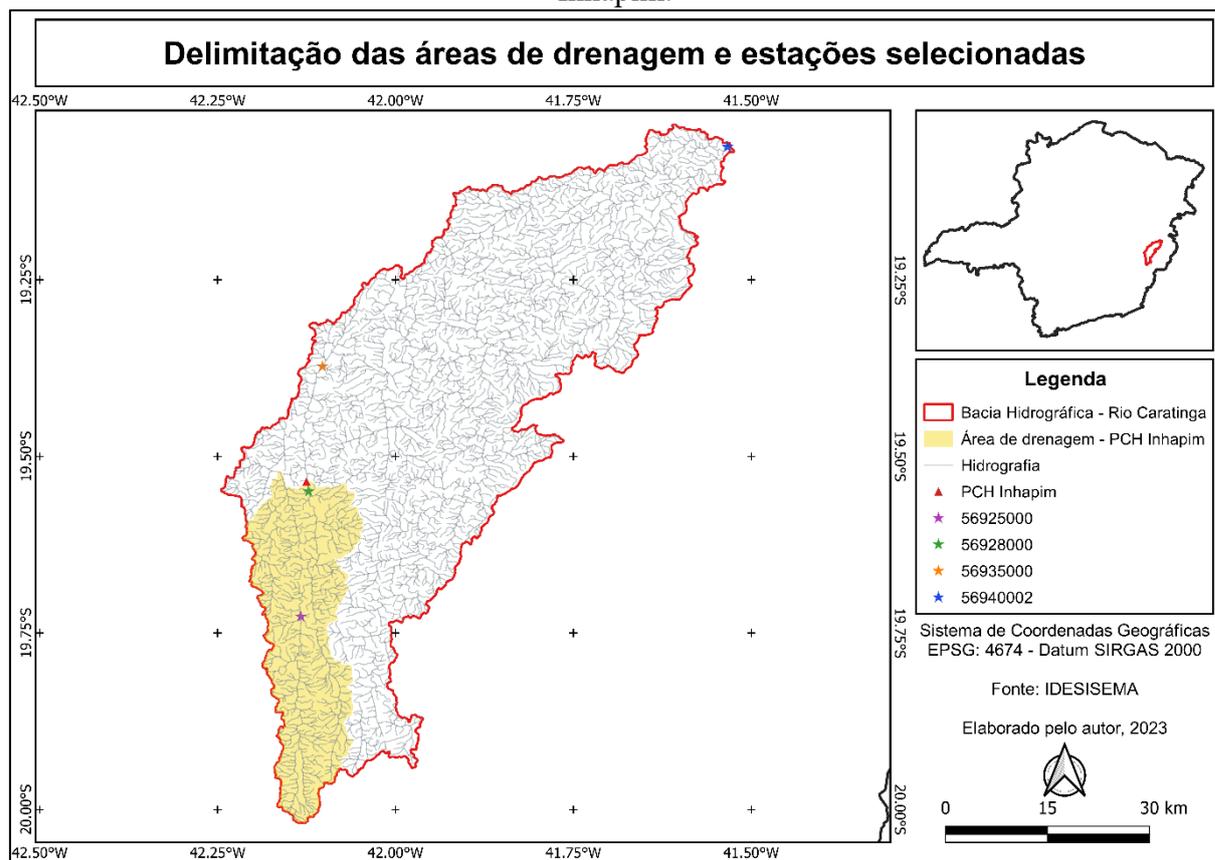
Assim, os postos utilizados para análise da curva de descarga líquida (aplicação do modelo de regressão) e, conseqüentemente, para o cálculo das vazões de referência estão listados na Tabela 6 e sua localização pode ser visualizada na Figura 10.

Tabela 6 - Postos fluviométricos selecionados após o processamento.

Código do posto	Descrição	Área de drenagem (km ²)	Coefficiente de determinação (R ²)
56925000	Caratinga	162	0,90
56928000	Inhapim	575	0,91
56935000	Dom Cavati	775	0,94
56940002	Barra do Cuieté Jusante	3220	0,98

Fonte - Autor, 2023.

Figura 10 - Delimitação da bacia hidrográfica do rio Caratinga e da área de drenagem da PCH Inhapim.



Fonte - Autor, 2023.

6.4 VAZÕES DE REFERÊNCIA ($Q_{7,10}$) POR ANÁLISE ESTATÍSTICA E REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES E POR CONSULTA AO IDE-SISEMA

As vazões de referência ($Q_{7,10}$) dos postos fluviométricos aceitos para a análise hidrológica foi obtida por meio do ajuste da função de distribuição de probabilidade de Weibull e pode ser demonstrada na Tabela 7.

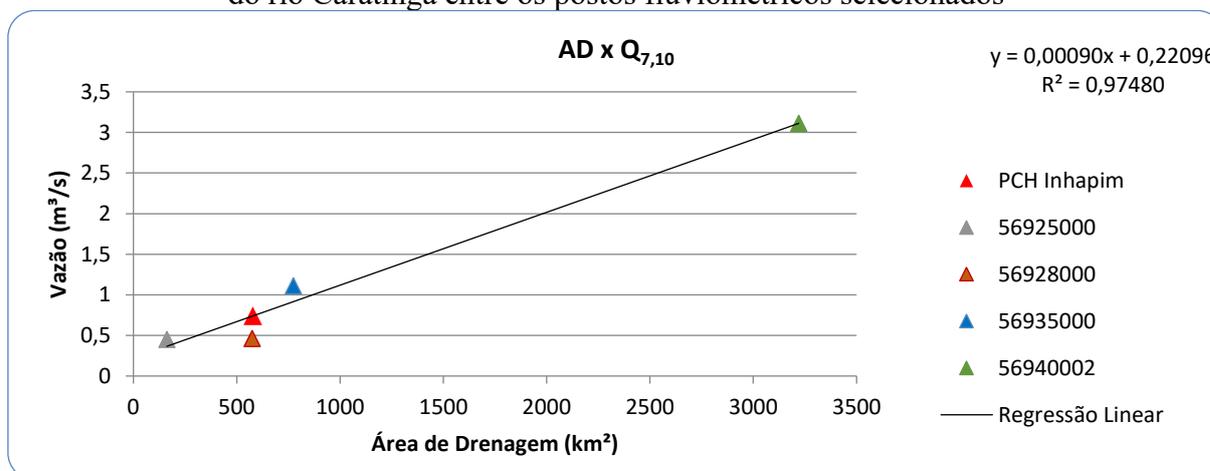
Tabela 7 - Postos fluviométricos selecionados para pesquisa e suas respectivas vazões de referência.

Código do posto	Descrição	Área de drenagem (km ²)	$Q_{7,10}$ (m ³ /s)
56925000	Caratinga	162	0,45
56928000	Inhapim	575	0,46
56935000	Dom Cavati	775	1,17
56940002	Barra do Cuieté Jusante	3220	3,11

Fonte - Autor, 2023.

Após a obtenção das vazões de referência dos postos fluviométricos selecionados, foi obtida a equação de regressão linear da curva de regionalização da $Q_{7,10}$ para a faixa das áreas de drenagem dos mesmos e realizado o cálculo da $Q_{7,10}$ da PCH Inhapim, a qual representou 0,74 m³/s para a extensão de 579 km² de área de drenagem, conforme o Gráfico 4.

Gráfico 4 - Equação de regressão linear das vazões de referência ($Q_{7,10}$) da bacia hidrográfica do rio Caratinga entre os postos fluviométricos selecionados



Fonte - Autor, 2023

A vazão de referência do ottotrecho de inserção da PCH Inhapim no rio Caratinga, disponível junto à camada do Estudo de Regionalização de Vazão da Bacia do Rio Doce (ANA/IGAM, 2022) da base de dados da plataforma IDE-Sisema foi obtida clicando sobre o ottotrecho (segmento) de interesse da seção fluvial, a qual representa 0,85 m³/s.

6.5 DISPONIBILIDADE ENERGÉTICA DA PCH INHAPIM

Encontradas as vazões de referência anual ($Q_{7,10}$ anual) para a seção fluvial onde está alojada a PCH Inhapim, a disponibilidade energética mensal e anual para os 3 cenários estabelecidos de vazões mínimas remanescentes no TVR pode ser representada por meio do resumo do memorial de cálculo através da Tabela 8.

Tabela 8 - Disponibilidade energética calculada em função dos cenários da vazão de referência $Q_{7,10}$ no TVR da PCH Inhapim.

Mês	100% $Q_{7,10}$							50% $Q_{7,10}$				30% $Q_{7,10}$			
	Q_{MLT}	η_{TOT}	H_L	Q_{TVR}	Q_{LIQ}	P_{BRUTA}	E_{BRUTA}	Q_{TVR}	Q_{LIQ}	P_{BRUTA}	E_{BRUTA}	Q_{TVR}	Q_{LIQ}	P_{BRUTA}	E_{BRUTA}
	(m^3/s)	(%)	(m)	(m^3/s)	(m^3/s)	(kW)	(MWh)	(m^3/s)	(m^3/s)	(kW)	(MWh)	(m^3/s)	(m^3/s)	(kW)	(MWh)
Jan	11,2930	88,5040	90,7516	0,85	10,44	6000,00	4464,00	0,43	10,87	6000,00	4464,00	0,26	11,04	6000,00	4464,00
Fev	8,1645	88,5040	90,7516	0,85	7,31	5759,16	3870,15	0,43	7,74	6000,00	4032,00	0,26	7,91	6000,00	4032,00
Mar	7,6542	88,5040	90,7516	0,85	6,80	5357,07	3985,66	0,43	7,23	5693,88	4236,25	0,26	7,40	5828,60	4336,48
Abr	6,0557	88,5040	90,7516	0,85	5,20	4097,62	2950,28	0,43	5,63	4434,43	3192,79	0,26	5,80	4569,15	3289,79
Mai	4,6693	88,5040	90,7516	0,85	3,81	3005,33	2235,97	0,43	4,24	3342,14	2486,55	0,26	4,41	3476,86	2586,79
Jun	4,0180	88,5040	90,7516	0,85	3,16	2492,15	1794,35	0,43	3,59	2828,96	2036,85	0,26	3,76	2963,68	2133,85
Jul	3,6158	88,5040	90,7516	0,85	2,76	2175,28	1618,41	0,43	3,19	2512,09	1869,00	0,26	3,36	2646,82	1969,23
Ago	3,1732	88,5040	90,7516	0,85	2,32	1826,51	1358,92	0,43	2,75	2163,32	1609,51	0,26	2,92	2298,04	1709,74
Set	3,0262	88,5040	90,7516	0,85	2,17	1710,69	1231,69	0,43	2,60	2047,50	1474,20	0,26	2,77	2182,22	1571,20
Out	3,9880	88,5040	90,7516	0,85	3,13	2468,51	1836,57	0,43	3,56	2805,32	2087,16	0,26	3,73	2940,04	2187,39
Nov	7,4627	88,5040	90,7516	0,85	6,61	5206,19	3748,45	0,43	7,04	5543,00	3990,96	0,26	7,21	5677,72	4087,96
Dez	11,0562	88,5040	90,7516	0,85	10,20	6000,00	4464,00	0,43	10,63	6000,00	4464,00	0,26	10,80	6000,00	4464,00

Fonte - Autor, 2023.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 8, seguem os montantes de disponibilidade anual de energia e as comparações de incremento energético (diferença entre os montantes - $\Delta E_{X - x_i}$) proporcionados pelos cenários de 30% e 50% quando comparados ao montante de energia gerado pelo cenário de 100% das vazões de referência Tabela 9.

Deve-se destacar o 2º trimestre do período crítico (julho, agosto e setembro) do ano civil, em virtude da baixa disponibilidade hídrica sazonal do ciclo hidrológico da região.

Tabela 9 - Somatória da disponibilidade energética e incremento de energia calculado em função dos cenários das vazões de referência no TVR da PCH Inhapim.

Cenário TVR	ΣE_{BRUTA} (MWh/ano)	Incremento de E_{BRUTA} (MWh)	
30% $Q_{7,10}$	36.832,43	$\Delta E_{30\% - 100\%}$	3.273,97
50% $Q_{7,10}$	35.943,25	$\Delta E_{50\% - 100\%}$	2.384,79
100% $Q_{7,10}$	33.558,46	-	-

Fonte - Autor, 2023

6.6 INDICADORES AMBIENTAIS E SOCIECONÔMICOS DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO (SEB)

Os resultados obtidos a partir dos dados de referência do respectivo setor, contemplando o uso das informações técnicas obtidas junto aos documentos públicos elaborados pelos órgãos gestores do setor energético e de recursos hídricos, foram setorizados em escala das unidades federativas do Brasil e do Estado de Minas Gerais e dos dados de interesse da PCH Inhapim, conforme apresentados a seguir.

6.6.1 Setor Elétrico - Brasil

1 - $[(EB_{(AHE)} / CI_{(AHE)}) \times 8.760]_{BRASIL}$ – Índice de relação do fator de capacidade entre a energia bruta gerada no período completo do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada no parque gerador hidráulico, considerada como a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional, conforme a

Tabela 10 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período completo do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada no parque gerador hidráulico nacional.

Tabela 10.

Tabela 10 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período completo do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada no parque gerador hidráulico nacional.

Parque Gerador Hidráulico (Brasil)			
EB_{AHE} (GWh)	CI_{AHE} (GW)	EB_{AHE}/[CI_{AHE} x 8.760] (Wh/Wh)	Índice unitário de referência do fator de capacidade do PGH Brasil
362.818	109,35	0,38	1

Fonte - Autor, 2023

2 - $[(EB_{(AHE)} / CI_{(AHE)}) \times 4.392]_{BRASIL}$ - Índice de relação do fator de capacidade entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada no parque gerador hidráulico, considerada como a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional, conforme a Tabela 11.

Tabela 11 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada no parque gerador hidráulico nacional.

Parque Gerador Hidráulico (Brasil)			
EB_{AHE} (GWh)	CI_{AHE} (GW)	EB_{AHE}/[CI_{AHE} x 4.392] (Wh/Wh)	Índice unitário de referência do fator de capacidade do PGH Brasil
168.373	109,35	0,35	1

Fonte - Autor, 2023

3 - $[(EB_{AHE(SECO)}/EB_{(ANO)})]_{BRASIL} / [(EB_{AHE(SECO)}/EB_{(ANO)})]_{BRASIL}$ - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a energia bruta gerada no período completo do ano civil, considerada a referência fixa unitária do parque gerador nacional, conforme a Tabela 12.

Tabela 12 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a energia bruta gerada no período completo do ano civil no Brasil.

Parque Gerador Hidráulico (Brasil)

EB_{AHE} Ano civil (GWh)	EB_{AHE} Período Seco (GWh)	EB_{AHE} período seco sobre a EB_{AHE} ano civil (GWh/GWh)	Índice unitário de referência entre a EB_{AHE} ano civil / período seco
362.818	168.373	0,46	1

Fonte - Autor, 2023

4 - $[(EB_{(AHE)}/CI_{(AHE)}) \times 0,6342]_{BRASIL} / [(EB_{UTE(FÓSSIL)}/CI_{UTE(FÓSSIL)}) \times 0,6342]_{BRASIL}$ - Índice de redução de emissão de GEE por capacidade instalada de geração hidráulica do Brasil no período seco em relação à emissão de GEE por capacidade instalada de geração térmica, considerada a referência fixa unitária do parque gerador térmico nacional, conforme a Tabela 13.

Tabela 13 - Índice de redução de emissão de GEE por capacidade instalada de geração hidráulica no período seco em relação à emissão de GEE por capacidade instalada de geração térmica no Brasil.

Parque Gerador Térmico a combustível fóssil (Brasil)			
$EB_{UTE(FÓSSIL)}$ período seco (GWh)	$CI_{UTE(FÓSSIL)}$ (GW)	Taxa de emissão de GEE (CO ₂) por CI_{UTE} a combustível fóssil (tCO ₂ /GW)	Índice unitário de emissão de CO ₂ por CI_{UTE} a combustível fóssil (período seco)
78.110	27,089	1828,69	1

Parque Gerador Hidráulico (Brasil)			
EB_{AHE} período seco (GWh)	CI_{AHE} (GW)	Redução de emissões de CO ₂ [EB_{AHE}/CI_{AHE}] x 0,6342] (tCO ₂ /GW)	Índice de redução de emissão de CO ₂ por CI_{AHE} em relação a CI_{UTE} a combustível fóssil no Brasil
168.373	109,35	976,52	0,534

*A produção de energia elétrica por UTE a combustível fóssil em 2021 foi de 122.690GWh e emitiu 77,81MtCO₂, resultando em uma taxa de 634,2kgCO₂/MWh produzido.

Fonte - Autor, 2023

5 - $[(VR_{(UTE)}/EB_{(UTE)})_{BRASIL} \times (EB_{(AHE)}/CI_{(AHE)})_{BRASIL} / [(VR_{(UTE)}/CI_{(UTE)})_{BRASIL}]$ - Índice de referência da redução do consumo de água por capacidade instalada de geração hidráulica do Brasil em relação ao consumo de água por capacidade instalada de geração térmica, considerada a referência fixa unitária do parque gerador térmico nacional, conforme a

Tabela 14.

Tabela 14 - Índice de referência da redução do consumo de água por capacidade instalada de geração hidráulica em relação ao consumo de água por capacidade instalada de geração térmica no Brasil.

Parque Gerador Térmico (Brasil)				
EB_{UTE} (GWh)	CI_{UTE} (GW)	VR_{UTE} (hm³/ano)	Taxa de consumo de água por CI_{UTE} do PGT do Brasil (hm³/GW.ano)	Índice unitário de consumo de água por CI de geração termoelétrica
204.253	46,856	2894,89	61,78	1
Parque Gerador Hidráulico (Brasil)				
EB_{AHE} (GWh)	CI_{AHE} (GW)	EB_{AHE}/CI_{AHE} (Wh/W)	Taxa equivalente de redução do consumo de água por CI_{AHE} do PGH do Brasil (hm³/GW.ano)	Índice de redução do consumo água por CI_{AHE} em relação a CI_{UTE} do Brasil
362.818	109,35	3.317,95	47,03	0,76

*O volume de retirada de água (VR) para geração de 204.253 GWh de fonte termoelétrica em 2021 foi equivalente a 91,8 m³/s ou 2894,89 hm³/ano, o que representa uma taxa de consumo de 0,014hm³/GWh.ano gerado (ANA, 2022; EPE, 2022).

Fonte - Autor, 2023

6 - $[(\text{PIB}/\text{OIEE}) \times (\text{OIEE}_{(\text{AHE})}/\text{OIEE})]_{\text{BRASIL}} / [(\text{PIB}/\text{OIEE}) \times (1 - (\text{OIEE}_{(\text{AHE})}/\text{OIEE}))]_{\text{BRASIL}}$ - Índice de referência da parcela do PIB gerada pela OIEE de fonte hidráulica no Brasil em relação a parcela do PIB gerada pela OIEE a partir de outras fontes de energia no Brasil, considerada como a referência fixa unitária do parque gerador nacional, conforme a Tabela 15.

Tabela 15 - Índice de referência da parcela do PIB gerada pela OIEE a partir de fonte hidráulica em relação a parcela do PIB gerada pela OIEE a partir de outras fontes de energia no Brasil.

Parque Gerador de Energia (Brasil)

PIB (10⁹ US\$)	OIEE_{BR} (GWh)	PIB/OIEE_{BR} (US\$/kWh)	OIEE_{AHE} (GWh)	OIEE_{AHE}/OIEE_{BR}	PIB/OIEE_{AHE} (US\$/kWh)
2.173,4	656.108	3,31	362.818	0,55	1,83
Parque Gerador Hidráulico (Brasil)					
PIB/OIEE_{AHE} (US\$/kWh)	PIB/OIEE demais fontes (US\$/kWh)	Relação entre PIB/OIEE_{AHE} e PIB/OIEE das demais fontes do parque gerador	Índice unitário de referência da relação entre o PIB/OIEE_{AHE} e o PIB/OIEE demais fontes		
1,83	1,48	1,24	1		

Fonte - Autor, 2023

6.6.2 Setor Elétrico – Minas Gerais

1 - $[(EB_{(AHE)} / CI_{(AHE)}) \times 8.760h]_{MG} / [(EB_{(AHE)} / CI_{(AHE)}) \times 8.760]_{BRASIL}$ - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período completo do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada no parque gerador hidráulico de MG sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional, conforme a Tabela 16.

Tabela 16 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período completo do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada no parque gerador hidráulico de MG sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional.

Parque Gerador Hidráulico (MG)			
EB_{AHE} (GWh)	CI_{AHE} (GW)	EB_{AHE}/[CI_{AHE} x 8.760] (Wh/Wh)	Relação entre fator de capacidade de MG sobre o cenário Brasil
35.041	12,131	0,33	0,87

Fonte - Autor, 2023

2 - $[(EB_{(AHE)} / CI_{(AHE)}) \times 4.392]_{MG} / [(EB_{(AHE)} / CI_{(AHE)}) \times 4.392]_{BRASIL}$ - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada no parque gerador hidráulico de MG sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional, conforme a Tabela 17.

Tabela 17 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período completo do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada no parque gerador hidráulico de MG sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional.

Parque Gerador Hidráulico (MG)			
---------------------------------------	--	--	--

EB_{AHE} (GWh)	CI_{AHE} (GW)	$EB_{AHE}/[CI_{AHE} \times 4.392]$ (Wh/Wh)	Relação entre fator de capacidade de MG sobre o cenário Brasil
17.726	12,131	0,33	0,95

Fonte - Autor, 2023

3 - $[(EB_{AHE(SECO)}/EB_{(ANO)})]_{MG} / [(EB_{AHE(SECO)}/EB_{(ANO)})]_{BRASIL}$ - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a energia bruta gerada no período completo do ano civil no parque gerador hidráulico de MG sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional, conforme a Tabela 18.

Tabela 18 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a energia bruta gerada no período completo do ano civil no parque gerador hidráulico de MG sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional.

Parque Gerador Hidráulico (Minas Gerais)			
EB_{AHE} Ano civil (GWh)	EB_{AHE} Período Seco (GWh)	EB_{AHE} período seco sobre EB_{AHE} ano civil (GWh/GWh)	Relação entre a EB_{AHE} ano civil / período seco em MG comparada ao cenário do PGH do Brasil
35.041	17.726	0,51	1,09

Fonte - Autor, 2023

4 - $[(EB_{(AHE)}/CI_{(AHE)}) \times 0,6342]_{MG} / [(EB_{UTE(FÓSSIL)}/CI_{UTE(FÓSSIL)}) \times 0,6342]_{BRASIL}$ - Índice de redução de emissão de GEE por capacidade instalada de geração hidráulica em MG no período seco em relação à emissão de GEE por capacidade instalada de geração térmica, considerada a referência fixa unitária do parque gerador térmico nacional, conforme a Tabela 19.

Tabela 19 - Índice de redução de emissão de GEE por capacidade instalada de geração hidráulica em MG no período seco em relação à emissão de GEE por capacidade instalada de geração térmica no Brasil.

Parque Gerador Térmico a combustível fóssil (Brasil)			
$EB_{UTE(FÓSSIL)}$ período seco (GWh)	$CI_{UTE(FÓSSIL)}$ (GW)	Taxa de emissão de GEE (CO ₂) por CI_{UTE} a combustível fóssil (tCO ₂ /GW)	Índice unitário de emissão de CO ₂ por CI_{UTE} a combustível fóssil (período seco)

78.110	27,089	1828,69	1
Parque Gerador Hidráulico (MG)			
EB_{AHE} período seco (GWh)	CI_{AHE} (GW)	Redução de emissões de CO₂ [EB_{AHE}/CI_{AHE}] x 0,6342] (tCO₂/GW)	Índice de redução de emissão de CO₂ por CI_{AHE} em relação a CI_{UTE} a combustível fóssil no Brasil
17.726	12,131	926,70	0,507

*A produção de energia elétrica por UTE a combustível fóssil em 2021 foi de 122.690 GWh e emitiu 77,81 MtCO₂, resultando em uma taxa de 634,2 kgCO₂/MWh produzido.

Fonte - Autor, 2023

5 - $[(VR_{(UTE)}/EB_{(UTE)})_{BRASIL} \times (EB_{(AHE)}/CI_{(AHE)})_{MG} / [(VR_{(UTE)}/CI_{(UTE)})_{BRASIL}]$ - Índice de redução do consumo de água por capacidade instalada de geração hidráulica do parque gerador de Minas Gerais em relação ao consumo de água por capacidade instalada de geração térmica, considerada a referência fixa unitária do parque gerador térmico nacional, conforme a Tabela 20.

Tabela 20 - Índice de redução do consumo de água por capacidade instalada de geração hidráulica do parque gerador de Minas Gerais em relação ao consumo de água por capacidade instalada de geração térmica no Brasil.

Parque Gerador Térmico (Brasil)				
EB_{UTE} (GWh)	CI_{UTE} (GW)	VR_{UTE} (hm³/ano)	Taxa de consumo de água por CI_{UTE} do PGT do Brasil (hm³/GW.ano)	Índice unitário de consumo de água por CI de geração termoelétrica
204.253	46,856	2894,89	61,78	1
Parque Gerador Hidráulico (MG)				
EB_{AHE} (GWh)	CI_{AHE} (GW)	EB_{AHE}/CI_{AHE} (Wh/W)	Taxa equivalente de redução do consumo de água por CI_{AHE} do PGH de MG (hm³/GW.ano)	Índice de redução do consumo água por CI_{AHE} em relação a CI_{UTE} do Brasil
35.041	12,13	2.888,55	40,94	0,66

*O volume de retirada de água (VR) para geração de 204.253 GWh de fonte termoelétrica em 2021 foi equivalente a 91,8m³/s ou 2894,89hm³/ano, o que representa uma taxa de consumo de 0,014hm³/GWh.ano gerado (ANA, 2022; EPE, 2022).

Fonte - Autor, 2023

6 - $[(\text{PIB}/\text{OIEE})_{\text{BRASIL}} \times (\text{OIEE}_{(\text{AHE})}/\text{OIEE})_{\text{MG}}] / [(\text{PIB}/\text{OIEE})_{\text{BRASIL}} \times (1 - (\text{OIEE}_{(\text{AHE})}/\text{OIEE})_{\text{MG}})]$
 – Índice de relação da parcela do PIB gerada pela oferta interna de energia elétrica (OIEE) a partir de fonte hidráulica em MG em relação a parcela do PIB gerada pela oferta interna de energia elétrica (OIEE) a partir de outras fontes de energia em MG sobre a referência fixa unitária do parque gerador nacional, conforme a

Tabela 21.

Tabela 21 - Índice de relação da parcela do PIB gerada pela OIEE de fonte hidráulica em MG em relação a parcela do PIB gerada pela OIEE de outras fontes em MG sobre a referência fixa unitária do parque gerador nacional.

Parque Gerador de Energia (MG)				
PIB/OIEE (US\$/kWh)	OIEE_{MG} (GWh)	OIEE_{AHE} (GWh)	OIEE_{AHE}/OIEE	PIB/OIEE_{AHE} (US\$/kWh)
3,31	51.347	35.041	0,68	2,26
Parque Gerador Hidráulico (MG)				
PIB/OIEE_{AHE} (US\$/kWh)	PIB/OIEE demais fontes (US\$/kWh)	Relação entre PIB/OIEE_{AHE} MG sobre PIB/OIEE demais fontes de MG	Relação de crescimento do PIB/OIEE_{AHE} e PIB/OIEE de MG sobre o cenário nacional	
2,26	1,05	2,15	1,74	

Fonte - Autor, 2023

6.6.3 PCH Inhapim

Uma vez obtidos os incrementos energéticos ($\Delta E_{30\% - 100\%}$ e $\Delta E_{50\% - 100\%}$) da vazão de referência ($Q_{7,10}$), em relação ao estabelecimento de fluxos percentuais das vazões de referência no TVR, pode-se realizar o cálculo dos indicadores propostos e algumas considerações acerca de fatores

de influência exercidos pela participação da geração hidráulica da PCH Inhapim na matriz elétrica.

1 - $[(EB_{(AHE)} / CI_{(AHE)}) \times 8.760]_{PCH} / [(EB_{(AHE)} / CI_{(AHE)}) \times 8.760]_{BRASIL}$ - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período completo do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada na PCH Inhapim sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional, conforme a Tabela 22.

Tabela 22 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período completo do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada na PCH Inhapim sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional.

PCH Inhapim				
	EB_{AHE} (MWh)	CI_{AHE} (MW)	EB_{AHE} / [CI_{AHE} x 8.760] (Wh/Wh)	Relação entre fator de capacidade da PCH sobre o cenário Brasil
30% Q_{7,10}	36.832,43	6	0,70	1,85
50% Q_{7,10}	35.943,25	6	0,68	1,81

Fonte - Autor, 2023

2 - $[(EB_{(AHE)} / CI_{(AHE)}) \times 4.392]_{PCH} / [(EB_{(AHE)} / CI_{(AHE)}) \times 4.392]_{BRASIL}$ - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada na PCH Inhapim sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional, conforme a Tabela 23.

Tabela 23 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a capacidade de geração instantânea da potência instalada na PCH Inhapim sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional.

PCH Inhapim				
	EB_{AHE} (MWh)	CI_{AHE} (MW)	EB_{AHE} / [CI_{AHE} x 4.392] (Wh/Wh)	Relação entre fator de capacidade da PCH sobre o cenário Brasil
30% Q_{7,10}	13.260,60	6	0,50	1,44
50% Q_{7,10}	12.668,90	6	0,48	1,37

Fonte - Autor, 2023

3 - $[(EB_{AHE(SECO)} / EB_{(ANO)})]_{PCH} / [(EB_{AHE(SECO)} / EB_{(ANO)})]_{BRASIL}$ - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a energia bruta

gerada no período completo do ano civil pela PCH Inhapim sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional, conforme a Tabela 24.

Tabela 24 - Índice de relação entre a energia bruta gerada no período seco/crítico (abril a setembro) do ano civil e a energia bruta gerada no período completo do ano civil pela PCH Inhapim sobre a referência fixa unitária do fator de capacidade do parque gerador nacional.

PCH Inhapim			
EB_{AHE} Ano civil (GWh)	EB_{AHE} Período Seco (GWh)	EB_{AHE} ano civil sobre a EB_{AHE} período seco (GWh/GWh)	Relação entre a EB_{AHE} ano civil / período seco da PCH comparada ao cenário do PGH do Brasil
36,83	13,26	0,36	0,78
35,94	12,67	0,35	0,76

Fonte - Autor, 2023

4 - $[(EB_{(AHE)}/CI_{(AHE)}) \times 0,6342]_{PCH} / [(EB_{UTE(FÓSSIL)}/CI_{UTE(FÓSSIL)}) \times 0,6342]_{BRASIL}$ - Índice de redução de emissão de GEE por capacidade instalada de geração hidráulica da PCH Inhapim no período seco em relação à emissão de GEE por capacidade instalada de geração térmica, considerada a referência fixa unitária do parque gerador térmico nacional, conforme a Tabela 25.

Tabela 25 - Índice de redução de emissão de GEE por capacidade instalada de geração hidráulica da PCH Inhapim no período seco em relação à emissão de GEE por capacidade instalada de geração termelétrica do Brasil.

Parque Gerador Térmico a combustível fóssil (Brasil)			
EB_{UTE(FÓSSIL)} período seco (GWh)	CI_{UTE(FÓSSIL)} (GW)	Taxa de emissão de GEE (CO₂) por CI_{UTE} a combustível fóssil (tCO₂/GW)	Índice unitário de emissão de CO₂ por CI_{UTE} a combustível fóssil (período seco)
78.110	27,089	1828,69	1
PCH Inhapim			
EB_{AHE} período seco (GWh)	CI_{AHE} (GW)	Redução de emissões de CO₂ [EB_{AHE}/CI_{AHE}] x 0,6342] (tCO₂/GW)	Índice de redução de emissão de CO₂ por CI_{AHE} em relação a CI_{UTE} a combustível fóssil no Brasil
30% Q_{7,10}	13,26	0,006	1401,65
			0,766

50% Q_{7,10}	12,67	0,006	1339,10	0,732
-----------------------------	-------	-------	---------	-------

*A produção de energia elétrica por UTE a combustível fóssil em 2021 foi de 122.690 GWh e emitiu 77,81 MtCO₂, resultando em uma taxa de 634,2 kgCO₂/MWh produzido.

Fonte - Autor, 2023

5 - $[(VR_{(UTE)}/EB_{(UTE)})_{BRASIL} \times (EB_{(AHE)}/CI_{(AHE)})_{PCH}] / [(VR_{(UTE)}/CI_{(UTE)})_{BRASIL}]$ - Índice de redução do consumo de água por capacidade instalada de geração hidráulica da PCH Inhapim em relação ao consumo de água por capacidade instalada de geração térmica, considerada a referência fixa unitária do parque gerador térmico nacional, conforme a

Tabela 26.

Tabela 26 - Índice de redução do consumo de água por capacidade instalada de geração hidráulica da PCH Inhapim em relação ao consumo de água por capacidade instalada de geração termelétrica no Brasil.

Parque Gerador Térmico (Brasil)				
EB_{UTE} (GWh)	CI_{UTE} (GW)	VR_{UTE} (hm³/ano)	Taxa de consumo de água por CI_{UTE} do PGT do Brasil (hm³/GW.ano)	Índice unitário de consumo de água por CI de geração termelétrica
204.253	46,856	2894,89	61,78	1
PCH Inhapim				
EB_{AHE} (GWh)	CI_{AHE} (GW)	EB_{AHE}/CI_{AHE} (Wh/W)	Taxa equivalente de redução do consumo de água por CI_{AHE} da PCH Inhapim	Índice de redução do consumo água por

					(hm ³ /GW.ano)	CI _{AHE} em relação a CI _{UTE} do Brasil
30% Q_{7,10}	36,83	0,006	6.138,74		87,00	1,41
50% Q_{7,10}	35,94	0,006	5.990,54		84,90	1,37

*O volume de retirada de água (VR) para geração de 204.253 GWh de fonte termoeétrica em 2021 foi equivalente a 91,8 m³/s ou 2894,89 hm³/ano, o que representa uma taxa de consumo de 0,014 hm³/GWh.ano gerado (ANA, 2022; EPE, 2022).

Fonte - Autor, 2023

6 - $[(\text{PIB}/\text{OIEE})_{\text{BRASIL}} \times (\text{OIEE}_{(\text{AHE})}/\text{OIEE})_{\text{PCH}}] / [(\text{PIB}/\text{OIEE})_{\text{BRASIL}} \times (1 - (\text{OIEE}_{(\text{AHE})}/\text{OIEE})_{\text{PCH}})]$ - Relação da parcela do PIB gerada pela oferta interna de energia elétrica (OIEE) a partir de fonte hidráulica da PCH Inhapim em relação a parcela do PIB gerada pela oferta interna de energia elétrica (OIEE) de fonte complementar (não hidráulica) à capacidade total instalada da PCH Inhapim sobre a referência fixa unitária do parque gerador de nacional, conforme a

Tabela 27.

Tabela 27 - Relação da parcela do PIB gerada pela OIEE de fonte hidráulica da PCH Inhapim em relação a parcela do PIB gerada pela OIEE de fonte complementar.

Parque Gerador de Energia (PCH Inhapim)

Cenário de EB_{AHE}	PIB/OIEE (US\$/kWh)	OIEE (GWh)	OIEE_{AHE} (GWh)	OIEE_{AHE}/OIEE	PIB/OIEE_{AHE} (US\$/kWh)
30% Q_{7,10}	3,31	52,56	36,83	0,70	2,32
50% Q_{7,10}	3,31	52,56	35,94	0,68	2,27

PCH Inhapim			
PIB/OIEE_{AHE} (US\$/kWh)	PIB/OIEE demais fontes (US\$/kWh)	Relação entre PIB/OIEE_{AHE} Da PCH sobre PIB/OIEE da fonte complementar	Relação de crescimento do PIB/OIEE_{AHE} e PIB/OIEE da PCH sobre o cenário nacional
2,32	0,99	2,34	1,89
2,27	1,05	2,16	1,74

*Produto Interno Bruto (PIB) em 2021 é igual a 2.173,4 x 10⁹ US\$ (EPE, 2022). A OIEE da capacidade instalada da PCH Inhapim equivale a 6 MW x 8760 h = 52,56 GWh/ano, sendo assumido a parcela complementar como o montante de energia restante para um fator de capacidade unitário (100%).

Fonte - Autor, 2023

6.7 ANÁLISE COMPARATIVA

Considerados os cenários de estabelecimento de vazões residuais em (i) 30% da Q_{7,10} e (ii) 50% da Q_{7,10} no TVR da PCH Inhapim, a variação da disponibilidade energética proporcionada pelas alterações de vazões permitiu avaliar a relação de equivalência refletida sobre a capacidade instalada em cada cenário, de modo a estabelecer uma relação de comparação sobre a eficiência de cada conjunto.

Assim, em virtude dos resultados obtidos em cada relação, foi analisado o comportamento dos indicadores ambientais e socioeconômicos propostos de forma comparativa à eficiência da capacidade instalada no contexto do Estado e do Brasil, tendo sempre por referência unitária os valores do parque gerador hidráulico ou térmico nacional.

A

Tabela 28 demonstra a relação de grandeza dos indicadores em relação à eficiência da capacidade instalada em cada conjunto avaliado.

Tabela 28 - Análise comparativa dos indicadores frente à relação da capacidade instalada.

Cenário de referência		Indicadores					
		I1 IRFCGHA	I2 IRCFCGPS	I3 IRGPSGA	I4 IREGEEPS	I5 IRRAGT	I6 IPFHFCP
PGT	Térmica	-	-	-	1828,69	61,78	-
PGH	Brasil	0,38	0,35	0,46	976,52	47,03	1,24
	MG	0,33	0,33	0,51	926,70	40,94	2,15
PCH Inhapi	Q _{TVR} 30% Q _{7,10}	0,70	0,50	0,36	1401,65	87,00	2,34
	Q _{TVR} 50% Q _{7,10}	0,68	0,48	0,35	1339,10	84,90	2,16

Fonte - Autor, 2023

A Tabela 29 demonstra a relação de grandeza dos indicadores em relação à eficiência da capacidade instalada dos conjuntos em cada contexto avaliado sobre a referência unitária do parque gerador nacional.

Tabela 29 - Análise comparativa dos indicadores em referência unitária frente ao parque gerador nacional.

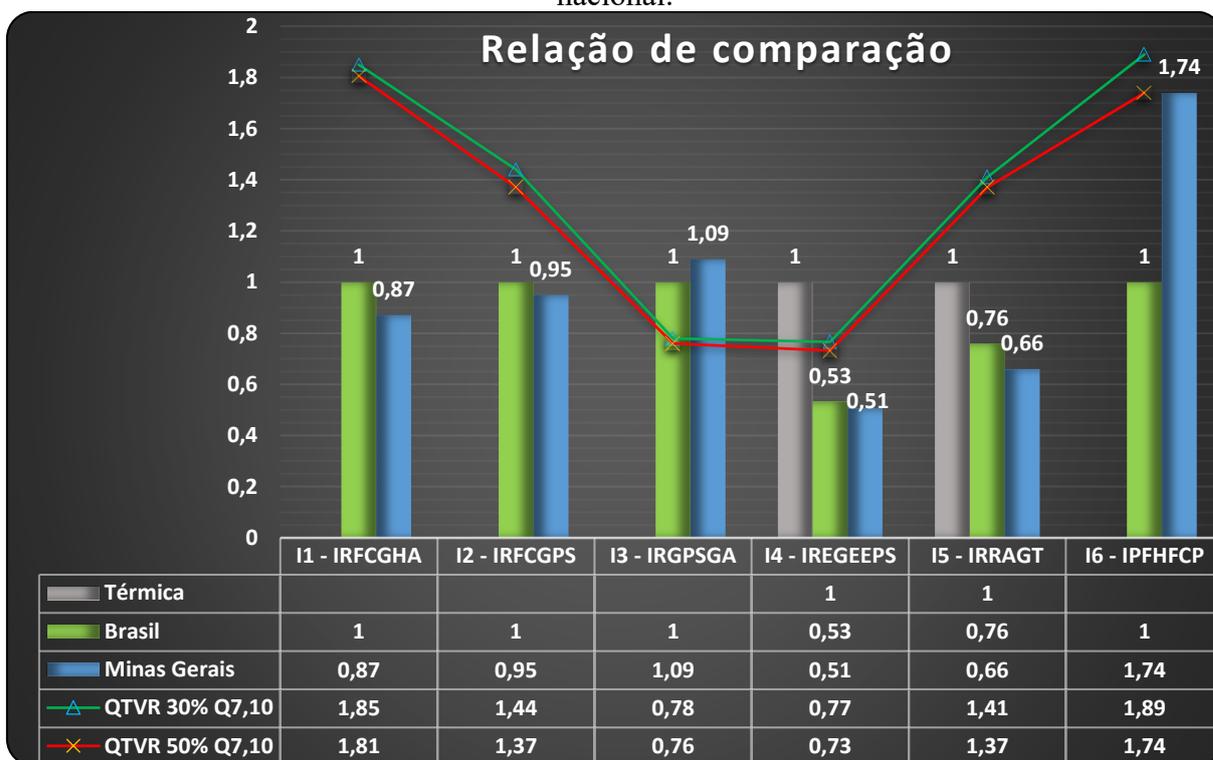
Cenário de referência		Indicadores em referência unitária					
		I1 IRFCGHA	I2 IRCFCGPS	I3 IRGPSGA	I4 IREGEEPS	I5 IRRAGT	I6 IPFHFCP
PGT	Térmica	-	-	-	1	1	-
PGH	Brasil	1	1	1	0,53	0,76	1
	MG	0,87	0,95	1,09	0,51	0,66	1,74
PCH Inhapi	Q _{TVR} 30% Q _{7,10}	1,85	1,44	0,78	0,77	1,41	1,89
	Q _{TVR} 50% Q _{7,10}	1,81	1,37	0,76	0,73	1,37	1,74

Fonte - Autor, 2023

Uma vez o estabelecimento das unidades de grandeza do parque gerador (hidráulico e termelétrico) nacional como referência fixa unitária, foi possível demonstrar uma relação de proporção do desempenho dos indicadores propostos em cada conjunto gerador, tendo por base a metodologia aplicada, conforme pode ser observado por meio do

Gráfico 5.

Gráfico 5 - Análise comparativa do desempenho dos indicadores frente ao parque gerador nacional.



Fonte - Autor, 2023

Os indicadores 1, 2 e 3 refletem diretamente nas condições de modulação operacional do empreendimento, alterando a relação de energia gerada frente à concepção do arranjo tecnológico adotado e à definição da vazão residual no TVR, indicando uma maior ou menor disponibilidade energética em determinados períodos ou sazonalidades.

Já os indicadores 4 e 5 apresentam uma relação fixa unitária do parque gerador térmico, indicando a capacidade do parque gerador hidráulico em contribuir com as metas de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) e do consumo de água por demanda térmica.

O indicador 6 representa a participação da oferta interna de energia elétrica de fonte hídrica ($OIEE_{AHE}$) sobre a geração de renda em relação a parcela do PIB gerada pela oferta interna de energia elétrica de fonte complementar ($OIEE_{FC}$).

Em relação aos resultados obtidos pelos indicadores apresentados, podem ser tecidas algumas considerações sobre as condições operacionais do empreendimento e sobre as oportunidades de melhoria de aspectos ambientais e econômicos decorrente da eficiência da capacidade instalada ou da relação do arranjo físico selecionado quando comparados os cenários estadual e nacional, conforme abordado abaixo.

- *Indicador 1*

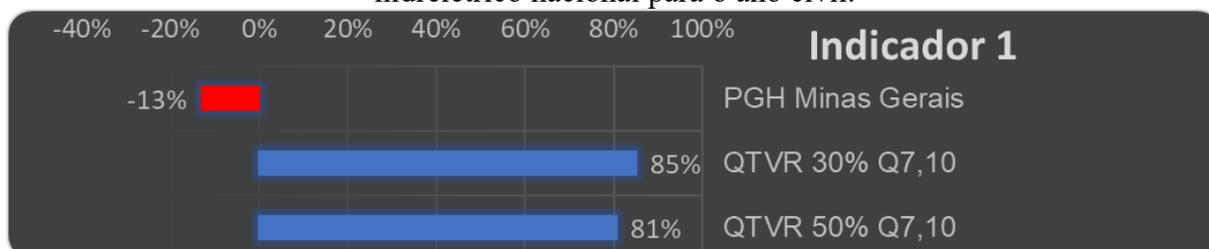
Considerada a energia bruta gerada frente à capacidade instalada de geração instantânea, para a geração no período completo do ano civil, em ambos os cenários de vazão residual (30% e 50% da $Q_{7,10}$), o fator de capacidade da PCH Inhapim demonstra-se muito superior à referência fixa unitária do parque gerador hidráulico nacional e da capacidade instalada em MG, uma vez a relação de 0,7 Wh/Wh, ou seja, a equivalência de 70% para o fator de capacidade instantânea de geração quando considerado o período completo.

Embora o Estado de MG possua um fator de capacidade inferior (0,33 Wh/Wh), a capacidade de aproveitamento do potencial hidráulico disponível na PCH Inhapim representa uma eficiência até 85% superior por MW instalado do parque nacional, o que denota uma concepção tecnológica que proporciona um melhor aproveitamento das caudais sazonais e uma disponibilidade energética por MW instalada muito superior ao contexto nacional.

Não obstante, há ainda de se considerar que a extensão dos empreendimentos envolvidos na escala estadual e federal atinge alguns aproveitamentos que possuem reservatórios que operam na modalidade de regularização de vazão, o que culmina na possibilidade de armazenamento da energia excedente na forma de água, preservando o volume dos reservatórios e, portanto, diminuindo a energia bruta gerada em determinados períodos em detrimento da melhoria em outros períodos.

O desempenho percentual da eficiência do fator de capacidade do cenário estadual e da PCH Inhapim sobre o cenário unitário de referência (Brasil), considerado o ano civil de 2021, pode ser visualizado por meio do Gráfico 6.

Gráfico 6 - Desempenho percentual da eficiência do fator de capacidade do parque gerador hidrelétrico estadual (PGH Minas Gerais) e da PCH Inhapim frente ao parque gerador hidrelétrico nacional para o ano civil.



Fonte - Autor, 2023

- *Indicador 2*

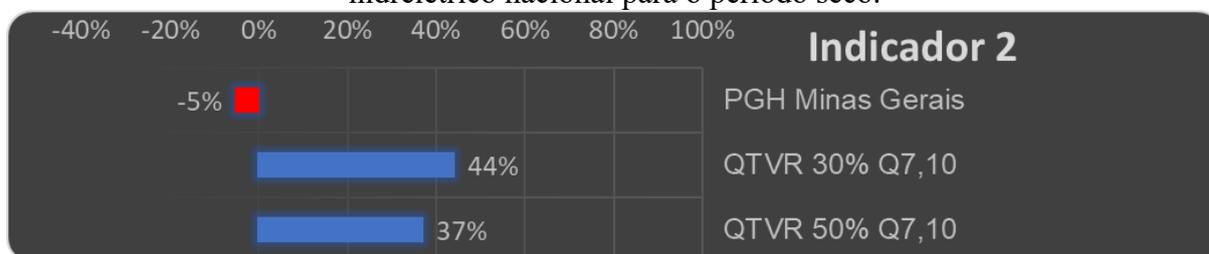
No período seco, embora a energia bruta gerada por MW de capacidade instalada apresente uma redução em relação ao período completo do ano civil, contudo, a eficiência do aproveitamento do potencial hidráulico da PCH Inhapim demonstra-se superior à média do parque gerador nacional (0,35 Wh/Wh).

O comportamento do fator de capacidade da PCH Inhapim no período seco, para o cenário de 30% da $Q_{7,10}$, indica que o arranjo tecnológico do empreendimento foi dimensionado de forma a aproveitar a diferença entre a amplitude das vazões do período de cheia e do período de seca, condições estas que interferem na vazão mínima operacional e, portanto, na geração de energia.

Assim, ganha notório destaque compreender que a concepção da alternativa discutida privilegiou a série de caudais mínimas do local proporcionando um fator de capacidade de 50% sobre a potência instalada, uma vez que a operação do empreendimento ocorre a fio d'água, sem a modulação do reservatório, e que quanto maior a capacidade instalada maior a demanda de água para manutenção da vazão mínima operativa, o que poderia ocasionar a impossibilidade de geração em períodos críticos.

Por meio do Gráfico 7 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível demonstrar o desempenho percentual da eficiência do fator de capacidade para o período seco (abril a setembro de 2021) no cenário estadual e da PCH Inhapim em relação ao cenário parque gerador hidráulico do Brasil.

Gráfico 7 - Desempenho percentual da eficiência do fator de capacidade do parque gerador hidrelétrico estadual (PGH Minas Gerais) e da PCH Inhapim frente ao parque gerador hidrelétrico nacional para o período seco.



Fonte - Autor, 2023

- *Indicador 3*

Ao avaliar a energia bruta gerada no período seco sobre a energia bruta do período completo do ano civil, verifica-se um desempenho abaixo da referência do parque gerador nacional e estadual, uma vez que a modalidade de operação do reservatório da PCH Inhapim é a fio d'água e não permite a acumulação de energia na forma de água, demonstrando um fator de capacidade entre 0,35 e 0,36 por MW de potência instalada.

O desempenho percentual da relação entre a geração hidráulica no período seco sobre o montante gerado no período anual do cenário estadual e da PCH Inhapim sobre o cenário unitário de referência (Brasil), considerado o ano de 2021, pode ser visualizado por meio do Gráfico 8.

Gráfico 8 - Desempenho percentual da relação entre a geração hidráulica no período seco e o período anual do parque gerador hidrelétrico estadual (PGH Minas Gerais) e da PCH Inhapim frente ao parque gerador hidrelétrico nacional.



Fonte - Autor, 2023

Neste contexto, denota-se a aptidão da alternativa tecnológica empregada no estado de MG devido à concepção de empreendimentos de aproveitamento do potencial hidráulico que possuem grandes reservatórios para acumulação que possibilitam uma operação modulada dos mesmos por meio da regularização de vazões, potencializando o montante de energia bruta gerada no período seco e diminuindo a diferença de energia gerada no período completo.

Para este indicador, tem-se que a OIEE a partir de fonte hídrica no Estado de MG apresenta uma relação de 0,51 Wh gerados no período seco a cada 1 Wh gerado no período completo, sendo 9% superior do que a média nacional, atingindo uma relação de rendimento potencializada pela presença de grandes reservatórios.

Desta forma, a concepção de um aproveitamento hidrelétrico na modalidade de derivação de fluxo, como a PCH Inhapim, não representa uma alternativa viável quando da necessidade de atendimento a demandas que tenham por objetivo a regularização de vazão, quer

seja pela possibilidade de conservação de energia na forma de água ou pela finalidade de abastecimento a jusante de reservatórios.

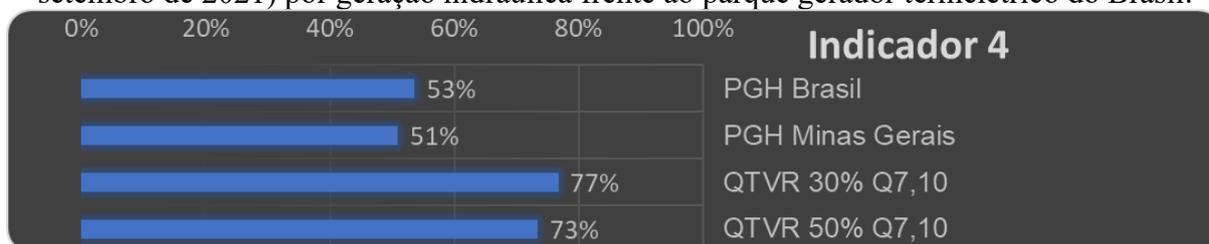
- *Indicador 4*

Quanto à relação de redução de GEE, destaca-se que a análise realizada considerou o período do ano em que se registra o maior incremento de emissões de GEE em decorrência do acionamento de térmicas a combustível fóssil para garantia do atendimento à demanda instantânea de energia elétrica, ou seja, foram considerados os meses de abril a setembro.

A energia bruta gerada neste período pelo parque gerador térmico nacional indicou uma emissão equivalente de 1828,69 tCO₂/GW (kgCO₂/MW) de capacidade instalada de fonte térmica, considerada como referência unitária.

O Gráfico 9 demonstra o desempenho percentual da capacidade de redução de emissão de GEE no período seco (abril a setembro de 2021) quando considerado o montante de energia proveniente de fonte hidráulica a partir dos cenários nacional, estadual e da PCH Inhapim em relação ao cenário parque gerador termelétrico do Brasil.

Gráfico 9 - Desempenho percentual da redução de emissão de GEE no período seco (abril a setembro de 2021) por geração hidráulica frente ao parque gerador termelétrico do Brasil.



Fonte - Autor, 2023

Assim, considerado o período seco, a equivalência de redução da emissão de GEE para geração térmica a cada MW instalado de fonte hídrica da PCH Inhapim chega a representar 77%.

A cada 1 MW de capacidade instalada gerado houve uma redução de 73% a 77% de emissão de kgCO₂ a cada 1 MW de fontes térmicas a combustíveis fósseis, nos cenários de 50% e 30% da Q_{7,10}, respectivamente.

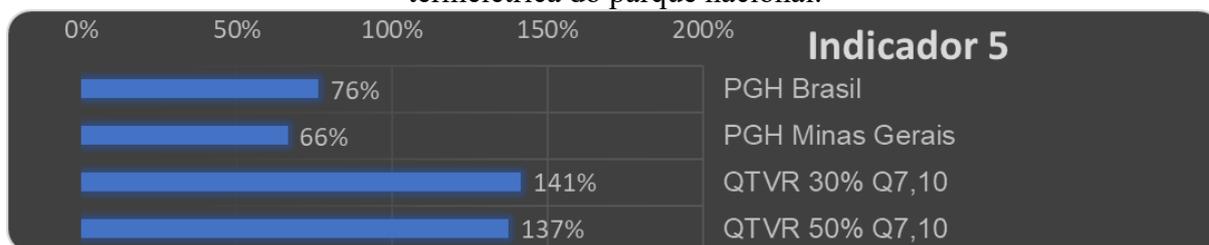
Já a relação de redução por capacidade instalada dos parques geradores hidráulico estadual e nacional representou uma eficiência média da ordem de 51% a 53% por MW instalado, o que coloca a PCH Inhapim bem acima da média estadual e nacional.

- Indicador 5

A avaliação sobre a redução do uso dos recursos hídricos para a finalidade de geração de energia elétrica a partir de fontes térmicas considerou o volume total retirado pelo parque gerador termelétrico no período completo do ano civil de 2021.

O desempenho percentual da participação da capacidade instalada de fonte hidrelétrica como fonte alternativa para a redução da retirada em virtude do consumo para geração termelétrica foi avaliado sobre o cenário unitário de referência do parque gerador termelétrico nacional (Brasil) e pode ser visualizado por meio do Gráfico 10.

Gráfico 10 - Desempenho percentual redução da retirada de água por capacidade instalada de geração hidráulica em relação à retirada de água por capacidade instalada de geração termelétrica do parque nacional.



Fonte - Autor, 2023

A energia bruta gerada pelo parque térmico nacional representou uma referência unitária de retirada de água equivalente a 62 hm³/GW.ano de capacidade instalada, enquanto a relação de energia bruta gerada por capacidade instalada de fonte hidráulica representou uma redução de 47,03 hm³/GW.ano (76%) no âmbito nacional e de 40,94 hm³/GW.ano (66%) no Estado de Minas Gerais.

Enquanto isso, considerado o cenário de estabelecimento de uma vazão residual de 50 e 30% da Q_{7,10}, a somatória da energia bruta gerada por capacidade instalada da PCH Inhapim representa a redução de 85 a 87 hm³/GW.ano, ou seja, a eficiência de geração nestas condições implica em um cenário de redução da retirada de água quase 2 vezes maior do que a média nacional e estadual, denotando uma expressiva relação proporcional entre os parques geradores hidrelétricos.

Neste contexto, particularmente sobre a ótica da concepção adotada, verifica-se que a eficiência do fator de capacidade dos arranjos físicos de centrais hidrelétricas que operam a fio d'água, independentemente da modalidade de adução do fluxo, contribui significativamente para potencializar a redução de retirada de recursos hídricos para geração termelétrica, pois o dimensionamento da capacidade instalada das unidades geradoras encontra-se estabelecida entre os limites das caudais de longo termo.

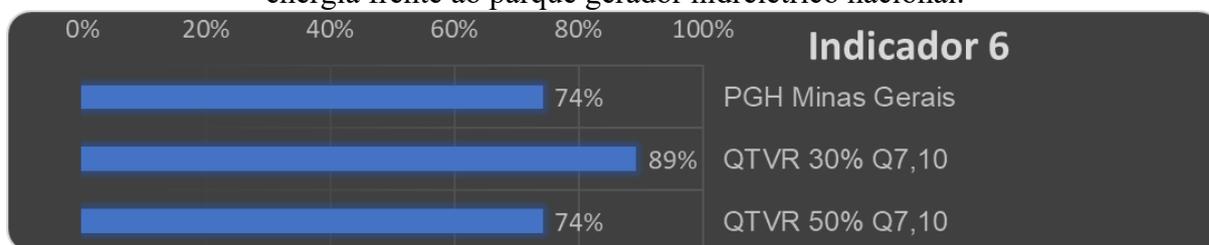
- Indicador 6

Considerado o PIB de 2021 igual a $2.173,4 \times 10^9$ US\$ frente aos 656.108 GWh de oferta interna de energia elétrica (OIEE), tem-se uma relação equivalente de geração de 3,31 US\$ a cada kWh gerado.

Quando avaliada a proporção da parcela do PIB relacionada à participação da oferta interna de energia elétrica (OIEE) de fonte hidráulica sobre a OIEE de fontes complementares (proveniente de outras fontes), tem-se uma relação de 1,83 US\$/kWh gerado de fonte hidráulica a cada 1,48 US\$/kWh gerado de fontes complementares, de modo que a parcela hídrica utilizada na produção de riquezas é 1,24 vezes maior que a das demais fontes, sendo estabelecida como a referência fixa unitária do setor.

O Gráfico 11 demonstra o desempenho percentual da participação das fontes hidrelétricas nos cenários estadual e da PCH Inhapim para a produção de cada unidade de US\$ do PIB quando comparados ao cenário unitário de referência do parque gerador hidrelétrico nacional (Brasil), considerado o ano de 2021.

Gráfico 11 - Desempenho percentual da relação da parcela do PIB gerada pela OIEE a partir de fonte hidráulica em relação à parcela do PIB gerada pela OIEE a partir de outras fontes de energia frente ao parque gerador hidrelétrico nacional.



Fonte - Autor, 2023

Uma vez que a significativa disponibilidade hídrica do Estado confere uma vocação natural da disponibilidade energética junto ao setor elétrico, o parque gerador de Minas Gerais

apresentou a participação da OIEE de fonte hidráulica 74% maior do que a participação do parque gerador nacional em relação ao PIB, quando comparado com as demais fontes complementares da OIEE do Estado.

Em escala local, considerada a fonte complementar da PCH Inhapim como o incremento de energia necessário a um fator de capacidade de 100%, somente o cenário de estabelecimento de uma vazão residual de 30% da $Q_{7,10}$ no TVR proporcionou uma maior participação da OIEE de fonte hídrica da PCH Inhapim acima dos valores do Estado de Minas Gerais, denotando um comportamento comum quando relacionado à participação das fontes hídricas na geração de riqueza.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos indicadores 1, 2 e 3 para os cenários de vazões residuais da PCH Inhapim indicam a configuração de um aproveitamento de potencial hidráulico que proporciona uma melhor eficiência energética por capacidade instalada quando comparados ao parque gerador nacional e o aumento de energia disponível por MW instalado, o que culmina no aumento da participação das fontes de energia renováveis na matriz energética, indicando uma condição que contribui favoravelmente as metas estabelecidas junto aos itens 7.2 e 7.3 do ODS 7.

Noutro giro, o fator de capacidade entre o montante de energia bruta gerada no período seco por MW de capacidade instalada disponível no ponto de aproveitamento hidrelétrico da PCH Inhapim demonstrou-se superior aos demais cenários espaciais analisados (MG e Brasil), consolidando o melhor aproveitamento de caudais inferiores em decorrência do dimensionamento das unidades geradoras entre os limites das vazões médias de longo termo.

Embora a energia bruta gerada pela PCH Inhapim no período seco seja inferior a disponibilidade energética no período completo, quando comparada ao contexto estadual e nacional, tal condição é intrínseca à concepção do reservatório de seu arranjo físico na modalidade de um regime de operação a fio d'água, dado a existência de grandes reservatórios de regularização de vazão nos parques geradores de MG e do Brasil.

Considerada a modulação operacional do reservatório na concepção do aproveitamento hidrelétrico, mesmo que não tenha sido um dos objetivos desta pesquisa, pode-se ainda destacar que a determinação do arranjo físico de centrais hidrelétricas que possuam o reservatório

artificial em regime de operação a fio d'água apresenta uma relação do fator de capacidade que demonstra uma maior eficiência às metas estabelecidas pelo ODS 7.

Entretanto, cabe destacar que a alternativa tecnológica de seleção de um regime de operação a fio d'água não poderia ser aplicada sobre a análise de empreendimentos que possuem a concepção de seu arranjo físico determinada pela finalidade de regularização de vazões, seja pela possibilidade de conservação de energia na forma de água ou pela finalidade de abastecimento a montante e a jusante de reservatórios, de modo a evitar eventuais conflitos pelo uso múltiplo dos recursos hídricos.

Considerando as metas do item 7.1 do ODS 7, tem-se uma otimização dos benefícios proporcionados pela preferência da participação da geração hídrica quando reduzidas a emissão GEE de fontes de combustível fóssil, como demonstrado pelo indicador 4, e a redução da retirada total de água para a finalidade de geração termelétrica, como demonstrado junto ao indicador 5.

Além disso, concorrente a este cenário de desenvolvimento do setor elétrico, tem-se que a implementação da Lei Federal n. 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), aponta a necessidade de uma postura que proporcione “(...) mudanças e substituições tecnológicas que reduzam o uso de recursos e as emissões por unidade de produção”.

Dentre tais mudanças, deve-se ressaltar que o aumento da participação de renováveis na matriz elétrica é diretamente proporcional à capacidade instalada de fonte hidráulica, conforme já demonstrado no comparativo entre a evolução da capacidade instalada e a geração elétrica (Gráfico 2 do referencial teórico).

A análise sobre o eixo dos indicadores 4 e 5 permite inferir a possibilidade de adoção de uma metodologia, aplicada à análise do procedimento de outorga do direito de uso dos recursos hídricos, que contempla a implementação de medidas que fomentam o estabelecimento de critérios de preferência para a exploração de serviços públicos e recursos naturais, podendo influenciar no processo de tomada de decisão, que privilegiem a seleção de alternativas tecnológicas condizentes com os objetivos do item 7.1 do ODS 7.

Quanto à análise do eixo econômico, a avaliação do indicador 6 expõe a dinâmica da participação da OIEE decorrente de fonte hídrica sobre a parcela gerada no PIB e demonstra uma intensa relação de predominância da vocação geográfica e natural do país na capacidade instalada da matriz energética, dada sua riqueza de disponibilidade hídrica superficial, de modo

a proporcionar condições de universalização do acesso aos serviços de energia a partir de uma fonte limpa e a preços mais justos.

Deste modo, consideradas as limitações do sítio geográfico natural deste tipo de arranjo físico de derivação de fluxo, quando não envolvidas restrições ecológicas decorrentes do licenciamento ambiental, a análise da adoção de uma vazão mínima residual equivalente a 30% da $Q_{7,10}$ no TVR, ou seja, pouco abaixo do limite indiretamente estabelecido pela parcela outorgável (30% da $Q_{7,10}$), demonstrou o potencial de contribuição da PCH Inhapim frente ao parque gerador hidrelétrico estadual, contribuindo para uma maior participação de uma fonte energética limpa e renovável para produção de riquezas.

Ainda, associada ao viés econômico e em intrínseca relação ao indicador 6, conforme já abordado junto ao referencial teórico, o custo médio de geração de energia elétrica por fonte hidráulica (UHE/PCH/CGH) é, no mínimo, duas vezes menor quando comparado ao custo de geração termelétrica a partir de fontes de combustível fóssil, como o carvão mineral, derivados do petróleo e gás natural, inferindo o potencial de otimização da economia de custos associados à propensão para geração de energia a partir de fontes hídricas.

Embora não seja objeto de discussão desta pesquisa, sobre o eixo de outros aspectos naturais que definem a vocação hidráulica da matriz elétrica no âmbito nacional, verifica-se que a participação de fontes hidráulicas se encontra menos submetida aos fatores de variabilidade e volatilidade quando comparada a outras fontes renováveis como a eólica e a fotovoltaica, dado o desenvolvimento de modelos de previsão a curto prazo e da ampla rede de monitoramento existente para os dados hidrométricos.

Desta forma, diante da situação de inexistência de relacionamento operacional junto aos órgãos gestores do setor elétrico (ONS/ANEEL/MME), a importância de valorização da participação das fontes de energia renováveis na matriz elétrica brasileira, de modo a promover uma linha de correspondência às metas do ODS 7, demonstra-se uma alternativa viável à análise comparativa dos cenários de vazões mínimas residuais no TVR de aproveitamentos de potencial hidráulico na modalidade de derivação de fluxo, bem como uma ferramenta auxiliar no processo de tomada de decisão para a concepção do arranjo físico tecnológico.

8 REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEMANETO BÁSICO. **Estudos de análise de consistência de dados fluviométricos de estações de monitoramento da ANA em operação nas bacias hidrográficas selecionadas – 2020**. Disponível em: <https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Acervo/Detalhe/90394>. Acesso em: 02 mai. 2023.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEMANETO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022: Informe Anual**. Brasília: ANA, 2023. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>>. Acesso em: 20 abr. 2023.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEMANETO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: Relatório Pleno**. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_2021_pdf_final_revdirec.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2023.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEMANETO BÁSICO. **Manual de Estudos de Disponibilidade Hídrica para Aproveitamentos Hidrelétricos - 2009**. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2009/ManualdeEstudosdeDisponibilidadeHidrica.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2023.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEMANETO BÁSICO. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes>>. Acesso em: 22 abr. 2021.

BRASIL. Lei Federal n. 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do artigo 21 da CF, e altera o artigo 1º. da Lei n. 8.001, de 13.03.1990, que modificou a Lei n. 7.990, de 28.12.1989. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm>. Acesso em: 01 mai. 2021.

BRASIL. Lei Federal n. 12.187, de 29 de dezembro de 2009. institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Lei/L12187.htm>. Acesso em: 29 mai. 2023.

BUENAGA, F. **Alternativa Metodológica para Definição da Vazão Ecológica em Trechos de Vazão Reduzida em Hidrelétricas**, v. 1, p. 300, 2019.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. **Introdução ao geoprocessamento**. São José dos Campos: INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2001.

CBH-DOCE - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE. **Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Doce – 2010 (Volume I)**. Disponível em: <<https://www.cbhdoce.org.br/pirh-parh-pap/pirh>>. Acesso em: 28 abr. 2023.

CHAVES, H. M. L. et al. **Regionalização de Vazões Mínimas em Bacias Através de Interpolação em Sistemas de Informação Geográfica**. Disponível em: <<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=100&SUMARIO=1593>>. Acesso em: 28 abr. 2023.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2022 - Relatório Final (ano base 2021)**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>. Acesso em: 01 mai. 2022.

ELETROBRÁS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas - 2000**. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/acesoainformacao/data/Pages/LUMISF99678B3PTBRIE.htm>>. Acesso em: 01 mai. 2023.

EUCLYDES, H. P. et al. **Atlas digital das águas de Minas**. 3ª edição. RURALMINAS/UFV-DEA. Viçosa, MG. 1 CD-ROM.

GARBOSSA, L. H. P., PINHEIRO, A. **Vazões de referência para gestão de bacias hidrográficas rurais e urbanas sem monitoramento**. Disponível em: <<https://doi.org/10.21168/reg.v12n1.p43-52>>. Acesso em: 03 mai. 2023.

GOLDEMBERG, J. **Energia e Sustentabilidade**. Revista De Cultura E Extensão USP, 14, 33-43. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/issn.2316-9060.v14i0p33-43>>. Acesso em: 28 de abr. 2023.

GRILL, G. et al. **Mapping the world's free-flowing rivers**, Nature, v. 569, n. 7755, p. 215–221, 2019.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável - Brasil 2010**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/ids2010.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2021.

MARCUZZO, F. F. N. **Curva-chave traçada pelo MATLAB com diferentes tipos de equações suportadas pelo programa Hidro**. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/15127>>. Acesso em: 05 mai. 2023.

LONGHI, E. H.; FORMIGA, K. T. M. **Metodologias para determinar vazão ecológica em rios**, Revista Brasileira de Ciências Ambientais, v. 20, p. 33–48, 2011.

MENEGON, I. **Manual para estimativa de vazões de referência aplicado a outorga de uso da água**. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/252954>>. Acesso em: 06 mai. 2023.

MINAS GERAIS. Lei Estadual n. 13.199, de 29 de janeiro de 1999. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=5309>>. Acesso em: 01 mai. 2021.

MINAS GERAIS. Resolução Conjunta SEMAD/IGAM n. 1.768, de 30 de novembro de 2012. Estabelece os procedimentos técnicos e administrativos para emissão de outorga para fins de aproveitamento de potencial hidrelétrico em corpos de água de domínio do Estado de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=24077>>. Acesso em: 01 mai. 2021.

MINAS GERAIS. Sistema Integrado de Informações Ambientais (SIAM). Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/siam/processo/index.jsp>>. Acesso em: 01 mai. 2023.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas - 2007 (3ª Edição). Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/aprt2009372mme_2.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2021.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. SINtegre - **Portal de Relacionamento**. Disponível em: <<https://sintegre.ons.org.br/>>. Acesso em: 05 mai. 2023.

ONU - NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL (2023). **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) no Brasil**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 15 mai. 2023.

PINTO, E.J.A., ALVES, M.M.S. (2001). **Regionalização de Vazões das Sub-Bacias 40 e 41 - Alto São Francisco (Volume 5)**. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/20881/5/18_regionalizacao_sb40e41_volume_V.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2023.

PINTO, L.; SANTOS, A. O custo da geração de energia. Disponível em: <<https://static.poder360.com.br/2021/06/custo-geracao-energia-ABRAPCH-fev2021.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2023.

REIS, L. B. **Geração de Energia Elétrica**. 2ª Edição. Barueri, SP: Manole, 2011.

SANTOS, H. A.; POMPEU, P. S.; CALLISTO, M. **Alterações Hidrológicas à Jusante de uma Hidrelétrica: Efeitos Ecológicos e Proposições**, Belo Horizonte - MG: 10.5935, 2020.

SANTOS, H. M. M. et al. **Contribuição ao estudo da determinação da vazão remanescente em PCHs de desvio: A incorporação do valor econômico de recursos ambientais**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 6., 2008. Salvador. *Anais...* Salvador, 2008, p. 21.

SANTOS, A. H. M. et al. **Vazão remanescente no trecho de vazão reduzida de pequenas centrais hidrelétricas**. Disponível em: <<https://anais.abrhydro.org.br/job.php?Job=12033>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

SARMENTO, R. **Estado da Arte da Vazão Ecológica no Brasil e no Mundo, Edital n. 05, PROJETO 704BRA2041**, p. 38 p., 2007.

SILVA, J. X. ZAIDAN, R. T. **Geoprocessamento para Análise Ambiental: Aplicações**. 2ª Edição. Rio de Janeiro, RJ: Bertrand Brasil, 2007.

SOUSA, F.M.L. et al. **Sistema nacional de informações sobre recursos hídricos: sistematização conceitual e modelagem funcional**. Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=10334>>. Acesso em: 08 mai. 2023.

SOUZA, Z.; SANTOS, A. H. M.; BORTONI, E. C. **Centrais hidrelétricas: estudos para implantação**. Rio de Janeiro, RJ: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 1999.

STEFANI, F. L.; TOGNON, A. A.; SAAD, A. M.; AGENA, S. S. **Classificação das terras do município de Guaíra, SP, no sistema de capacidade de uso**. In: VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1996.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Rio Grande do Sul: Ed. Universidade/UFRGS, 2002. p.14.